

მექვესე თაობის (6G) უსადენო საკომუნიკაციო ქსელები და სისტემები

სერგო შავგულიძე

ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ნოდარ უღრელიძე

ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი
კავკასიის უნივერსიტეტი,
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი



კავკასიის უნივერსიტეტი
CAUCASUS UNIVERSITY

კავკასიის უნივერსიტეტის გამომცემლობა
თბილისი 2021

მეექვსე თაობის (6G) უსადენო საკომუნიკაციო ქსელები და სისტემები

Sixth Generation (6G) Wireless Communication Networks and Systems

ეს წიგნი გამსაზღვრავს 6G-ს კუთხით თანამედროვე ხედვას და განიხილავს მასთან დაკავშირებულ ისეთ საკვანძო კვლევით მიმართულებებს, როგორებიცაა გამოყენებების მემთხვევები და ტექნოლოგიები, საკომუნიკაციო ლინკის ბიუჯეტის ანალიზი, სტანდარტიზაციის პირველი ეტაპები სუბტერაპერცული სიხშირული დიაპაზონისათვის, გამჭოლი სრული სტევის ქსელების დანერგვის პერსპექტივები, არხის შესახებ ინფორმაციით შეზღუდული ულტრა დაბალი შეყოვნების, მცირე ენერგიის და მასიური სისტემების კონსტრუირება, ბლოკეინით მხარდაჭერილი პლატფორმის გამოყენება, საკომუნიკაციო ქსელის დეცენტრალიზებული მართვისა და ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული ქსელებისა და სისტემების მართვის მეთოდები. წიგნში შეკრებილია ამ მიმართულებებით მსოფლიო ტექნიკურ ლიტერატურაში არსებული გამორჩეული ნაშრომები, გაერთიანებული და სისტემატიზებულია ისინი და ყველაფერი თემატურად ერთი ქოლგის ქვეშ არის მოქცეული. ვფიქრობთ, რომ მასალა სასარგებლო იქნება და დახმარებას გაუწევს ტელეკომუნიკაციის დარგში მომუშავე სპეციალისტებს და აკადემიურ პერსონალს, მაღალი კურსის ბაკალავრიატის სტუდენტებს, მაგისტრანტებსა და დოქტორანტებს.

რედაქცია – პროფესორი რევაზ სვანიძე

კორექტურა – ქეთევან ულრუხელიძე

ტექნიკური რედაქცია და რეცენზია – პროფესორი მიხეილ ჭოხონელიძე

კომპიუტერული უზრუნველყოფა – მაია ჯაფოშვილი

ნაშრომი შესრულებულია სსიპ – შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის გრანტის (FR17-74) ფარგლებში

© კავკასიის უნივერსიტეტის გამომცემლობა, თბილისი, 2021

© Caucasus University Publishing House, Tbilisi, 2021

ISBN 978-9941-9746-1-8

www.cu.edu.ge

გამომცემლობის თანხმობის გარეშე ამ წიგნის არც ერთი ნაწილი არ შეიძლება გადაბეჭდილი ან რაიმე ფორმით კვლავ გამოცემული და გავრცელებული იქნას.

სარჩევი

წინასიტყვაობა	9
თავი 1. 6G ქსელები – გამოყენება და ტექნოლოგიები	15
1.1. შესავალი	15
1.2. ფიჭური ქსელების ევოლუცია	16
1.3. 6G-ს გამოყენების შემთხვევები	20
1.3.1. მომატებული რეალობა და ვირტუალური რეალობა ...	21
1.3.2. ჰოლოგრაფიული ტელეპორტაცია (ტელედასწრება) ...	22
1.3.3. ელექტრონული ჯანდაცვა	23
1.3.4. ყოვლისმომცველი კავშირი	23
1.3.5. ინდუსტრია 4.0 და რობოტიკა	24
1.3.6. უპილოტო მობილურობა	25
1.4. 6G-ს შესაძლებლობების მარეალიზებელი ტექნოლოგიები	26
1.4.1. გამრღვევი საკომუნიკაციო ტექნოლოგიები	28
1.4.2. ინოვაციური ქსელური არქიტექტურა	33
1.4.3. ინტელექტის ინტეგრირება ქსელში	37
1.5. პირველი თავის დასკვნები	40
პირველი თავში გამოყენებული ლიტერატურა	41
თავი 2. საკომუნიკაციო ლინკის ბიუჯეტის ანალიზი 6G-სთვის	43
2.1. შესავალი	43
2.2. 6G სიხშირეები და ძირითადი გამოწვევები	44
2.3. ლინკის ბიუჯეტის შეფასების მეთოდი	50

2.3.1. ბიტის მიზნობრივი სიჩქარე და სიხშირის გატარების ზოლი	54
2.3.2. გადაცემის სიმძლავრე და ხმაურის კოეფიციენტი	55
2.3.3. ანტენის გამლიერება	57
2.4. ლინკის ბიუჯეტის გაანგარიშება	59
2.5. მეორე თავის დასკვნები	67
მეორე თავში გამოყენებული ლიტერატურა	69
თავი 3. IEEE 802.15.3d – სტანდარტიზაციის პირველი ცდები სუბტერაპერგული სიხშირული დიაპაზონისთვის 6G-ს მიმართულებით	71
3.1. შესავალი	71
3.2. 6G-ს კონცეფცია და ახალი სტანდარტის შემუშავების წინაპირობები	72
3.3. IEEE 802.15d სტანდარტის მოტივაცია და გამოყენების სცენარები	75
3.3.1. ფრონტპოლის და ბექპოლის უსადენო ლინკები	77
3.3.2. დამატებითი უსადენო ლინკები მონაცემთა ცენტრებში	78
3.3.3. კიოსკ-ჩამოტვირთვები	79
3.3.4. მოწყობილობის შიდა კავშირები	79
3.4. IEEE 802.15.3d MAC ფენა	80
3.5. IEEE 802.15.3d PHY ფენა	83
3.5.1. ზოგადი მიმოხილვა	83
3.5.2. მხარდაჭერილი არხები	84
3.5.3. ტპე-SC PHY ფენის რეჟიმი	85
3.5.4. ტპე-OOK PHY ფენის რეჟიმი	87
3.5.5. მახასიათებლების საწყისი შეფასება	88

3.6. ტერაჰერცული სიხშირული დიაპაზონის სტანდარტიზაციის მიმართულებით წინ გადადგმული ნაბიჯები და დასკვნები	92
3.6.1. ტერაჰერცულ დიაპაზონში კომუნიკაციების მარეგულირებელი ასპექტები 6G-ში	92
3.6.2. IEEE 802.15d სტანდარტის პროტოტიპების შექმნა	93
3.7. მესამე თავის დასკვნები და პერსპექტიული განვითარების გზები	94
მესამე თავში გამოყენებული ლიტერატურა	95
თავი 4. 6G ტერაჰერცულ სიხშირეებზე გამჭოლი სრული სტეკის ქსელების დანერგვის პერსპექტივები	98
4.1. შესავალი	98
4.2. ტერაჰერცული ქსელების განვითარების საკვანძო სფეროები	99
4.3. ცნობიერების შემოტანა	103
4.3.1. ლინკის ბიუჯეტებისა და საწყისი წვდომის შეფოვნების შედარება	104
4.3.2. ოპერაცია სხივებზე ტერაჰერცული დიაპაზონისთვის	107
4.4. საკომუნიკაციო ლინკის დიზაინი ულტრა ფართო სიხშირული გატარების ზოლისთვის	110
4.5. ქსელის მასშტაბურობა	112
4.5.1. ენერგიის დამზოგავი ქსელის დიზაინი	114
4.5.2. მართვის სიბრტყე ამრეკლავი საანტენო მესრებისა და მეტაზედაპირებისათვის	116
4.6. სპექტრის მართვა	117
4.6.1. ინტერფერენციები	117
4.6.2. უსადენო ბექჰოლი	118

4.6.3. მრავალკავშირიანობა	119
4.7. ბიტების გადადგილება ერთი ბოლოდან მეორე ბოლომდე	121
4.8. მეოთხე თავის დასკვნები და ღია საკითხები	124
მეოთხე თავში გამოყენებული ლიტერატურა	125
თავი 5. 6G ეპოქა – ულტრა დაბალი შეყოვნება, მცირე ენერგია და მასიურობა CSIT-ით შეზღუდული სქემების ბაზაზე	128
5.1. შესავალი	128
5.2. CSIT-ით შეზღუდული სქემების შემუშავება	129
5.3. CSIT-ის მოპოვებისათვის გაწეული დანახარჯები	132
5.3.1. შეყოვნების ღირებულება	132
5.3.2. ენერგიის ღირებულება	134
5.3.3. მასშტაბურობა	135
5.4. CSIT-ით შეზღუდული გადაწყვეტილებები 6G სისტემებისთვის	136
5.4.1. პილოტ-სიგნალების მიმდევრობების ეფექტური გამოყოფა	137
5.4.2. არხის სტატისტიკის და სტრუქტურის გამოყენება	140
5.4.3. ადგილმდებარეობაზე დაფუძნებული სტრატეგიები ...	143
5.5. გამოყენების მაგალითი: CSIT-სგან თავისუფალი მასიური WET	146
5.6. მეხუთე თავის დასკვნები და ძირითადი გამოწვევები ...	149
მეხუთე თავში გამოყენებული ლიტერატურა	150
თავი 6. ბლოკჩეინით მხარდაჭერილი პლატფორმის გამოყენება 6G ქსელის დეცენტრალიზებული მართვისას	153

6.1. შესავალი	153
6.2. ბლოკჩეინის გამოყენების მიზნები	154
6.3. 6G-ში ბლოკჩეინის ინტეგრაციის ძირითადი თავისებურებები და პოტენციალი	158
6.3.1. ბლოკჩეინის თავისებურებები	158
6.3.2. ბლოკჩეინის უპირატესობები და პოტენციური შესაძლებლობები 6G-ში	159
6.4. ბლოკჩეინით მხარდაჭერილი 6G მობილური დეცენტრალიზებული ქსელის არქიტექტურა	163
6.4.1. დეცენტრალიზებული მრავალპერატორიანი 6G მობილური ქსელის ეკონომიკური მოდელი	163
6.4.2. დეცენტრალიზებულ ბლოკჩეინზე დაფუძნებული მრავალპერატორიანი 6G მობილური ქსელის ტექნიკური მოდელი	166
6.5. ბლოკჩეინზე დაფუძნებული სმარტ-კონტრაქტების სამუშაო პროცესის შემოთავაზებული სცენარები მრავალპერატორიანი ქსელებისათვის	171
6.5.1. ბლოკჩეინზე დაფუძნებული სმარტ-კონტრაქტის განზოგადებული სამუშაო პროცესი მომსახურების უზრუნველსაყოფად	171
6.5.2. ბლოკჩეინზე დაფუძნებული სმარტ-კონტრაქტების კომპიუტერული სიმულაცია და მახასიათებლების ანალიზი	173
6.5.3. დისკუსია და შემდგომი კვლევის პერსპექტივები	176
6.6. მეექვსე თავის დასკვნები	177
მეექვსე თავში გამოყენებული ლიტერატურა	178

თავი 7. ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული საეთერო ინტერფეისი და ქსელის მართვის მეთოდები 6G-სთვის	181
7.1. შესავალი	181
7.2. ხელოვნური ინტელექტის როლი მომავალ 6G ქსელებში	182
7.3. AI-ით მხარდაჭერილი ქსელის არქიტექტურა და მაღალი ფენის დიზაინი	185
7.3.1. მოტივაცია	185
7.3.2. AI-ით მხარდაჭერილი RAN-ის არქიტექტურა	187
7.3.3. პოტენციური გავლენა სტანდარტიზაციაზე და მომავალი გამოწვევები	192
7.4. AI-ით მხარდაჭერილი ფიზიკური ფენის დიზაინი	194
7.4.1. AI-ით მხარდაჭერილი ტრანსივერსის შემუშავება	194
7.4.2. გავლენა სტანდარტიზაციაზე	201
7.5. AI-ით მხარდაჭერილი ფენათა შორისი ოპტიმიზაცია ...	203
7.6. ხელოვნური ინტელექტის მეთოდები 6G ქსელებისათვის	205
7.6.1. AI-ით მხარდაჭერილი მობილური პერიფერიული გამოთვლები	205
7.6.2. ინტელექტუალური მობილურობა და ჰენდოვერის მართვა	208
7.6.3. სპექტრის ინტელექტუალური მართვა	211
7.7. მეშვიდე თავის დასკვნები	213
მეშვიდე თავში გამოყენებული ლიტერატურა	213
ბოლოთქმა	217
აკრონიმები	219

წინასიტყვაობა

ბოლო 10 წლის განმავლობაში ჩვენ მოწმე გავხდით 5G (5th Generation) ტექნოლოგიების სტანდარტების შემუშავების, სავსე გამოცდების ჩატარების და კომერციალიზაციის მცდელობების. დღეს ჰორიზონტზე ჩნდება და მასიურად ინერგება 5G სისტემები, ამასთან, ველოდებით, რომ მათ მოჰყვებიან მეექვსე თაობის (6G) სისტემები, რომლებიც განახორციელებენ მნიშვნელოვან ხარისხობრივ ნახტომს კომუნიკაციებში, მაგალითად მონაცემების გადაცემის პიკური და საშუალო სიჩქარის, სპექტრული ეფექტურობის, შეყოვნების, ენერგოეფექტურობის და დაფარვის თვალსაზრისით. 6G დასაბამს დაუდებს ახალ შესაძლებლობებს, ახალ მომსახურებებს და ხელს შეუწყობს მსოფლიო გლობალური საზოგადოების მდგრად სოციალურ-ეკონომიკურ განვითარებას. 6G სავარაუდოდ გზას გაუხსნის საკომუნიკაციო, გამოთვლითი და მონაცემთა ტექნოლოგიების კიდევ უფრო მეტ დაახლოებას. მიღწევები ვირტუალიზაციის, ხელოვნური ინტელექტის, მონაცემთა შეგროვება-დამუშავების და შენახვის, მაღალხარისხიანი გამოთვლითი და მონაცემებზე ორიენტირებული სერვისების მიმართულებებით მოახდენს ისეთ გრანდიოზულ ცვლილებებს მომდევნო თაობის საკომუნიკაციო სისტემებსა და ქსელებში, როგორც ჩვენ აქამდე არ გვინახავს.

იმ გარემოების გათვალისწინებით, რომ სამყარო მიდის 6G-სკენ, ტერაბიტი წამში (ტბიტი/წმ) გადაცემის სიჩქარის მქონე უსადენო კომუნიკაციები და მათი მხარდამჭერი ქსელების ინფრასტრუქტურა სავარაუდოდ გახდება გაბატონებული ტექნოლოგიური ტენდენცია. ამასთან, გარკვეული მკაცრი შეზღუდვები გავლენას ახდენს მომავალი უსადენო კომუნიკაციების სისტემების შესაძლებლობებზე, ერთდროულად დააკმაყოფილონ მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარე, ნუ-

ლოვანთან მიახლოებული შეყოვნება და მაღალი სპექტრული და ენერგეტიკული ეფექტურობა. ამ კონტექსტში უსადენო კომუნიკაციებისათვის ტერაჰერცული სიხშირული ზოლების გამოყენება, როგორც ოპტიკურ-ბოჭკოვანი სისტემების გაფართოება, იმედის მომცემი საშუალებაა ამ სირთულეების გადასაღებად და საშუალებას იძლევა შეიქმნას საყოველთაოდ მდლსიჩქარიანი ინტერნეტი 5G-ს საზღვრებს გარეთ. უფრო მეტიც, კერძო და ინდუსტრიულ სექტორებში მობილური და ფიქსირებული მომხმარებლების გაზრდილ რაოდენობას დასჭირდება ასობით გიგაბიტი წამში (გბიტ/წმ) სიჩქარე, სხვადასხვა ხასიათის კომუნიკაციებისათვის. ასეთ სცენარებში, გონივრული კაპიტალური და ოპერაციული ხარჯების კუთხით კრიტიკულ პარამეტრებს, გარდა მონაცემთა გადაცემის სიჩქარისა, წარმოადგენს საკომუნიკაციო დიაპაზონი (მანძილი) და მისაღები სპექტრული და ენერგეტიკული ეფექტურობა. ტერაჰერცული სიხშირული ზოლების გამოყენებას უნიკალური და ახალი გამოწვევები მოაქვს, რაც საჭიროებს საკომუნიკაციო სისტემის და ქსელის ზოგიერთი არსებული მექანიზმის გადახედვას. ამ გამოწვევების ძირითადი მიზეზია ტერაჰერცული რადიოკავშირის ულტრა ფართო სიხშირული ზოლები და საკომუნიკაციო ლინკების მკაცრად მიმართული ხასიათი, ასევე ტერაჰერცული კომუნიკაციების სხვა თავისებურებები, სიგნალის ფორმირების, ანტენების კონსტრუირების, არხების და ინტერფერენციების მოდელირებისა და აპარატურის სირთულეზე არსებული შეზღუდვების კუთხით. ვიწრო სხივებით გამოწვეული რადიოინტერფერენციების ფუნდამენტურად განსხვავებული ხასიათი მოითხოვს მათ საფუძვლიან შესწავლას და დეტალურ მოდელირებას. გასათვალისწინებელია პირდაპირი და არაპირდაპირი ხედვის საკომუნიკაციო ლინკებში სიგნალთა არეკლილი და გაფანტული კომპონენტები, ისევე როგორც თანდაყოლილი მოლეკულური ხმაური, ანტენების მიმართულების არასრულყოფილ გასწორებასთან დაკავშირებული გაუარესებები და ბლოკირების ალბათობა. მედიუმთან

წვდომის და რადიორესურსების მართვის პროტოკოლები უნდა მუშაობდნენ ძალიან ვიწრო სხივების პირობებში და, ამიტომ, უნდა ემყარებოდნენ რადიკალურად განსხვავებულ პრინციპებს. სწრაფი ჰენდოვერის პროცედურები უნდა შეიცავდნენ საკმარის დროს სიგნალების აღმოჩენის, ლოკალიზაციისა და თვალყურის დევნებისათვის. მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე – ტერაბიტი წამში ქმნის მნიშვნელოვან გამოწვევებს ტრანსივერების შემუშავების პროცესში, რაც მოიცავს ალგორითმისა და არქიტექტურის დიზაინს, აგრეთვე აპარატურულ რეალიზაციას.

ხელოვნური ინტელექტი (Artificial Intelligence, AI) ამჟამად ერთ-ერთი ყველაზე ცხელი თემაა და თითქმის ყველა სფერო შეისწავლის AI ტექნოლოგიის გამოყენებას. AI-ის განვითარების ტენდენცია გვიჩვენებს ტექნოლოგიის მომწიფების შესაძლებლობას მომდევნო ათწლეულში. ამავე დროს, იმის გათვალისწინებით, რომ მომავალი 6G ქსელის სტრუქტურა იქნება უფრო და უფრო დიდი და ჰეტეროგენული, ხოლო ბიზნესის ტიპები და გამოყენების სცენარები უფრო და უფრო რთული და ცვალებადი, თითქმის გარდაუვალია AI ტექნოლოგიის სრულად გამოყენების გარეშე დაკმაყოფილდეს ეს მძიმე მოთხოვნები. მოსალოდნელია, რომ მომავალში 6G გაარღვევს მობილური კომუნიკაციის ტრადიციული სისტემების გამოყენების სფეროს და გაზდება ძირითადი ქსელი, რომელიც ხელს შეუწყობს მთელი საზოგადოების და მთელი დარგის/ინდუსტრიის მუშაობას. თუ მომავალი ქსელი კვლავ გამოიყენებს არსებულ ერთიან საკომუნიკაციო ქსელის ჩარჩოს 6G ეპოქაში უაღრესად მრავალფეროვანი და რთული აპლიკაციების მხარდასაჭერად, მას უპრეცედენტოდ დიდი გამოწვევები ელის. AI ტექნოლოგიის აღორძინებისა და სწრაფი განვითარების ახალმა რაუნდმა მოგვცა პოტენციური შესაძლებლობები ზემოხსენებული გამოწვევების დასაძლევად. შესაბამისად, მან შეიძლება შეცვალოს მობილური კომუნიკაციის დიზაინის ტრადიციული კონცეფციები და შესრულება და სრულად

უზრუნველყოს სამომავლო 6G ქსელი. ამიტომ, ჩვენ მიგვაჩნია, რომ AI ტექნოლოგიაზე დაფუძნებული 6G ქსელის აშენება გარდაუვალი არჩევანი იქნება და „ინტელექტუალურობა“ გახდება 6G ქსელის თანდაყოლილი მახასიათებელი.

ნაშრომის პირველ თავში განხილულია ტექნოლოგიები, რომლებიც ყალიბდება 6G უსადენო ქსელების შემუშავების პროცესში და რომელთაც ჩვენ მივიჩნევთ, როგორც პერსპექტიულ შესაძლებლობებს 6G-ს პოტენციური გამოყენებების შემთხვევებში. მეორე თავში ჩვენ შევისწავლით 300 გიგაჰერც სიხშირეებზე ფუნქციონირების შესაძლებლობებს. ეს განხორციელებულია საკომუნიკაციო ლინკის ბიუჯეტის შეფასების საფუძველზე, რომლის დროსაც გამოყენებულია ლინკის ბიუჯეტის ისეთი პარამეტრების დასაბუთებული გამოთვლები, როგორებიცაა ხმაურის კოეფიციენტის მოთხოვნილი ან მიღწევადი მინიმიზებულია, გადაცემის სიმძლავრე და ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტი. IEEE 802.15.3d სტანდარტი გვთავაზობს კომპუტირებულ წერტილი-წერტილთან არქიტექტურის კავშირს, მონაცემთა გადაცემის სიჩქარით 100 გბიტ/წმ და მეტი, ათობით სანტიმეტრიდან რამდენიმე ასეული მეტრის მანძილებზე. შესაბამისად, მესამე თავში ჩვენ წარმოვადგენთ IEEE 802.15.3d სტანდარტის დეტალიზაციას და დიზაინის ძირითად პრინციპებს, რომლებიც მიღებულია ამ სტანდარტის ფარგლებში. ნახევარგამტარული ტექნოლოგიების ბოლოდროინდელმა განვითარებამ გამოიწვია განსაკუთრებული ინტერესი ტერაჰერცული სიხშირული დიაპაზონის მიმართ, როგორც ტბიტ/წმ კომუნიკაციის საშუალებამ 6G ქსელებში. მეოთხე თავში მოცემულია იმ პრობლემების მიმოხილვა, რომელთა გადალახვაა საჭირო, რათა ტერაჰერცული სპექტრი შეტანილი იქნას მობილურ ქსელებში, მედიუმთან წვდომის მართვის, ქსელის და სატრანსპორტო ფენის პერსპექტივის გათვალისწინებით, ტერაჰერცულ კავშირებზე მონაცემთა გამჭოლი ნაკადის მახასიათებლების შესაბამისად. ინფორმაცია არხის მდგომარეობის შესახებ, ტრადიციული

უსადენო საკომუნიკაციო სისტემების ძირითადი პარამეტრია, მაგრამ მისი მოპოვება შესაძლოა გაძნელდეს მომავლის ქსელებში, რომლებიც მხარს დაუჭერენ მომსახურების ხარისხის ისეთ მკაცრ შეზღუდვებს, როგორებიცაა უკიდურესად დაბალი შეყოვნება, მცირე მოხმარებული ენერგია და ერთდროულად დაკავშირებული მოწყობილობების დიდი რაოდენობა. შესაბამისად, მეხუთე თავში ჩვენ შევაფასებთ, თუ როგორ უნდა შემუშავდეს და ვისარგებლოთ ეფექტური არხის შესახებ ინფორმაციის გამოყენების შეზღუდული სქემებით. მომავალი 6G ქსელები მოითხოვენ სიხშირული სპექტრის გააზრებულად გადანაწილებას მოცულობის, დროის და გამოყენების არეალის მიხედვით. ამ გარემოების გათვალისწინებით, მეექვსე თავში ჩვენ შევისწავლით ახალ მიმართულებას – ბლოკჩეინის ინტეგრაციას მობილური ქსელის ინფრასტრუქტურაში. დეტალურად იქნება შესწავლილი ბლოკჩეინის რეალიზაციის ისეთი ძირითადი ასპექტები 6G-სთვის, როგორებიცაა სპექტრისა და ინფრასტრუქტურის ტოკენიზაციის მოდელი, განაწილებული ლეჯერის სტრუქტურა და შესაძლო კონსენსუსის ალგორითმები. მეშვიდე თავში გამოკვლეულია AI-ის პოტენციური ზემოქმედება საეთერო ინტერფეისის დიზაინზე. განხილულია AI-ით მხარდაჭერილი ქსელის არქიტექტურა და წარმოდგენილია ფიზიკური ფენის, უფრო მაღალი ფენის და ფენათა შორის დიზაინი, რომლებიც გაძლიერებულია AI-ის შესაძლებლობებით. ნაჩვენებია, რომ AI-ით მხარდაჭერილი მობილური პერიფერიული გამოთვლების, ინტელექტუალური მობილურობის, ჰენდოვერის და სიხშირული სპექტრის ჭკვიანურად მართვის მეთოდები ხელს შეუწყობენ 6G ქსელების ეფექტურ ფუნქციონირებას.

ყველა ზემოაღნიშნული გამოწვევის წარმატებულად გამკლავების გზაზე, ერთ-ერთ საკვანძო საკითხს წარმოადგენს სპექტრულად და ენერგეტიკულად ეფექტური ციფრული სიგნალების შემუშავება არხებში რთული ხასიათის ხელშეშლებით. ვფიქრობთ, რომ ჩვენს მიერ ახლახან გამოცემულ მონოგრაფიაში (ნ. უღრელიძე, ს. შავგულიძე, ციფ-

რული კავშირის სისტემების შემუშავება რადიოარხებისათვის. კავკასიის უნივერსიტეტის გამომცემლობა, თბილისი, 2020) წარმოდგენილი იდეები და შედეგები მცირედით მაინც დაეხმარებათ 6G-ს მკვლევარებს მათ წინაშე არსებულ პრობლემების გადაჭრაში.

მიუხედავად იმისა, რომ 6G ჯერ კიდევ ჩასახვის პროცესშია, მსოფლიო ლიტერატურაში უკვე არსებობს მისდამი მიმდინილი მრავალი პუბლიკაცია. შესაბამისად, გადავწყვიტეთ შეგვეკრიბა ჩვენის აზრით საუკეთესო ნაშრომები, გაგვეერთიანებინა ისინი, მოგვებდინა ამ ნაშრომების სისტემატიზაცია და დაგვეწერა ეს წიგნი. ვფიქრობთ, რომ მასალა სასარგებლო იქნება და დახმარებას გაუწევს კომუნიკაციის დარგში მომუშავე სპეციალისტებს და აკადემიურ პერსონალს, მაღალი კურსის ბაკალავრიატის სტუდენტებს, მაგისტრანტებსა და დოქტორანტებს.

ბოლოს, შევჩერდებით წიგნში გამოყენებულ უცხოენოვან ტერმინებზე. როგორც ცნობილია, უცხო სიტყვების ენაში შემოტანის საკითხი დგება მაშინ, როდესაც იქმნება ახალი ცოდნა, რასაც მოსდევს ახალი ცნებებისა და, შესაბამისად, ახალი სიტყვების წარმოქმნა. მაგალითად, შეიქმნა ინტერნეტი და გაჩნდა სიტყვა – Internet, შეიქმნა კომპიუტერი და გაჩნდა სიტყვა – Computer, უფრო ადრე გაჩნდა ტელევიზორი, ტელეფონი და ასე შემდეგ. ამ შემთხვევაში ენას ორი არჩევანი აქვს: იგი ამგვარი ახალი ცნებებისათვის ქმნის სიტყვებს მშობლიური, საკუთარი ენის რესურსებით, ან შემოაქვს ენაში როგორც უცხო სიტყვა. ქართული ენა საკმაოდ ღიაა ამ თვალსაზრისით, იგი ხშირად იღებს უცხო სიტყვებს. ჩვენც გადავწყვიტეთ ამ გზით წავსულიყავით, ვინაიდან არ არსებობს დამკვიდრებული ტერმინოლოგია და ჩვენს მიერ მოცემული ქართული თარგმანი შეიძლება მკითხველის მიერ არასწორად ყოფილიყო აღქმული და, შესაბამისად, კონკრეტული ტერმინისთვის მას მიენიჭებინა არასწორი შინაარსი.

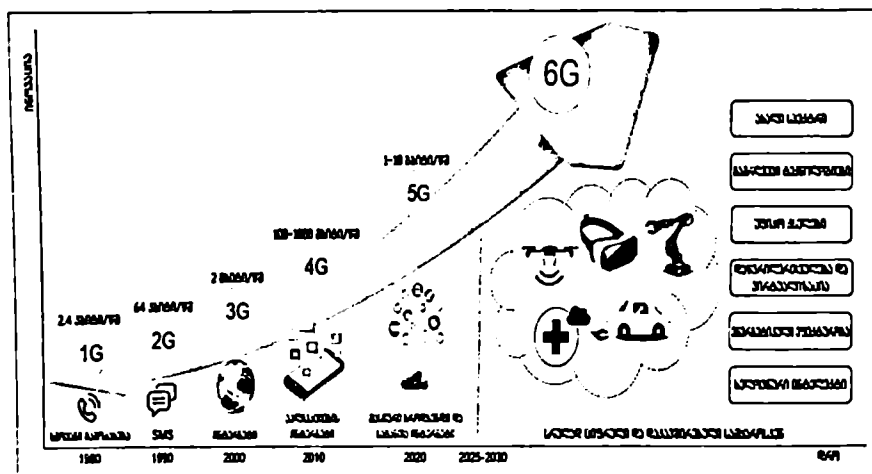
თავი 1. 6G ქსელები – გამოყენება და ტექნოლოგიები

1.1. შესავალი

მონაცემთა გადაცემისას საიმედო კავშირის დამყარებას აქვს სასიცოცხლო მნიშვნელობა სწრაფად გაფართოებადი, ინტელექტუალური, ავტომატიზებული და ყოვლისმომცველი ციფრული სამყაროსთვის. მობილური ქსელები არის მონაცემთა გადაცემის მაგისტრალები და ინტელექტუალურ ციფრულ სამყაროში უზრუნველყოფენ ყველანაირ კავშირებს – მათ შორის სატრანსპორტო საშუალებებთან, სენსორებთან, მონაცემთა ბაზებთან, ღრუბლოვანი (Cloud) რესურსებთან და თუნდაც რობოტიზებულ აგენტებთან. 5G უსადენო ქსელები, რომელთა დანერგვაც ამჟამად მიმდინარეობს, გვთავაზობს მნიშვნელოვან უპირატესობებს მეოთხე თაობის (4G) გრძელვადიანი ევოლუციის (Long Term Evolution, LTE) ქსელებთან შედარებით, მაგრამ შესაძლოა მათ ვერ დააკმაყოფილონ მომავალი ციფრული სისტემების სრულყოფილად დაკავშირების მოთხოვნები. შესაბამისად, ჩვენ წარმოვადგენთ ტექნოლოგიებს, რომლებიც ყალიბდება 6G უსადენო ქსელების შემუშავების პროცესში და რომელთაც ჩვენ განვიხილავთ, როგორც პერსპექტიულ შესაძლებლობებს, 6G-ს პოტენციური გამოყენებების შემთხვევებში. წინამდებარე თავში ჩვენ წარმოვადგენთ 6G-ს სცენარებისა და მოთხოვნების შესახებ სისტემური დონის პერსპექტივის სრულ აღწერას და შევარჩევთ 6G ტექნოლოგიებს, რომლებიც წარმოიქმნებიან ან 5G-ს დიზაინის გაუმჯობესებით, ან სრულიად ახალ კომუნიკაციურ პარადიგმებზე დაყრდნობით.

1.2. ფიჭური ქსელების ევოლუცია

მობილური ტექნოლოგიის თითოეული თაობა, პირველიდან მეხუთემდე, შექმნილია საბოლოო მომხმარებლებისა და ქსელის ოპერატორების მოთხოვნილებების დასაკმაყოფილებლად იმ სახით, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 1.1-ზე. თუმცა, დღესდღეობით, საზოგადოება ხდება სულ უფრო და უფრო მეტად გაზრდილი მონაცემების მოცულობაზე ორიენტირებული, მათზე დამოკიდებული და ავტომატიზებული. ინდუსტრიული წარმოების პროცესების რადიკალური ავტომატიზაცია განსაზღვრავს პროდუქტიულობას. ავტონომიური სისტემები მასობრივად მოიცავენ ჩვენს გზებს, ოკეანეებს და საეთერო სივრცეს. მილიონობით სხვადასხვა სენსორი განლაგდება ქალაქებში, სასლებში და სხვადასხვა საწარმოებში, ხოლო ახალი სისტემები, რომლებიც იმართებიან AI პრინციპებით და რომლებიც განთავსებულია ლოკალურ ღრუბლოვან და ნისლოვან (Fog) გარემოში, ხელს შეუწყობენ სისტემის ახლებურად გამოყენებების მრავალფეროვნებას.



ნახ. 1.1. ფიჭური ქსელების ევოლუცია 1G-დან 6G-მდე გამოყენებების არეებით

საკომუნიკაციო ქსელები წარმოგვიდგენენ ამ ახალი, გონიერი სისტემის პარადიგმების დამაკავშირებელ სისტემას. ამასთან ტექნიკური მოთხოვნები იქნება ძალიან მკაცრი. ქსელებს დასჭირდებათ მონაცემთა უფრო დიდი რაოდენობით გადატანა ბევრად უფრო მაღალი სიჩქარით. 4G-სა და 5G-ში უკვე დაწყებული ტენდენციის განვითარებით, შემდგომი, 6G კომუნიკაციები გადავა პერსონალური კომუნიკაციის უფრო მაღალ დონეზე, კერძოდ, საგანთა ინტერნეტის (Internet of Things, IoT) პარადიგმის სრულ რეალიზაციამდე, რომელიც დააკავშირებს არა მხოლოდ ადამიანებს, არამედ კომპიუტერულ რესურსებს, სატრანსპორტო საშუალებებს, მოწყობილობებს, გადამტან საშუალებებს, სენსორებს და რობოტიზებულ აგენტებსაც კი.

5G-მ მნიშვნელოვანი ნაბიჯი გადადგა დაბალი შეყოვნების (Low-Latency) განსაკუთრებული დანიშნულების წვდომის ქსელის განვითარებისკენ, ახალი დამატებითი უსადენო საკომუნიკაციო ტრაქტის ორგანიზებით, რომლის დროსაც გათვალისწინებულ იქნა:

- ახალი სიხშირული დიაპაზონები, როგორიცაა მილიმეტრული ტალღების სიხშირული სპექტრი;
- სიხშირული სპექტრის ახლებური გამოყენება და მართვა ლიცენზირებულ და არალიცენზირებულ ზოლებში ერთდროულად ფუნქციონირებისას;
- საბაზისო ქსელის სრული რედიზაინი.

თუმცა მონაცემებზე ორიენტირებული და ავტომატიზებული პროცესების სწრაფი განვითარება, რომლებიც საჭიროებენ ტბიტი/წმ მონაცემთა სიჩქარეს, შეყოვნებას არაუმეტეს 10^{-3} წამისა და 10^7 შეერთებას 1 კმ^2 -ზე, შეიძლება აღემატებოდეს განვითარებული 5G სისტემების შესაძლებლობებსაც კი.

ამას გარდა, გადაცემის სიჩქარეები, რომლებზეც პრეტენზიას აცხადებს 5G ტექნოლოგია, იქნება რთულად მისაღწევი მსოფლიოს ბევრ ქვეყანაში 5G-ს დანერგვისას გამოყენებული არასათანადო ტექნიკური

მხარდაჭერის გამო. ბევრი ძველი მოწყობილობა 5G-სთვის არ იქნება ვარგისიანი, ანუ ისინი უნდა შეიცვალოს ახლებით, რაც დაჯდება ძვირი; ასევე, ინფრასტრუქტურის განვითარება მოითხოვს დიდ დანახარჯებს და უსაფრთხოებისა და კონფიდენციალურობის საკითხებიც ჯერ არ არის მოგვარებული.

ზემოთ ხსენებულმა პრობლემებმა ბოლო პერიოდის განმავლობაში განაპირობა მკვლევართა მოტივაცია, აქცენტირება მოახდინონ უსადენო ქსელების ახალ თაობაზე, ანუ 6G სისტემაზე, რათა სრულყოფილად დააკმაყოფილონ ინტელექტუალური ციფრული სამყაროს მოთხოვნები. ამ თავის მიზანია იმის წარმოჩენა, თუ რომელ ტექნოლოგიებს შეუძლიათ 6G ქსელების იდენტიფიცირება და უფრო ეფექტური და ვერტიკალურად სპეციფიკური უსადენო ქსელის გადაწყვეტილებების უზრუნველყოფა. კერძოდ, განხილული იქნება მომავლის სრულად დაკავშირებული სისტემების რამდენიმე პოტენციური სცენარი და მათი ძირითადი მოთხოვნების დადგენა მოხდება გამტარუნარიანობის, შეყოვნების, შეერთების რაოდენობრივი მაჩვენებლების და სხვა ფაქტორების გათვალისწინებით. წარმოდგენილი იქნება რამდენიმე შემთხვევა, რომლებიც სცოილდება დღეს არსებული 5G სისტემების მუშაობის პრინციპებს და მოხდება იმის დემონსტრირება, თუ რატომ უნდა ვიფიქროთ 5G-ს შემდგომ გრძელვადიან ევოლუციაზე. წარმოდგენილი ანალიზით შეიძლება ვივარაუდოთ, რომ ამ მოთხოვნების შესასრულებლად საჭირო იქნება რადიკალურად ახალი საკომუნიკაციო ტექნოლოგიები, ქსელის არქიტექტურა და მისი განფენის მოდელები. კერძოდ, ქვემოთ განიხილება:

- ახალი გამრღვევი საკომუნიკაციო ტექნოლოგიები: მიუხედავად იმისა, რომ 5G ქსელები უკვე შექმნილია ძალიან მაღალ სიხშირეებზე მუშაობისთვის (მაგალითად, ახალ რადიოში (New Radio, NR) მილიმეტრული დიაპაზონის ტალღებისათვის), 6G-ს შემოღება ისარგებლოს და მიაღწიოს უპირატესობას კიდევ უფრო მა-

ღალ სიხშირეებზე მომუშავე ტექნოლოგიებით, მაგალითად, ტერაჰერცული და უსადენო ოპტიკური კავშირის საშუალებით.

- ინოვაციური ქსელის არქიტექტურები: მიუხედავად 5G წინსვლისა უფრო ეფექტური ქსელის შექმნის პროცესში, სამომავლო ქსელის პროგრამების ჰეტეროგენობა და 3D ზონაში ზარების საჭიროება მოითხოვს ახალ უფიჭო (Cell-Less) არქიტექტურულ პარადიგმებს, სადაც მომხმარებლის მოწყობილობა (User Equipment, UE) უკავშირდება რადიოწვდომის ქსელს (Radio Access Network, RAN) და არა კონკრეტულ ფიჭას. ისინი დაფუძნებულია სხვადასხვა საკომუნიკაციო ტექნოლოგიების მჭიდრო ინტეგრაციაზე ფრონტჰოლისათვის (Fronthaul) და ბექჰოლისათვის (Backhaul), ასევე ქსელის მოწყობილობების ერთიან სისტემაში გაერთიანებასა და ვირტუალიზაციაზე.
- ქსელში ინტელექტის ინტეგრირება: მოსალოდნელია, რომ 6G შემოიტანს ინტელექტს ცენტრალიზებული კომპიუტერული მოწყობილობებიდან საბოლოო ტერმინალებამდე, რომ ამით უზრუნველყოს განაწილებული სასწავლო მოდელების კონკრეტული განხორციელება, რომლებიც თეორიული თვალსაზრისით უკვე იქნა შესწავლილი 5G კონტექსტში. ზედამხედველობის გარეშე სწავლება (Unsupervised Learning) და ცოდნის გაზიარება (Knowledge Sharing) ხელს შეუწყობს რეალურ დროში ქსელში გააწვევტილებების მიღებას პროგნოზირების გზით.

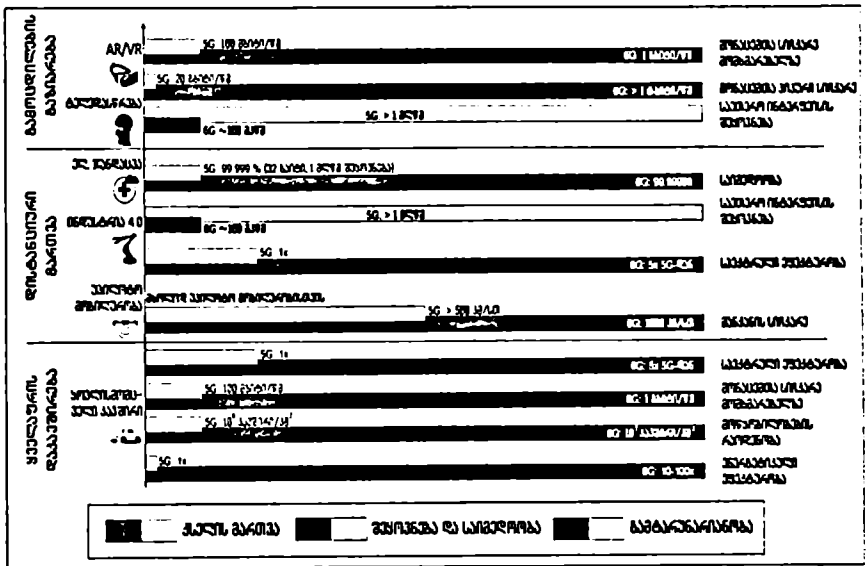
6G კომუნიკაციებთან დაკავშირებულ პუბლიკაციების მსგავსად, ქვემოთ გამოყენებულია მკაფიოდ გამოხატული სისტემური მიდგომა 6G ქსელებთან დაკავშირებული კვლევითი გამოწვევების ანალიზის პროცესში. ეს თავი წარმოგვიდგენს 6G-ს პერსპექტივის სრულმასშტაბიან სურათს სპექტრის გამოყენებასთან, ფიზიკურ წვდომასთან, მედიუმთან წვდომასთან და უფრო მაღალ ფენებთან მიმართებაში, ასევე, ქსელის არქიტექტურასთან და ინტელექტუალურობასთან დაკავშირე-

ბით. შერჩეულია რამდენიმე შესაძლო ინოვაცია, რომლებიც, ჩვენის აზრით, აჩვენებენ მომავალი 6G სისტემების მაღალ პოტენციალს. მიუხედავად იმისა, რომ ზოგიერთი მათგანი, როგორც ჩანს, არის ეტაპობრივი, ჩვენ მიგვაჩნია, რომ გამრღვევი ტექნოლოგიების და არსებული ქსელების ევოლუციის შეთანხმება იმსახურებს იდენტიფიცირდეს როგორც მობილური ქსელების ახალი თაობა და რადგანაც ეს გადაწყვეტილებები არ იყო საფუძვლიანად განხილული, ან ვერ ხერხდება მათი სწორად შეყვანა მიმდინარე 5G-ში სტანდარტების შემუშავების პროცესში, შესაბამისად, არ იქნება 5G-ს კომერციული დანერგვის ნაწილი. ჩვენ ვფიქრობთ, რომ ამ თავში წარმოდგენილი მასალა იქნება განმსაზღვრელი ახალი კომუნიკაციური და ქსელური ტექნოლოგიების შემუშავებისას, რათა 6G-ს განთავსებისას დაკმაყოფილდეს ყველაზე უფრო თამამი მოთხოვნები.

1.3. 6G-ს გამოყენების შემთხვევები

5G წარმოგვიდგენს კომპრომისს შეყოვნებას, ენერგომოხმარებას, დანახარჯებს, აპარატურის რეალიზაციის სირთულეს, გამტარუნარიანობას და პროცესში შემავალ ყველა ელემენტის საიმედოობას შორის. მაგალითად, მობილური ფართოზოლოვანი კავშირის და ულტრა საიმედო და დაბალი შეყოვნების კავშირის მიმართ მოთხოვნები კმაყოფილდება 5G ქსელების განსხვავებული კონფიგურაციებისათვის. 6G, პირიქით, შემუშავებული იქნება ქსელის მიმართ წაყენებული მკაცრი მოთხოვნების ერთობლივად დასაკმაყოფილებლად (მაგალითად, ულტრა მაღალი საიმედოობა და გამტარუნარიანობა, ეფექტურობა და დაბალი შეყოვნება) ჰოლისტიკური (ერთიანი) ფორმით, 2030-იანი წლების ეკონომიკური, სოციალური, ტექნოლოგიური და გარემოს დაცვითი კონტექსტის გათვალისწინებით. წიგნის ამ პარაგრაფში ჩვენ განვიხილავთ გამოყენების სცენარების მახასიათებლებსა და წინასწარ გან-

საზღვრულ მოთხოვნებს, რომლებიც, მათი ზოგადი თვისებრიობისა და ურთიერთშევისების გათვალისწინებით, სავარაუდოდ კარგად წარმოადგენენ სამომავლო 6G სერვისებს. ნახ. 1.2 ასახავს შესაძლო სცენარებზე ყოვლისმომცველ ხედვას, ძირითადი მახასიათებლების ინდიკატორების (Key Performance Indicators, KPIs) მიხედვით.



ნახ. 1.2. KPIs მახასიათებლები 6G ქსელების ვარიანტებისათვის და შესაბამისი გაუმჯობესებები 5G ქსელებთან მიმართებაში

1.3.1. მომეტებული რეალობა და ვირტუალური რეალობა

4G სისტემებმა დასაბამი დაუდო მობილური ქსელებით უსადენო ვიდეო გადაცემებს, რესურსების მოხმარების თვალსაზრისით იმ პერიოდისთვის ერთ-ერთ ყველაზე აუცილებელ აპლიკაციას. სტრიმინგისა და მულტიმედია სერვისების მზარდი გამოყენება ამართლებს ახალი სიხშირული სპექტრის (მაგალითად, მილიმეტრული ტალღების) შეტანას 5G-ში, უფრო მაღალი გამტარუნარიანობის გარანტირების მიზნით.

ბისტვის. ამასთან, ეს მულტიგეგაბიტი წაშში სიჩქარით განპირობებული ახალი შესაძლებლობები იზიდავს ახალ აპლიკაციებს, რომლებიც უფრო დატვირთულია მონაცემებით, ვიდრე ორგანოზომილებიანი მულტიმედიაური კონტენტი: 5G-მ მოახდინა მომატებული/ვირტუალური რეალობის (Augmented/Virtual Reality, AR/VR) ადრეული გამოყენების ინიცირება. მომავალში, ისევე როგორც უსადენო ვიდეო გადაცემებმა მოახდინა 4G ქსელების გაჯერება, ამის მსგავსად, AR/VR აპლიკაციების პროლიფერაცია მთლიანად გამოფიტავს 5G-ს სპექტრს და მოითხოვს სისტემის ისეთ გამტარუნარიანობას, რომელიც აღემატება 1 ტბიტი/წმ-ს, რაც მკვეთრად განსხვავდება 5G-სთვის განსაზღვრულ მიზნობრივი გამტარუნარიანობისაგან, რომელიც არის 20 გბიტი/წმ ასევე შეყოვნებასთან დაკავშირებული მოთხოვნილების დასაკმაყოფილებლად, რაც საშუალებას აძლევს მომხმარებლებებს რეალურ დროში განახორციელონ ურთიერთქმედება იმერსიულ (ჩაძირვად) გარემოში, AR/VR აპლიკაციები შეუძლებელია შეიკუმშონ (კოდირება და დეკოდირება დროის მიხედვით გაჭიანურებული პროცესია); ამრიგად, თითო მომხმარებლისათვის განკუთვნილი მონაცემების გადაცემის სიჩქარე უნდა იყოს დაახლოებით 1 გბიტი/წმ, განსხვავებით უფრო სუსტი 100 მბიტი/წმ 5G სამიზნისაგან.

1.3.2. ჰოლოგრაფიული ტელეპორტაცია (ტელედასწრება)

ადამიანური მოთხოვნილებების ტენდენცია, მოახდინოს დისტანციურად დაკავშირება სულ უფრო და უფრო მზარდი სიზუსტით, 6G ქსელებს უქმნის მნიშვნელოვან საკომუნიკაციო გამოწვევებს. ლიტერატურაში დეტალურად განიხილება მოთხოვნები გადაცემის სიჩქარეზე 3D ჰოლოგრაფიული დისპლეისათვის: დაუმუშავებელ ჰოლოგრამას ყოველგვარი შეკუმშვის გარეშე, ფერებით, სრული პარალექსით და 30 კადრით წაშში დასჭირდება სიჩქარე 4.32 ტბიტი/წმ. ამასთან, შეყოვნ-

ნებაზე მოთხოვნა მილიწამის (მლწმ) ქვემოთაა და საჭირო იქნება ათასობით სინქრონიზებული ხედვის კუთხე, განსხვავებით 5G-ს AR/VR-სგან, რომლისთვისაც საჭიროა რამდენიმე ასეთი მნიშვნელობა. უფრო მეტიც, იმერსიული დისტანციური გამოცდილების სრულად რეალიზაციის მიზნით, ხუთივე ადამიანის გრძნობა განკუთვნილია გაციფრულებისათვის და მომავალი ქსელებით გადაცემისათვის, რაც გაზრდის მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის მიზნობრივ მაჩვენებელს.

1.3.3. ელექტრონული ჯანდაცვა

6G განახორციელებს რევოლუციას ჯანდაცვის სექტორში, აღმოფხვრის დროით და სივრცით ბარიერებს დისტანციური ქირურგიის გზით და უზრუნველყოფს სამუშაო პროცესების ოპტიმიზაციას ჯანმრთელობის დაცვის სფეროში. გარდა მაღალი ღირებულებისა, ამჟამინდელი მთავარი შეზღუდვაა რეალურ დროში ტაქტილური უკუკავშირის არარსებობა. უფრო მეტიც, ელექტრონული ჯანდაცვის სერვისების გავრცელება გამოწვევას შეუქმნის მათი მკაცრი მომსახურების ხარისხის (Quality of Service, QoS) მოთხოვნების შესრულებას, ანუ უწყვეტი კავშირის ხელმისაწვდომობას 99.9999 პროცენტის საიმედოობით, ულტრა დაბალ შეყოვნებას მილიწამს ქვემოთ და მობილურობის მხარდაჭერას. სპექტრის მიმართ გაზრდილი ხელმისაწვდომობა, 6G ქსელების დახვეწილ ინტელექტუალურობასთან ერთად, უზრუნველყოფს მოცემული KPIs მახასიათებლების გარანტირებულად შესრულებას, სპექტრული ეფექტურობის 5-10-ჯერ გაზრდის პირობებში.

1.3.4. ყოვლისმომცველი კავშირი

არსებობს იმის მოლოდინი, რომ მობილური ტრაფიკი დაახლოებით სამჯერ გაიზრდება 2016 წლიდან 2021 წლის ბოლომდე, რაც უკიდურესად გაზრდის მობილური მოწყობილობების რაოდენობას, ანუ

მკიდროდ დასახლებულ ადგილებში გვექნება 10^7 მოწყობილობა 1 კმ^2 -ზე (რაც აღემატება 10^6 მოწყობილობას 5G-ში) და მთელს მსოფლიოში 2030 წლისათვის გვექნება 125 მილიარდზე მეტი მოწყობილობა. 6G დააკავშირებს პერსონალურ მოწყობილობებს, სენსორებს („გონიერი ქალაქების“ პარადიგმის განსახორციელებლად), სატრანსპორტო საშუალებებს და ა.შ. ეს კიდევ უფრო გააძნელებს ისედაც უკვე გადატვირთული ქსელების ფუნქციონირებას, რომლებიც არ უზრუნველყოფენ კავშირს ყველა მოწყობილობაზე, ისე რომ შესრულდეს მოთხოვნები, რომლებიც წარმოდგენილია ნახ. 1.2-ზე. უფრო მეტიც, 6G ქსელები საჭიროებენ ენერგიის უფრო მაღალ ეფექტურობას (10 - 100 -ჯერ მეტს 5G-სთან შედარებით), რათა შესაძლებელი გახდეს მასშტაბური, იაფფასიანი განთავსება გარემოზე მაქსიმალურად დაბალი ზეგავლენით და გაუმჯობესებული დაფარვით. გასათვალისწინებელია ის გარემოებაც, რომ მიუხედავად იმისა, რომ მობილური ტრაფიკის 80% გენერირდება შენობაში, 5G ფიჭური ქსელი, რომელიც ძირითადად განთავსებულია შენობებს გარეთ და შეიძლება მუშაობდეს მილიმეტრულ ტალღათა დიაპაზონში, ძნელად უზრუნველყოფს შიდა დაკავშირებას, რადგან მაღალი სიხშირის რადიოსიგნალები ვერ შეაღწევენ დიელექტრიკულ მასალებში (მაგალითად, ბეტონი). ამის საპირწონედ, 6G ქსელები უზრუნველყოფენ შეუფერხებელ, ყოვლისმომცველ და ყველგან წვდომად კავშირს სხვადასხვა კონტექსტებში, რაც შესაბამისობაში იქნება მომსახურების ხარისხის მკაცრ მოთხოვნებთან შენობებს შიგნით და შენობებს გარეთ ფუნქციონირების სცენარებში, გაცნობიერებული ხარჯებით და მდგრადი ინფრასტრუქტურით.

1.3.5. ინდუსტრია 4.0 და რობოტიკა

როგორც ცნობილია, ინდუსტრია 4.0 წარმოადგენს მეოთხე ინდუსტრიული რევოლუციის შემადგენელ ნაწილს, რომელიც მოიცავს მრავალ

ვალ ახალ სამრეწველო არეალს, როგორცაა, მაგალითად გონიერი ქალაქები. 6G მოახდენს იმ პრინციპების სრულ რეალიზაციას, რომლებიც ჩადებულია ინდუსტრია 4.0-ში (ყოველივე დაიწყო 5G-ით), ანუ წარმოების ციფრული ტრანსფორმაციას კიბერ-ფიზიკური სისტემების და IoT სერვისების საშუალებით. რეალურ ქარხანასა და კიბერ-გამოთვლით სივრცეს შორის საზღვრების გადალახვა საშუალებას მოგვცემს ინტერნეტზე დაფუძნდეს დიაგნოსტიკა, მომსახურება, ექსპლუატაცია და მანქანების პირდაპირი კომუნიკაცია, დანახარჯების მინიმიზაციით, ასევე მოქნილი და ეფექტური გზით. ავტომატიზაციას შემოაქვს საკუთარი მოთხოვნები საიმედო და იზოქრონული კავშირის თვალსაზრისით, რომლის დაკმაყოფილებას 6G მოახერხებს გამრღვევი ტექნოლოგიების პაკეტის საშუალებით, რომელსაც ჩვენ მოგვიანებით აღვწერთ. მაგალითად, ინდუსტრიული მართვა მოითხოვს რეალურ დროში ოპერაციებს, გარანტირებული მიკროწამის (მკწმ) შეყოვნების ჯგუფით და გბიტ/წმ მონაცემების პიკური გადაცემის სიჩქარით AR/VR ინდუსტრიული გამოყენებებისთვის (მაგალითად, ტრენინგისათვის, ინსპექტირებისათვის).

1.3.6. უპილოტო მობილურობა

სრულად ავტონომიური სატრანსპორტო სისტემებისკენ ევოლუცია უზრუნველყოფს უსაფრთხო მოგზაურობას, ტრაფიკის გაუმჯობესებულ მართვასა და ინფოთეინმენტის (საინფორმაციო-გასართობი) სისტემების მხარდაჭერას, რომლის ბაზარი შეადგენს 7 ტრილიონ აშშ დოლარს. სატრანსპორტო საშუალებების ავტონომიური დაკავშირება მოითხოვს უპრეცედენტო დონის საიმედოობას და დაბალ შეყოვნებას (შესაბამისად, 99.99999 პროცენტს ზემოთ და 1 მლწმ-ის ქვემოთ) გადაადგილების ულტრა მაღალი სიჩქარეების სცენარებშიც კი (1000 კმ/სთ-მდე), რათა უზრუნველყოფილი იქნას მგზავრების გარანტირებული

უსაფრთხოება. ყოველივე ეს ძნელია დაკმაყოფილდეს არსებული ტექნოლოგიებით. უფრო მეტიც, სენსორების მზარდი რიცხვი მოითხოვს სატრანსპორტო საშუალებებში მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის გაზრდას (ტერაბიტებით, რომელიც გენერირდება მოძრაობის პერიოდის ერთი საათის განმავლობაში), ქსელის არსებული გამტარუნარიანობის ზემოთ. გარდა ამისა, მფრინავი მანქანები (მაგალითად, დრონები) წარმოადგენენ უზარმაზარ პოტენციალს სხვადასხვა სცენარისთვის, მაგალითად, მშენებლობა, პირველი რეაგირება და ა.შ. დრონების ჯგუფებს დასჭირდებათ გაუმჯობესებული გამტარუნარიანობა ინტერნეტის კავშირის გაფართოებისთვის. ამ პერსპექტივაში 6G გააგრძელებს წინა თაობების გზას, რათა მოხდეს დაკავშირება სატრანსპორტო საშუალებებთან ტექნიკის, პროგრამული უზრუნველყოფის და კომუნიკაციების დარგში ახალი მიდწევების გამოყენებით, რომლებსაც მოგვიანებით შევხვებით. ვარიანტების ასეთი მრავალფეროვნება 6G პარადიგმის უნიკალური მახასიათებელია, რომლის პოტენციალი სრულად გაიხსნება მხოლოდ ტექნოლოგიური წინსვლისა და ახალი ქსელის დიზაინის მეშვეობით, როგორც ეს აღწერილია ამ თავის შემდეგ პარაგრაფში.

1.4. 6G-ს შესაძლებლობების მარეალიზებელი ტექნოლოგიები

ამ პარაგრაფში ჩვენ წარმოვადგენთ ტექნოლოგიებს, რომლებიც სწრაფად ვითარდება, როგორც 6G-ს მარეალიზებელი ტექნოლოგიები, რათა უზრუნველყოფილი იქნას KPIs-ს შესაძლებლობები. ცხრილი 1.1 აჯამებს თითოეული შემოთავაზებული ტექნოლოგიური ინოვაციის პოტენციალსა და გამოწვევებს და მიუთითებს, თუ 5G-სთვის ადრე წარმოდგენილი გამოყენების რომელ შემთხვევებს აზოგადებენ და აფართოებენ ისინი. მიუხედავად იმისა, რომ ზოგიერთი ეს ინოვაცია

ადრე უკვე განიხილულ იყო 5G-ს კონტექსტში, ისინი მიზანმიმართულად იქნა ამოღებული 5G სტანდარტების ადრეული განვითარების ეტაპზე, ანუ მესამე თაობის პარტნიორობის პროექტის (Third Generation Partnership Project, 3GPP) მე-15 და მე-16 გამოშვებებიდან (Release) და, სავარაუდოდ, არ განხორციელდება კომერციულ 5G განთავსებებში, ტექნოლოგიური შეზღუდვების გამო ან იმის გამო, რომ ბაზრები არ არიან საკმარისად მომწიფებულები მათ მხარდასაჭერად.

[illegible]

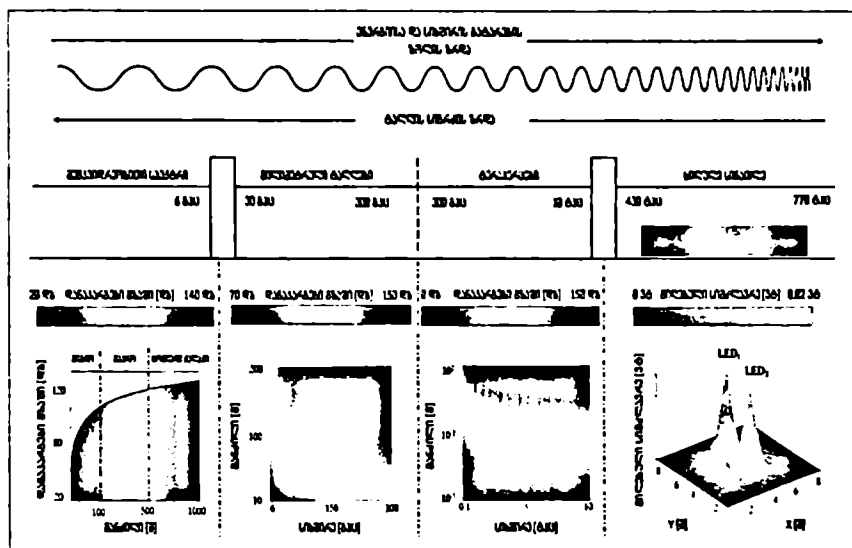
ცხრილი 1.1. 6G მარეალიზებული ტექნოლოგიების და შესაბამისი გამოყენების შემთხვევების შედარება

ჩვენ განვიხილავთ გარღვევებს (მიღწევებს), ფიზიკური ფენის დონეზე, ახალ არქიტექტურულ და პროტოკოლურ გადაწყვეტილებებს და ბოლოს, ხელოვნური ინტელექტის პერსპექტიულ გამოყენებებს 6G-ში.

1.4.1. გამრღვევი საკომუნიკაციო ტექნოლოგიები

მობილური ქსელების ახალი თაობა ზოგადად ხასიათდება ნოვატორული საკომუნიკაციო ტექნოლოგიების ერთობლიობით, რომლებიც უზრუნველყოფენ უპრეცედენტოდ გაუმჯობესებულ მახასიათებლებს (მაგალითად, მონაცემთა გადაცემის ხელმისაწვდომი სიჩქარისა და შეყოვნების თვალსაზრისით) და შესაძლებლობებს. ცნობილია, რომ მასიური, მრავალშესასვლელიანი და მრავალგამოსასვლელიანი (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) სისტემები და კომუნიკაციები მილიმეტრული ტალღების დიაპაზონში, წარმოადგენენ მნიშვნელოვან ფაქტორებს 5G ქსელების აგების პროცესში. ამ თავის წინა ნაწილში აღწერილი მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად, სავარაუდოდ, 6G ქსელები უნდა დაეყრდნოს მობილურ სისტემებში ჩვეულებრივად გამოყენებულ სიხშირულ სპექტრს (მაგალითად, 6 გჰც-ს ქვემოთ და მილიმეტრული ტალღების დიაპაზონს) და ასევე, სიხშირულ ზოლებს, რომლებიც აქამდე არ იყო გათვალისწინებული ფიჭური სტანდარტებისთვის, კერძოდ, ტერაჰერცულ სიხშირულ ზოლს და დიაპაზონს, სადაც ხორციელდება ხილული სინათლის კომუნიკაცია (Visible Light Communication, VLC). ნახ. 1.3 გვიჩვენებს ამ ზოლებისათვის ტრასებზე დანაკარგებს ტიპური განთავსების სცენარებში, რათა აღინიშნოს ის განსხვავებები და შესაძლებლობები, რომელთა გამოყენებით შესაძლებელია სპექტრის თითოეული ამ ნაწილის ექსპლუატაცია. 6 გჰც-ს ქვემოთ და მილიმეტრული ტალღებისათვის გზაში დანაკარგები წარმოდგენილია 3GPP მოდელების მიხედვით, როგორც პირდაპირი ხედვის (Line-of-Sight, LoS), ასევე არაპირდაპირი ხედვის (Non-LoS, NLoS) პირობებისათვის მაშინ, როდესაც მხოლოდ LoS განიხილება ტერაჰერცებისა და VLC შემთხვევებისათვის. ქვემოთ, ჩვენ თავდაპირველად ყურადღებას გავამახვილებთ ამ ორ ახალ სიხშირულ დიაპაზონზე, რომლებიც უნდა გამოყენებული იქნას 6G-ში.

ტერაჰერცული კავშირი: ასეთ შემთხვევაში, ფუნქციონირება ხორციელდება 100 გჰც-დან 10 ტჰც-მდე და მილიმეტრულ ტალღებთან შედარებით მაქსიმალურად იზრდება მაღალ სიხშირეებზე დაკავშირების პოტენციალი, რაც უზრუნველყოფს ასობით გბიტ/წმ მონაცემთა გადაცემის სიჩქარეებს, 6G-ს ყველაზე თამამი მოთხოვნების შესაბამისად.



ნახ. 1.3. გზაში დანაკარგები 6 გჰც-ს ქვემოთ, მილიმეტრული ტალღების და ტერაჰერცული სიხშირეების დიაპაზონისათვის და მიღებული სიმძლავრე VLC-სთვის. 6 გჰც-ს ქვემოთ და მილიმეტრული ტალღებისათვის, გზაში დანაკარგები წარმოდგენილია 3GPP მოდელების მიხედვით, როგორც LoS, ასევე NLoS პირობებისათვის, მაშინ როდესაც მხოლოდ LoS განიხილება ტერაჰერცებისა და VLC შემთხვევებისათვის

მეორეს მხრივ, ძირითადი პრობლემები, რომლებიც ჯერჯერობით ხელს უშლიან კომერციულ სისტემებში ტერაჰერცებში კავშირების დამყარებას, ესენი არიან დანაკარგები გავრცელებისას, მოლეკულური შთანთქმა, შეღწევადობის მაღალი დანაკარგები, ანტენების და რადიო-

სიხშირული (Radiofrequency, RF) წრედების დიზაინის პროცესში საინჟინრო გამოწვევები. რაც შეეხება მილიმეტრულ ტალღებს, აქ შეიძლება დანაკარგები ანაზღაურდეს მიმართული საანტენო მესრების გამოყენებით და ასევე შესაძლებელია სივრცითი მულტიპლექსირების მეთოდების გამოყენება შეზღუდული ინტერფერენციებით. გარდა ამისა, ტერაჰერცული კომუნიკაციის მახასიათებლები შეიძლება მაქსიმალურად იქნას გაუმჯობესებული, თუ ოპერირება მოხდება ისეთ სიხშირულ ზოლებში, რომლებიც არ არიან მოლეკულური შთანთქმის მკვეთრი ზეგავლენის ქვეშ, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 1.3-ზე; დაბოლოს, ასეთი მაღალი სიხშირეები, როდესაც ფუნქციონირება შემოიფარგლება მხოლოდ შენობების შიდა სცენარებით, საშუალებას იძლევიან შემუშავდეს ახალი ტიპის ულტრა მცირე ელექტრონული შეფუთვის გადაწყვეტილებები, RF წრედებისა და ანტენების სქემებისთვის.

VLC: ისინი შემოთავაზებულ იქნა, რათა შეეცნოთ RF კომუნიკაციები, იაფფასიანი სინათლის გამსხივებელი დიოდების (Light-Emitting Diode, LED) ფართო დანერგვით. ამ მოწყობილობებს შეუძლიათ სწრაფად გადაერთონ სინათლის სხვადასხვა ინტენსივობებზე, რათა მოხდეს სიგნალის მოდულირება, რომელიც ამის შემდგომ შეიძლება გადაეცეს შესაბამის მიმღებს. ექსპერიმენტული პლატფორმების დაბალი ღირებულების წყალობით, VLC კვლევები უფრო დიდი ხნის წინაა დაწყებული, ვიდრე კვლევები ტერაჰერცულ კომუნიკაციებზე. როგორც ნახ. 1.3-ზე არის ნაჩვენები, VLC-ს აქვს შეზღუდული დაფარვის დიაპაზონი, საჭიროებს ილუმინაციის წყაროს, მასზე ზემოქმედებას ახდენს და იწვევს ხმაურის მსგავს ხელშეშლას სხვა სინათლის წყარო (მაგალითად, მზის). ამგვარად, ის შეიძლება უმეტესად გამოყენებულ იქნას შენობებს შიგნით და ასეთმა ტექნოლოგიებმა უნდა შეავსონ RF კავშირები. შესაბამისად, VLC შეიძლება გამოყენებულ იქნას შენობის შიგნითა ფიჭური დაფარვის სცენარებში, რაც, როგორც უკვე აღვნიშნეთ, არის

გამოყენების ისეთი შემთხვევა, რომელიც ჯერჯერობით არ არის გათვალისწინებული ფიჭური სტანდარტებით.

მიუხედავად იმისა, რომ სტანდარტიზაციის ორგანოები, მათ შორის ელექტრო და ელექტრონიკის ინჟინრების ინსტიტუტთან (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) არსებული სტანდარტების ასოციაცია, ხელს უწყობენ კვლევის მიმართულებებს, რომლებიც ორიენტირებულია მომავალი უსადენო სისტემებისთვის ტერაჰერცულ (IEEE 802.15.3d) და VLC (IEEE 802.15.7) გადაწყვეტილებების შემუშავებაზე, ეს ტექნოლოგიები ჯერ კიდევ არ შედის ფიჭური ქსელის სტანდარტში და იქნება სამიზნე 5G ვარიანტების გამოყენების შემთხვევების მიღმა. უფრო მეტიც, დამატებითი კვლევების ჩატარებაა საჭირო, რომ საშუალება მიეცეს 6G მობილურ მომხმარებლებს, რათა მუშაობდნენ ტერაჰერცულ და VLC სპექტრებში. ასეთი კვლევები მოიცავენ ახალ აპარატურასა და ალგორითმებს, რომლებიც შესაძლებელს გახდის მოქნილ მრავალსიხვიან მიღებას და ამ პროცესისათვის თვალყურის დევნებას NLoS გარემოში.

გარდა ახალი სპექტრისა, 6G ასევე მოახდენს უსადენო ქსელების გარდაქმნას ისეთი ტექნოლოგიების გამოყენებით, რომელთა რეალიზაციაც შესაძლებელი გახდა ბოლოდროინდელი ფიზიკური ფენებისა და მიკროსქემების კვლევების საფუძველზე, მაგრამ ისინი არ წარმოადგენენ 5G-ს შემადგენელ ნაწილს. ქვემოთ მოყვანილია ძირითადი ფაქტორები, რომლებიც ხელს შეუწყობენ 6G-ს განვითარებას.

სრული დუპლექსით კომუნიკაცია: იმის წყალობით, რომ სრულყოფილად იქნება შემუშავებული ინტერფერენციების თვითჩამხშობი სქემები, სრული დუპლექსით კომუნიკაციის პროცესში გადამცემ-მიმღებ მოწყობილობებს შეეძლებათ მიიღონ სიგნალი გადამცემის პროცესში. პრაქტიკული კუთხით სრულფასოვანი სრული დუპლექსის სისტემების განთავსება მოითხოვს სიახლეებს ანტენებისა და მიკროსქემების

დიზაინში, რათა უსადენო მოწყობილობებში შემცირდეს გადამცემის და მიმღების წრედებს შორის ჯვარედინი გადასვლები; ამრიგად, ისინი არ შედიან ფიჭური ქსელის მიმდინარე სპეციფიკაციებში. სამომავლო ტექნოლოგიური სრულყოფა საშუალებას მოგვცემს მოხდეს ერთდროული გადაცემა კავშირის აპლინკსა (Uplink, UL) და დაუნლინკში (Downlink, DL), რათა გაიზარდოს მულტიპლექსირების შესაძლებლობები და სისტემის მთლიანი გამტარუნარიანობა, დამატებითი სიხშირული ზოლის გამოყენების გარეშე. ამის მიუხედავად, 6G ქსელებს სრული დუბლექსის პროცედურებისა და განთავსების შემუშავებისას დასჭირდებათ (ა) – სკრუპულოზური დაგეგმარება, რათა თავიდან იქნას აცილებული ინტერფერენციები და (ბ) – რესურსების დაგეგმვისა და განაწილების ახალი პროექტები.

არხის შეფასების ახალი მეთოდები (მაგალითად, ზოლს გარეთა შეფასება და კომპრესირებული ზონდირება): მიმართული კავშირისათვის არხის შეფასება იქნება კომუნიკაციების ძირითადი კომპონენტი მილიმეტრული ტალღების და ტერაჰერცული სიხშირეებისათვის. ამასთან, ძნელია შემუშავდეს მიმართული კავშირის ეფექტური პროცედურები, მრავალი სიხშირული დიაპაზონის გამოყენების გათვალისწინებით და, შესაბამისად, სიხშირის გატარების ძალიან დიდი ზოლისათვის. აქედან გამომდინარე, 6G სისტემებს დასჭირდებათ არხის შეფასების ახალი მეთოდების შემუშავება. ზოლს გარეთა შეფასებამ (მაგალითად, სიგნალის შემოსვლისას მისი კუთხური მიმართულებისათვის) შეიძლება გააუმჯობესოს სხივის მართვის რეაქტიულობა და ეს შესაძლებელია განხორციელდეს 6 გჰც-ს ქვევით არსებული სიგნალების ყველა მიმართულებით გავრცელების ასახვით მილიმეტრული ტალღების სიხშირეების არხის შეფასებაში. ანალოგიურად, როდესაც მხედველობაში ვიდებთ მილიმეტრული ტალღების და ტერაჰერცული სიხშირეების შესაბამისი არხებისათვის კუთხური მიმართულებების

გამეჩხერებას, შესაძლებელია, არხის შეფასების მიზნით, კომპრესირებული ზონდირების გამოყენება ანათვლების შემცირებული რაოდენობით.

ზონდირება და ქსელზე დაფუძნებული ლოკალიზაცია. RF სიგნალების გამოყენება ერთდროული ლოკალიზაციისა და ასახვის გასააქტიურებლად დღეისათვის ფართოდ არის გამოყენებული, მაგრამ ასეთი შესაძლებლობები არასდროს ყოფილა ღრმად ინტეგრირებული ფიჭური ქსელების ოპერაციებთან და პროტოკოლებთან. 6G ქსელები, მართვის ოპერაციების გასაუმჯობესებლად, გამოიყენებენ გაერთიანებულ ინტერფეისს ლოკალიზაციისა და კომუნიკაციისთვის, რომელსაც შეუძლია დაეყრდნოს კონტექსტურ ინფორმაციას სხივების მიმართულების დიაგრამის ნიმუშების დასადგენად, ხელშეშლების შესამცირებლად, ჰენდოვერების პროგნოზირებისათვის და ინოვაციური სამომხმარებლო სერვისების შესათავაზებლად (მაგალითად, სატრანსპორტო საშუალებების და ელექტრონული ჯანდაცვის გამოყენებებისათვის).

1.4.2. ინოვაციური ქსელური არქიტექტურა

წინა პარაგრაფში აღწერილი გამრღვევი საკომუნიკაციო ტექნოლოგიები საშუალებას მოგვცემენ შევექმნათ 6G ქსელის ახალი არქიტექტურა, მაგრამ ისინი ასევე საჭიროებენ სტრუქტურულ განახლებებს მობილური ქსელის მიმდინარე დიზაინებთან მიმართებაში. მაგალითად, ტერაჰერცული კომუნიკაციების სიმჭიდროვე და მონაცემებთან დაშვების სიჩქარის მაღალი მაჩვენებელი გაზრდის ძირეულ სატრანსპორტო ქსელზე გამტარუნარიანობის მოთხოვნებს, რომელმაც უნდა უზრუნველყოს ოპტიკურ-ბოჭკოზე წვდომის უფრო მეტი წერტილები და უფრო მაღალი გამტარუნარიანობა, ვიდრე ეს გააჩნიათ დღევანდელ ბექჰოლის ქსელებს. უფრო მეტიც, სხვადასხვა საკომუნიკაციო ტექნოლოგიების ფართო სპექტრი გაზრდის ქსელის ჰეტეროგენობას, რომლის

დოკუმენტის მიერ შექმნილი ზედნადები სასიგნალო ხარჯების გარეშე (რაც შეიძლება ხშირი იყოს ტერაჰერცულ სიხშირეებზე სისტემების ფუნქციონირების დროს) და უზრუნველყოფენ QoS-ის ისეთ მახასიათებლებს, რომლებიც შესაბამისობაში იქნება 6G-სთვის გათვალისწინებულ ყველაზე რთული მობილურობის მოთხოვნებთან, როგორც ეს გვაქვს სატრანსპორტო სცენარებში. მოწყობილობებს შეეძლება შეუფერხებელი გადასვლა სხვადასხვა ჰეტეროგენულ ლინკებს შორის (მაგალითად, 6 გჰც-ს ქვემოთ, მილიმეტრული ტალღები, ტერაჰერცები და VLC), ხელოვნური ჩარევის ან კონფიგურაციის შეცვლის გარეშე. დაბოლოს, კონკრეტული გამოყენების შემთხვევის შესაბამისად, მომხმარებელს ასევე შეეძლება ერთდროულად გამოიყენოს ქსელის სხვადასხვა ინტერფეისი, მათი დამატებითი მახასიათებლების ათვისების მიზნით, მაგალითად, 6 გჰც-ს ქვემოთ განთავსებული სიხშირეები მართვისათვის და ტერაჰერცული ლინკი მონაცემთა დამუშავებისა და გადაცემისათვის.

3D ქსელის არქიტექტურა: 5G ქსელები (და წინა თაობები) შექმნილია იმისთვის, რომ უზრუნველყონ კავშირი ძირითადად 2D სივრცისთვის, ანუ ქსელის წვდომის წერტილები განლაგებულია დედამიწაზე განთავსებული მოწყობილობების კავშირის დასამყარებლად. ამის საპირისპიროდ, მომავალში იგეგმება 6G ჰეტეროგენული არქიტექტურა 3D დაფარვის უზრუნველსაყოფად, რაც შეავსებს მიწისზედა ინფრასტრუქტურებს არა მიწისზედა პლატფორმებით (მაგალითად, დრონები, საჰაერო ბურთები და თანამგზავრები). უფრო მეტიც, ამ ელემენტების სწრაფად განთავსებით შესაძლებელი გახდება შეუფერხებელი მომსახურების უწყვეტობის და საიმედოობის უზრუნველყოფა, მაგალითად, სოფლად ან სხვადასხვა ღონისძიებების დროს, თანაც, თავიდან იქნება აცილებული დანახარჯები მუდმივად მომუშავე ფიქსირებული ინფრასტრუქტურის ექსპლუატაციაზე და მართვაზე. მიუხედა-

ვად ასეთი პერსპექტიული შესაძლებლობებისა, არსებობს მრავალი გამოწვევა, რომლებიც უნდა მოგვარდეს სანამ მოხდება მფრინავი პლატფორმების ეფექტურად გამოიყენება უსადენო ქსელებში, მაგალითად, „ჰაერი-დედამიწა“ არხის მოდელირება, ტოპოლოგიისა და ტრაექტორიის ოპტიმიზაცია, რესურსების მართვა და ენერგოეფექტურობა.

ქსელური აღჭურვილობის დაწვრილერთეულება და ვირტუალიზაცია: მიუხედავად იმისა, რომ უკანასკნელ პერიოდში ქსელებმა დაიწყეს გადასვლა ერთ დროს მონოლითური ქსელის მოწყობილობების დაწვრილერთეულებაზე, 3GPP პირდაპირ არ აკონკრეტებს, თუ როგორ უნდა დანერგოს ვირტუალიზაციის ელემენტები. უფრო მეტიც, მიმდინარე 5G კვლევებმა ჯერ კიდევ არ მოიხსენია ის გამოწვევები, რომლებიც დაკავშირებულია დაწვრილერთეულებული არქიტექტურის დიზაინთან, რომელიც შეიძლება ფუნქციონირებდეს შეყოვნებაზე უფრო მაღალი კონტროლის პირობებში (რომელიც შეიძლება შემოტანილ იქნას ცენტრალიზაციით) და ქსელის ვირტუალიზებული ფუნქციების უსაფრთხოება, რომელიც შეიძლება დაექვემდებაროს კიბერ-შეტევებს. 6G ქსელები მიიყვანს დაწვრილერთეულების პროცესს უკიდურეს მდგომარეობამდე MAC და PHY ფენების კომპონენტების ვირტუალიზაციით, რომლებიც ამჟამად საჭიროებენ სპეციალურ აპარატურულ იმპლემენტაციას და იაფი განაწილებული პლატფორმების რეალიზაციას მხოლოდ ანტენებით და მინიმალური დამუშავებით. ეს შეამცირებს ქსელის აღჭურვილობის ღირებულებას და ეკონომიკურად შესაძლებელს გახდის ქსელის მასობრივად მჭიდრო განლაგების დანერგვას.

ფრონტჰოლის და ბექჰოლის გაუმჯობესებული ინტეგრაცია: 6G ფრონტჰოლის ტექნოლოგიებით უზრუნველყოფილი მონაცემთა გადაცემის უზარმაზარი მაჩვენებლები მოითხოვს ბექჰოლის გამტარუნარიანობის ადეკვატურ ზრდას. უფრო მეტიც, ტერაპერცული და VLC განთავსება გაზრდის წვდომის წერტილების სიმჭიდროვეს, რომლებ-

საც ესაჭიროებათ ბექჰოლის კავშირები მეზობლებთან და ძირითად ქსელთან. 6G ტექნოლოგიების უზარმაზარი შესაძლებლობები შეიძლება იქნას გამოყენებული თვითრეგულაციური გადაწყვეტილებებისთვის, სადაც საბაზო სადგურებში არსებული რადიოები უზრუნველყოფენ როგორც ფრონტჰოლს, ასევე ბექჰოლს. მიუხედავად იმისა, რომ მსგავსი ვარიანტი უკვე განიხილებოდა 5G-სთვის, 6G განლაგების მასშტაბები შემოიტანს ახალ გამოწვევებს და შესაძლებლობებს; მაგალითად, ქსელებს დასჭირდებათ ავტონომიური კონფიგურაციის უფრო მაღალი შესაძლებლობები.

ენერგიის შეგროვების სტრატეგიები დაბალი ენერგიის მოხმარების ქსელის ოპერაციებისთვის: ენერგიის შეგროვების მექანიზმების 5G ინფრასტრუქტურაში გაერთიანება დღეისათვის რამდენიმე პრობლემის წინაშე დგას; მათ შორისაა არსებულ კომუნიკაციებთან თანაცხოვრება და ეფექტურობის დაკარგვა შეგროვილი სიგნალების ელექტრულ დენში გადატანისას. 6G ქსელების მოსალოდნელი მასშტაბის გათვალისწინებით, აუცილებელია სისტემების დაპროექტება, სადაც წრედები და საკომუნიკაციო სტეკი შემუშავებულია ენერგეტიკული საჭიროებების გათვალისწინებით. ერთი ვარიანტია ენერგიის შეგროვების წრედების გამოყენება, რათა მოწყობილობებს ჰქონდეთ ავტონომიური კვება, რასაც შეიძლება ჰქონდეს გადამწყვეტი მნიშვნელობა, მაგალითად, ავტონომიური ოპერაციების უზრუნველსაყოფად, დიდი ხანგრძლივობით ფუნქციონირებადი IoT მოწყობილობებისა და სენსორებისათვის, ან ხანგრძლივი ლოდინის ინტერვალების მქონე იშვიათად გამოყენებადი მოწყობილობებისა და აღჭურვილობისათვის.

1.4.3. ინტელექტის ინტეგრირება ქსელში

6G საკომუნიკაციო ტექნოლოგიების დანერგვის და ქსელის განთავსების სირთულე, ალბათ თავიდან აგვაცილებს დახურული ფორმით

და ხელით განხორციელებულ ოპტიმიზაციას. მიუხედავად იმისა, რომ ფიჭურ ქსელებში ინტელექტუალური მეთოდები უკვე განიხილებოდა 5G-სთვის, არსებობს მოლოდინი, რომ 6G განთავსებები იქნება უფრო მჭიდრო (წვდომის წერტილების და მომხმარებლების რაოდენობის თვალსაზრისით) და უფრო პეტეროგენული (სხვადასხვა ტექნოლოგიების ინტეგრაციის თვალსაზრისით და გამოყენების მახასიათებლების გათვალისწინებით); ასევე მათ ექნებათ შესრულების კუთხით უფრო მკაცრი მოთხოვნები 5G-სთან შედარებით. ამგვარად, ინტელექტი უფრო მნიშვნელოვან როლს შეასრულებს ქსელში და გასცდება კლასიფიკაციისა და პროგნოზირების ამოცანებს, რომლებიც განიხილება 5G სისტემებისთვის. მოსალოდნელია, რომ სტანდარტმა შეიძლება არ მიუთითოს ის ტექნიკა და სწავლების სტრატეგიები, რომლებიც ჩაინერგება ამ ქსელებში, მაგრამ მონაცემებზე ორიენტირებული მიდგომები შეიძლება ჩაითვალოს როგორც საშუალებები, რომლებსაც ქსელური ვენდორები და ოპერატორები გამოიყენებენ 6G მოთხოვნების შესასრულებლად. კერძოდ, 6G კვლევა ორიენტირებული იქნება შემდეგ ასპექტებზე:

სწავლების მეთოდები მონაცემთა შერჩევისა და მახასიათებლების მოპოვებისათვის: მომავალი დაკავშირებული მოწყობილობების მიერ გენერირებული მონაცემების დიდი მოცულობა (მაგალითად, სენსორები ავტონომიურ სატრანსპორტო საშუალებებში) დატვირთვას შეუქმნის საკომუნიკაციო ტექნოლოგიებს, რომლებიც ვერ უზრუნველყოფენ მომსახურების საჭირო ხარისხს. ამრიგად, ფუნდამენტურია ინფორმაციის მნიშვნელობის განსხვავებების დადგენა მაქსიმალური სარგებლობის მისაღწევად საბოლოო მომხმარებლებისთვის შეზღუდული ქსელის რესურსებით. ამ კონტექსტში, მანქანური სწავლების (Machine Learning, ML) სტრატეგიებს შეუძლიათ შეაფასონ დაკვირვებებში კორელაციის ხარისხი, ან ამოიღონ მახასიათებლები შემავალი

ვექტორებიდან და იწინასწარმეტყველონ შესაბამისი მიმდევრობის აპოსტერიორული ალბათობა, მისი მთელი ისტორიის გათვალისწინებით. უფრო მეტიც, 6G-ში, ზედამხედველობის გარეშე და გაძლიერებული სწავლების მიდგომები არ საჭიროებენ ეტიკეტირებას და მათი გამოყენება ქსელის ფუნქციონირებისთვის შეიძლება სრულად ავტონომიურ რეჟიმში.

მომხმარებელთა შორის და ოპერატორებს შორის ცოდნის გაზიარება: სპექტრის და ინფრასტრუქტურის გაზიარება სასარგებლოა ფიჭურ ქსელებში, მულტიპლექსირების შესაძლებლობების მაქსიმალურად გაზრდის მიზნით. სწავლაზე ორიენტირებული ქსელებით, ოპერატორებსა და მომხმარებლებს ასევე შეუძლიათ გააზიარონ კონკრეტული ქსელის განლაგების სწავლება/დამუშავების რეპრეზენტაციები ან/და გამოყენების შემთხვევები (მაგალითად, შეუძლიათ ქსელური კონფიგურაციის დაჩქარება ახალ ბაზრებზე), ან უკეთესად მოერგონ ახალ მოულოდნელ ოპერაციულ სცენარებს. 6G-ში შეისწავლება გაცვლითი თანაფარდობები შეყოვნებაში, ელექტროენერგიის მოხმარებაში, სისტემის ზედნადებ სიგნალურ დანახარჯებში და ღირებულებაში, როგორც ადგილობრივი, ისე ღრუბლოვანი/პერიფერიული მეთოდების დახმარებით, რაც აისახება მიღებულ გადაწყვეტილებებში.

მომხმარებელზე ორიენტირებული ქსელური არქიტექტურა: ML-ის მიერ მართული ქსელები იმყოფება ჯერ კიდევ საწყის ეტაპზე, მაგრამ ეს იქნება რთული 6G სისტემების ფუნდამენტური კომპონენტი, რომელიც ითვალისწინებს განაწილებულ ხელოვნურ ინტელექტს, მომხმარებელზე სრულად ორიენტირებული ქსელის არქიტექტურის განსახორციელებლად. ამ გზით, საბოლოო ტერმინალებს შეეძლებათ მიიღონ ავტონომიური ქსელური გადაწყვეტილებები, წინა ოპერაციების შედეგების საფუძველზე, ზედნადები სიგნალური დანახარჯების გამოყენების გარეშე კომუნიკაციისას ცენტრალიზებული მართვადი მოწ-

ყობილობებისაკენ ან ამ მოწყობილობებიდან. გამანაწილებელ მეთოდებს შეეძლება ML ალგორითმების დამუშავება რეალურ დროში, ანუ 1 მლწმ-ზე ნაკლები შეყოვნებით, როგორც ეს მოთხოვნილია ზოგიერთი 6G სერვისით, რითაც უზრუნველყოფილი იქნება ქსელების უფრო ოპერატიული და პასუხისმგებლიანი მართვა.

1.5. პირველი თავის დასკვნები

ჩვენ განვიხილეთ გამოყენების ის შემთხვევები და ტექნოლოგიები, რომლებიც სატელეკომუნიკაციო სფეროს მრავალი მკვლევარის აზრით, დამახასიათებელი იქნება 6G ქსელებისათვის. ცხრილი 1.1 აჯამებს ძირითადი გამოწვევებს, პოტენციალს და თითოეული მხარდამჭერი ტექნოლოგიის გამოყენების ვარიანტებს. 6G უსადენო კომუნიკაციების კვლევამ შეიძლება ბოლო მოუღოს ფიჭური ქსელების ტრადიციულ პარადიგმებს, რომლებიც ჯერ კიდევ არსებობენ 5G-ში. მაგალითად, მხარდამჭერილი იქნება ტერაჰერცული და ხილული სინათლის სიხშირული სპექტრების გამოყენება, ასევე, უფიჭო და საჰაერო არქიტექტურა, დაინერგება მასიურად განაწილებული ხელოვნური ინტელექტი. თუმცა, აქვე უნდა აღინიშნოს, რომ ეს და მსგავსი ახალი ტექნოლოგიები ჯერჯერობით არ არიან მზად ბაზარზე განსათავსებლად. შესაბამისად, უსადენო საკომუნიკაციო სისტემების კვლევით დაკავებული საზოგადოებისათვის, წარმოიქმნება უნიკალურ შესაძლებლობა ხელი შეუწყოს ინოვაციებს, რომლებიც დასაბამს დაუდებს ციფრული კომუნიკაციების დღეისათვის ძნელად წარმოსადგენ გამოყენების შემთხვევებს საზოგადოებისათვის 2030-ში და შემდგომ პერიოდში.

პირველი თავში გამოყენებული ლიტერატურა

- A. Ali *et al.*, "Millimeter Wave Beam Selection Using Out-of-Band Spatial Information", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 2, Feb. 2018, pp. 1038-52.
- E. Calvanese Strinati *et al.*, "6G: The Next Frontier", *IEEE Vehic. Tech. Mag.*, vol. 14, no. 3, Sept. 2019, pp. 42-50.
- J. Choi *et al.*, "Millimeter-Wave Vehicular Communication to Support Massive Automotive Sensing", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 12, Dec. 2016, pp. 160-67.
- M. Giordani *et al.*, "Towards 6G Networks: Use Cases and Technologies," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 3, Mar. 2020, pp. 55-61.
- S. Goyal *et al.*, "Full Duplex Cellular Systems: Will Doubling Interference Prevent Doubling Capacity?" *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 5, May 2015, pp. 121-27.
- J. M. Jornet *et al.*, "Channel Modeling and Capacity Analysis for Electromagnetic Wireless Nanonetworks in the Terahertz Band", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 10, Oct. 2011, pp. 3211-21.
- T. Komine *et al.*, "Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System Using LED Lights", *IEEE Trans. Consumer Electron.*, vol. 50, no. 1, Feb. 2004, pp. 100-07.
- J. Lee *et al.*, "A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems", *Manufacturing Letters*, vol. 3, Jan. 2015, pp. 18-23.
- N. Lu *et al.*, "Connected Vehicles: Solutions and Challenges", *IEEE Internet of Things J.*, vol. 1, no. 4, Aug. 2014, pp. 289-99.

- P. H. Pathak *et al.*, "Visible Light Communication, Networking, and Sensing: A Survey, Potential and Challenges", *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, 4th qtr. 2015, pp. 2047-77.
- W. Saad *et al.*, "A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems", *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, May/Jun. 2020, pp. 134-142.
- M. Wang *et al.*, "Machine Learning for Networking: Workflow, Advances, and Opportunities", *IEEE Network*, vol. 32, no. 2, Mar. 2018, pp. 92-99.
- M. Wollschlaeger *et al.*, "The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0", *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 11, no. 1, Mar. 2017, pp. 17-27.
- X. Xu *et al.*, "3D Holographic Display and Its Data Transmission Requirement", *Proc. Int'l Conf. Info. Photonics and Optical Commun.*, Oct. 2011, pp. 1-4.
- Q. Zhang *et al.*, "Towards 5G Enabled Tactile Robotic Telesurgery", arXiv preprint arXiv:1803.03586, 2018.
- Z. Zhang *et al.*, "6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies", *IEEE Vehic. Tech. Mag.*, vol. 14, no. 3, Sept. 2019, pp. 28-41.

თავი 2. საკომუნიკაციო ლინკის ბიუჯეტის ანალიზი 6G-სთვის

2.1. შესავალი

რამდენად კარგად შეუძლიათ ზედა მილიმეტრულ ტალღებს და ტერაჰერცულ სიხშირულ დიაპაზონებს რომ უზრუნველყონ უსადენო კომუნიკაციები? მოცემულ თავში ჩვენ შევაფასებთ ამ კუთხით დღეს არსებულ მდგომარეობას და მომავლის საკომუნიკაციო პოტენციალს, რა დროსაც, განსაკუთრებულ ყურადღებას გავამახვილებთ რადიოსიხშირული აპარატურის საანტენო და სხვა რგოლების ტექნოლოგიებზე და იმ გამოწვევებზე, რომლებიც დაკავშირებულია რადიოტალღების გავრცელებასთან. ეს განხორციელდება საკომუნიკაციო ლინკის ბიუჯეტის შეფასების საფუძველზე, რომლის დროსაც გამოყენებული იქნება ლინკის ბიუჯეტის ისეთი პარამეტრების დასაბუთებული გამოთვლები, როგორებიცაა ხმაურის კოეფიციენტის მოთხოვნილი ან მიღწევადი მნიშვნელობა, გადაცემის სიმძლავრე და ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტი. სიმარტივისათვის, ამ უკანაკნელს ქვემოთ მოვიხსენიებთ, როგორც ანტენის გაძლიერებას. შეფასებები ემყარება დღეისათვის ხელმისაწვდომ ტექნოლოგიებს, რომლებიც რა თქმა უნდა მოითხოვენ განვითარებას. RF-ის გამოყენების თვალსაზრისით, არსებული გამოწვევები განპირობებულია განსაკუთრებით მაღალი გადამცემი სიმძლავრეების ფორმირების და დაბალი ხმაურის შექმნის აუცილებლობებით, რაც, თავის მხრივ, უზრუნველყოფილი უნდა იყოს ანტენების ძალიან მაღალი გაძლიერებით. მაგალითისათვის, ჩვენ განვიხილავთ 300 გჰც სიხშირეებზე ფუნქციონირების შესაძლებლობებს და ასეთ შემთხვევაში, სხვადასხვა სახის მოწყობილობებისათვის შევის-

წავლით სიტუაციას, როდესაც გადაცემა ხორციელდება 100 გბიტი/წმ სიჩქარით, 30 გჰც სიხშირის გატარების ზოლში და საკომუნიკაციო ლინკის 10 მეტრიანი სიგრძით.

2.2. 6G სიხშირეები და ძირითადი გამოწვევები

უსადენო საკომუნიკაციო სისტემების ევოლუციის ტენდენცია, ეს არის მონაცემთა გადაცემის უფრო მაღალი სიჩქარეები, სისტემის გამტარუნარიანობის გაზრდა, გატარების ფართო სიხშირული ზოლების გამოყენება და ოპერირების მაღალი სამუშაო სიხშირეები. 5G არის მობილური საკომუნიკაციო სისტემების პირველი თაობა, რომელიც მხარს უჭერს გადაცემის პროცესში მილიმეტრული დიაპაზონის ტალღების გამოყენებას მონაცემების მაღალსიჩქარიანი უსადენო გადაცემისათვის. ის უზრუნველყოფს გადაცემის სიჩქარეს, რაც შეადგენს რამდენიმე გბიტი/წმ-ს, იყენებს რა გადაცემისთვის რამდენიმე ასეული მჰც-ის ტოლ სიხშირის გატარების ზოლებს. შემდეგი თაობა, 6G უსადენო საკომუნიკაციო სისტემები, გათვალისწინებულია ფუნქციონირების გაფართოებაზე ზედა მილიმეტრული ტალღების დიაპაზონში (100-300 გჰც) და ქვედა ტერაჰერცული დიაპაზონის (300-3000 გჰც) სიხშირეებზე. მომავალი 6G სისტემები მიზნად ისახავს მონაცემთა გადაცემის პიკურ სიჩქარეს ტბიტი/წმ, რომლის დროსაც უზრუნველყოფილი იქნება გადაცემისას დაბალი შეყოვნება. ამიტომ, მნიშვნელოვნად უფრო ფართო სიხშირის გატარების ზოლები და, შესაბამისად, დიდი გამტარუნარიანობაა საჭირო, იმასთან შედარებით, რაც არის საკმარისი 5G სისტემებისათვის, რომელთათვისაც სიხშირული სპექტრი გამოყოფილია 100 გჰც-ს ქვემოთ.

ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო კავშირი (International Telecommunication Union, ITU) და, შესაბამისად, ეროვნული მარეგულირებელი ორგანოების უმეტესობა, განიხილავს რადიოსიხშირული სპექტრის

გამოყოფას მხოლოდ 275 გჰც-მდე. ITU-ს პირველ რეგიონში, სადაც შედის ევროპა (და საქართველო) ჯამში 81 გჰც-იანი სიხშირული ზოლია გამოყოფილი ფიქსირებული/მობილური კომუნიკაციებისთვის 100-275 გჰც სიხშირულ დიაპაზონში. ამასთან, ამ გამოყოფის 23 გჰც ზოლი განთავსებულია 252-275 გჰც სიხშირეებზე. 2019 წლის მსოფლიო რადიოსაკომუნიკაციო კონფერენციამ (World Radiocommunication Conference, WRC-19) მიწისზედა მობილური და ფიქსირებული სამსახურებისათვის მოახდინა 137 გჰც სიხშირული ზოლის იდენტიფიცირება 275-450 გჰც დიაპაზონში, ისე, რომ არ დაუწესებია რაიმე მოთხოვნები პასიური მომსახურებების, მაგალითად, დედამიწის საძიებო-თანამგზავრული მომსახურების (Earth Exploration-Satellite Service, EESS) დასაცავად, რომლებიც ფუნქციონირებენ ტერაჰერცულ სიხშირეებზე. ამრიგად, 250-450 გჰც სიხშირულ დიაპაზონში ფიქსირებული/მობილური კომუნიკაციებისათვის ჯამურად ხელმისაწვდომია 160 გჰც სიხშირული სპექტრის სიგანე.

ფიქსირებული წერტილი-წერტილთან პრინციპით აგებული საკომუნიკაციო ლინკი, ან შენობის შიგნით მომუშავე სისტემა, რომელიც ფუნქციონირებს ზედა მილიმეტრული ტალღების დიაპაზონში ან ტერაჰერცულ სიხშირულ დიაპაზონში, ჩვეულებრივ გულისხმობს, რომ არსებობს LoS კავშირი გადამცემსა და მიმღებს შორის. LoS-ის პირობებში რადიოსიგნალის მიღევა (შესუსტება) ატმოსფერული გავრცელებისას დამოკიდებულია თავისუფალ სივრცეში გზის დანაკარგებზე (ფ რ ი ს ი ს ფორმულა), მოლეკულურ შთანთქმაზე და წვიმის გამო წარმოშობილ სპეციფიკურ მიღევაზე. ფ რ ი ს ი ს გადამცემის ფორმულა მიუთითებს, რომ სიხშირის გაორმაგება თავის მხრივ აოთხმაგებს თავისუფალ სივრცეში გზის დანაკარგებს, რაც გამოწვეულია საანტენო ელემენტის აპერტურის შემცირებით, რომელიც სიხშირის ფუნქციაა. გარდა ამისა, მოლეკულური შთანთქმის სპექტრული ხაზები იწყებენ გავლენას საკომუნიკაციო ლინკის ბიუჯეტებზე, დაახლოებით 60 გჰც-

ზე (ჟანგბადი) და 300 გპც-ს ზემოთ (წყალი). წვიმის მიერ გამოწვეული მიღწევა მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული დროზე და ადგილმდებარეობაზე, მაგრამ მისი გავლენა ასევე უნდა იყოს გათვალისწინებული დიდ მანძილებზე გადაჭიმული საკომუნიკაციო ლინკების აგების პროცესში.

ზედა მილიმეტრულ ტალღებში და ტერაჰერცულ სიხშირულ დიაპაზონში ფუნქციონირებადი საანტენო ელემენტები, როგორც წესი, მჭიდროდ არის ინტეგრირებული რადიოტრანსივერებში (გადამცემ-მიმღებებში), რაც მცირე ფიზიკური ზომის გამო საშუალებას იძლევა განხორციელდეს ინტეგრირება მიკროსქემის ან მოდულის დონეზე. მეორეს მხრივ, ანტენის შემცირებული ზომები ტალღის გავრცელების პროცესში, განაპირობებს არასასურველ ტექნიკურ მახასიათებლებს. ვინაიდან ტალღის „დაჭერის“ ეფექტური არეალი შედარებით მცირეა, ანტენის ელემენტი და, შესაბამისად, მიღებული სიმძლავრე მცირდება ფ რ ი ს ი ს განტოლების მიხედვით. ანტენის ტერაჰერცულმა ტექნიკურმა გადაწყვეტილებებმა უნდა გადაჭრან ეს ფუნდამენტური პრობლემა ანტენის აპერტურის სიდიდის გაზრდით, მაგალითად, ლინზური ან ფაზირებული საანტენო მესრების გამოყენებით. გადაცემისა და მიღებისას, ანტენის დიდი აპერტურა საშუალებას იძლევა მიღწეულ იქნას ანტენის მაღალი მიმართულობა და, შესაბამისად, მაღალი გამძლეობა, რაც აკომპენსირებს თავისუფალ სივრცეში გავრცელების დანაკარგებს.

დიდი ზომის ანტენების იმპლემენტაციისათვის, რომელთაც შესაბამისად აქვთ კარგი გაძლიერება (მაგალითად, ბექჰოლის ლინკებისათვის), მოსახერხებელი გზაა თეფშის ტიპის რეფლექტორული ანტენების ან დიელექტრიკული კოლიმაციური ლინზური ანტენების გამოყენება. ლინზა, ეს არის სპეციალური ფორმის დიელექტრიკული მასალის ნაჭერი, რომელიც ახდენს ანტენის მიერ გამოსხივებულ ველის ფოკუსირებას. ეფექტურობის თვალსაზრისით, ლინზა, როგორც საანტენო

სისტემის კომპონენტი, ზრდის ანტენის აპერტურას, რაც უზრუნველყოფს უფრო მეტ გაძლიერებას, ანუ, შესაბამისად, ანტენის უფრო ვიწრო სხივს. ფაზირებული საანტენო მესერი, როგორც ალტერნატიული მიდგომა, ფართოდ არის გამოყენებული ქვედა მილიმეტრულ ტალღათა დიაპაზონში (მაგალითად, 28 გჰც სიხშირეებზე 5G-ში). ამასთან, ერთი და იმავე აპერტურისათვის, სიხშირის გაორმაგება ოთხჯერ ზრდის ანტენების რაოდენობას. 28 გჰც-დან 200-300 გჰც-იან დიაპაზონში გადაადგილებისას 32-ელემენტოვანი გონივრული საანტენო მესერი მასშტაბირდება 2000 ანტენის დიაპაზონამდე, რომელთათვისაც პარალელურად ხორციელდება RF გზებით გადაცემა და მიღება. ასეთი სირთულის სისტემის მართვა ძნელია და მოხმარებული ენერგია მკაცრად ზღუდავს პრაქტიკულ რეალიზაციას. ამიტომ, 5G-სთან დაკავშირებული ამჟამინდელი ტექნიკური გადაწყვეტილებები არ შეიძლება ტრივიალურად იქნას გადატანილი 300 გჰც სიხშირულ დიაპაზონში.

კიდევ ერთი ფუნდამენტური ფიზიკური შეზღუდვა 6G სისტემებისთვის, გამომდინარეობს ელექტრული წრედების ტექნოლოგიების შეზღუდული მახასიათებლებიდან, როდესაც ხდება ტერაჰერცულ რეგიონთან მიახლოება. ამჟამინდელი 4G და 5G მობილური ტერმინალებისთვის რადიოტრანსივერებთან დაკავშირებული ტექნიკური გადაწყვეტილებები ხელსაყრელი ღირებულების, მოდულარობის და ინტეგრაციის მაღალი დონის გამო, ძირითადად ხორციელდება კომპლიმენტარული მეტალოქსიდური ნახევარგამტარული (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS) ინტეგრირებული წრედების (Integrated Circuit, IC) ბაზაზე. ამასთან, დღესაც მობილური ტერმინალის სიმძლავრის გამაძლიერებლები (Power Amplifier, PA) იყენებენ ან III-V ტექნოლოგიას, როგორიცაა გალიუმის არსენიდზე (GaAs), ინდიუმის ფოსფიდზე (InP) ან სილიციუმის გერმანიუმზე (SiGe) დაფუძნებული ჰეტეროფუნქციური ბიპოლარული ტრანზისტორი (Heterojunction Bipolar Transistor, HBT). ეს საშუალებას გვაძლევს გადაილახოს არსებული

შეზღუდვები და CMOS-მა ეფექტურად უზრუნველყოს რადიოსიხ- შირული სიმძლავრის საკმარისი რაოდენობა 6 გჰც-ზე დაბალ სიხშირე- ებზე. ასევე, საბაზო სადგურის რადიოები სიმძლავრის გამაძლიერებ- ლებში და დაბალხმაურიან გამაძლიერებლებში (Lower Noise Amplifier, LNA) იყენებენ სხვა III-V ტექნოლოგიებსაც, რათა უზრუნველყონ CMOS რადიოტრანსივერების უკეთესი ფუნქციონირება რადიომახა- სიათებლების გასაუმჯობესებლად. მეორეს მხრივ, დიდი და მოცულო- ბითი დისკრეტული PA და LNA კომპონენტები უკვე აღარ არიან ფი- ზიკურად რეალიზებადი მცირე ზომის ანტენების შემთხვევაში, თუნ- დაც ქვედა მილიმეტრული ტალღების დიაპაზონში. შესაბამისად, მა- ლიან მაღალ დონეზე ინტეგრირებული CMOS ან SiGe HBT მილიმეტ- რული ტალღების ტრანსივერები უნდა იქნას შემუშავებული, როგორც IC გადაწყვეტილებები ინტეგრირებული PA-ებით და LNA-ებით, რომ- ლებიც ანტენებთან ერთად მოახდენენ ფორმა-ფაქტორის და ნებისმიე- რი RF დანაკარგების მინიმიზაციას, რათა არ მოხდეს ფაზირებული სა- ანტენო მესრების მუშაობის მახასიათებლების გაუარესება. 100 გჰც-ზე ზემოთ განთავსებული მომავალი 6G სიხშირეები, ასევე წააწყდებიან დიდ პრობლემებს ტრანზისტორების ხელმისაწვდომ სიჩქარეებთან დაკავშირებით (მსგავსად f_{max} -ისა, ანუ მაქსიმალური სიხშირისა სიმ- ძლავრის გაძლიერების მისაღწევად), განსაკუთრებით სილიციუმზე დაფუძნებულ ტექნოლოგიებში, როგორიცაა CMOS და SiGe HBT. ზღვრულ მნიშვნელობებთან მიახლოება იწვევს გაძლიერების და გამო- სასვლელი სიმძლავრის კუთხით ექსპონენციალურ დეგრადაციას, აგ- რეთვე ხმაურის მომატებას. გამაძლიერებლების რეალიზაციის პრაქ- ტიკული საზღვარია f_{max} -ის ნახევარი. ბოლოდროინდელი მაგალითე- ბი წარმოგვიდგენენ RF ტრანსივერის მუშაობას 240 გჰც-მდე დიაპა- ზონში SiGe HBT ტექნოლოგიის გამოყენებით, რომელთათვისაც f_{max} დაახლოებით ტოლია 500 გჰც-ს. ამ შემთხვევაშიც კი, მახასიათებლები

გაუარესებულია იმავე ტექნოლოგიის შესაძლებლობებთან შედარებით, როდესაც ფუნქციონირება ხდება 100 გჰც-ზე ნაკლებ სიხშირეზე. სითბური ხმაურისა და გამოსასვლელ სიმძლავრეზე აბსოლუტურ მასშტაბში (მაგალითად, დიაპაზონში) შეზღუდვის გარდა, სხვა არაიდებულურობები, როგორიცაა ფაზური ხმაური სიგნალის დონისა და სიხშირის გატარების ზოლის მიმართ, გავლენას მოახდენენ მოქმედ მოდულაციებზე, სიგნალისა და ხმაურის თანაფარდობის (Signal-to-Noise Ratio, SNR) მაქსიმალური შესაძლო მნიშვნელობის დაწესებით. ეს ასევე მნიშვნელოვნად არის დამოკიდებული გამოყენებული სიგნალის ფორმაზე, მაგალითად, გამოიყენება ერთგადამტანიანი სიგნალი თუ მულტიპლექსირება ორთოგონალური სიხშირული დაყოფით (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM).

ამ თავში, შედარებით აბსტრაქტული ფორმით, განხილულია ძირითადი ტექნოლოგიური ვარიანტები, მაგრამ იგი მოიცავს მათ შორის ყველაზე მნიშვნელოვანი მახასიათებლებთან დაკავშირებულ სუსტ წერტილებს. ისინი ეფუძნებიან თანამედროვე ტექნოლოგიებით მიღწევად ზღვრულ მნიშვნელობებს მოსალოდნელი 6G კავშირების სცენარებში. მხოლოდ რამდენიმე ადრეული პროტოტიპი არსებობს მოკლე დისტანციებზე მოქმედი საკომუნიკაციო სისტემებისათვის, რომელთაც შეუძლიათ იფუნქციონირონ მონაცემთა სიჩქარით, რაც ახლოსაა 100 გბიტ/წმ-თან. ახალმა ტექნოლოგიებმა შეიძლება სწრაფად არ ამოავსონ უფსკრული სასურველ და რეალისტურ მაჩვენებლებს შორის. ამიტომ, არსებითია, შევისწავლოთ კრიტიკული მახასიათებლების საზღვრები და გადავჭიმოთ ხიდი ტექნოლოგიებიდან რეალისტურ საკომუნიკაციო ცნებებამდე. მაგალითად, ფიქსირებული უსადენო ლინკების ბიუჯეტის ანალიზს მივყავართ იმ დასკვნამდე, რომ შესაძლებელია ბიტების მაღალი სიჩქარით გადაცემა 1 კმ მანძილზე, მაგრამ ეს მოითხოვს ძალიან დიდ გაძლიერებას გადამცემი და მიმღები ანტენებისათვის. რეალურია თუ არა ეს სცენარი მასიური ბაზრებისთვის და რა

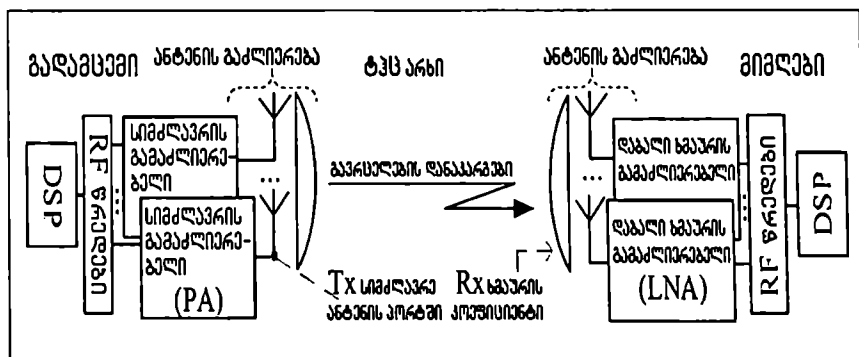
არის ის ტექნოლოგიები, რომელთა საშუალებითაც ეს შეიძლება გაკეთდეს? ეს არის ძირითადი კითხვები 6G საზოგადოების მიმართ მომდევნო წლებში.

როგორც მესამე თავშია წარმოდგენილი, ტექნოლოგიის გაუმჯობესების მიზნით, IEEE 802.15.3d სტანდარტის მიხედვით დადგინდა ფიზიკური დონე მაღალსიჩქარიანი უსადენო მულტიმედიაური ქსელებისთვის, რომელიც მუშაობს 252-325 გჰც სიხშირულ დიაპაზონში, რვა სხვადასხვა გატარების სიხშირული ზოლის შემცველი არხის გამოყენებით, 2.16 გჰც-დან 69.12 გჰც-მდე. შესაბამისად, ქვემოთ ჩვენ ყურადღებას გავამახვილებთ 300 გჰც დიაპაზონში მუშაობისას ლინკის ბიუჯეტის ანალიზზე და განვიხილავთ მცირე ფორმა-ფაქტორის მოწყობილობებს. გადამტანი სიხშირეები 300 გჰც-მდე, არის პოტენციური სამუშაო სიხშირეები, პირველი 6G სისტემებისთვის ტერაჰერცულ დიაპაზონში. შემდეგ პარაგრაფებში ჩვენ განვიხილავთ ტერაჰერცული დიაპაზონის საკომუნიკაციო სისტემებისთვის ლინკის ბიუჯეტის ანალიზის სხვადასხვა ასპექტებს. განხილულია ანტენებისა და რადიოსიხშირული აპარატურის პრაქტიკული შესაძლებლობები ფიქსირებული (შენობის გარეთ) და დაბალი მობილურობის (შენობის შიგნით) საკომუნიკაციო სისტემებისათვის, რომლებიც მუშაობენ 300 გჰც სიხშირეზე და შესაბამისი მნიშვნელობებია შერჩეული, ლინკის ბიუჯეტის გამოთვლებისთვის. ლინკის მახასიათებლები გაანალიზებულია ლინკით მიღწეულ მანძილთან, სისტემაში გამოყენებულ სიხშირის გატარების ზოლებთან და ბიტის სიჩქარესთან (გადაცემის სიჩქარესთან – ბიტი/წმ) მიმართებაში.

2.3. ლინკის ბიუჯეტის შეფასების მეთოდი

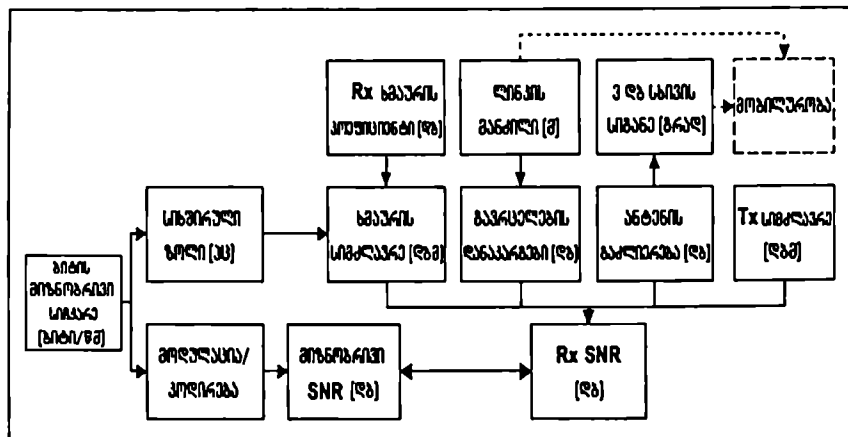
მთავარი გამოწვევები, რომლებიც დაკავშირებულია ლინკის რელისტურ ბიუჯეტთან და ზედა მილიმეტრული ტალღების დიაპაზონ-

ში საკმარისი სიხშირული სპექტრის გამოყოფასთან, მდგომარეობს ძირითადი ხელშემწყობი ტექნოლოგიების ამჟამინდელი და სამომავლო მახასიათებლების ზუსტ განსაზღვრაში. ტერაჰერცული საკომუნიკაციო სისტემების მოთხოვნების ანალიზისთვის მიღებულია ლინკის ბიუჯეტის შეფასების მარტივი მოდელი. მისი მიზანია შეაფასოს ლინკის პოტენციური მანძილები, სისტემაში გამოყენებული სიხშირის გატარების ზოლები, ბიტის სიჩქარე და მობილურობის მხარდაჭერა ტერაჰერცული დიაპაზონის ტრანსივერის ტექნოლოგიის ისეთ შესაძლებლობებსა და ფიზიკურ მახასიათებლებთან მიმართებაში, როგორიცაა გავრცელების მედიუმში თავისუფალი სივრცის დანაკარგები და მოლეკულური შთანთქმა, რათა წარმოდგენილ იქნას არსებული პრობლემების სრულყოფილი მიმოხილვა და შესაძლებლობები. რადიოსაკომუნიკაციო სისტემის მოდელი, რომელიც აჩვენებს ტრანსივერის საკვანძო პარამეტრებს და რომლებიც გავლენას ახდენენ ლინკით მიღწეულ მანძილზე, მოცემულია ნახ. 2.1-ზე. PA და LNA აქ წარმოადგენენ, შესაბამისად, RF გადამცემისა და მიმღების მთლიან მახასიათებლებს, მაშინ როდესაც სიგნალების ციფრული დამუშავება (Digital Signal Processing, DSP) სიმარტივისთვის ახდენს მოდემის დამუშავების აბსტრაგირებას SNR-ის ერთ მნიშვნელობამდე.



ნახ. 2.1. რადიოკავშირის სისტემის მოდელი

სისტემის სხვადასხვა პარამეტრების ურთიერთდამოკიდებულება ასახულია ნახ. 2.2-ზე. ბიტის გადაცემისას მიზნობრივი სიჩქარე შეიძლება რეალიზებული იქნას გარკვეული სიხშირის გატარების ზოლების და მოდულაცია/კოდირების შესაბამისი სქემების კომბინაციებით.



ნახ. 2.2. შერჩეული RF სისტემის პარამეტრების ურთიერთდამოკიდებულება

იმისათვის, რომ შევუსატყვისოთ ბიტის მიზნობრივი სიჩქარე შერჩეულ სიხშირის გატარების ზოლს, ჩვენ განვიხილავთ ერთგადამტანიან მოდულაციას, M-ობითი ფაზური მოდულაციით (M-ary Phase Shift Keying, MPSK) ან M-ობითი კვადრატულ ამპლიტუდურ მოდულაციას (M-ary Quadrature Amplitude Modulation, MQAM), და მარტივ შეცდომების გამასწორებელ კოდს განმეორებით და გარკვეული კოდური სიჩქარით. შერჩეული მოდულაციისა და კოდირების კომბინაცია მოითხოვს გარკვეულ სისტემურ SNR-ს (მიზნობრივ SNR-ს), ბიტის სიჩქარესთან დაკავშირებული სასურველი მიზნის მისაღწევად. ეს შედარებულია მიღებისას (Receive) მიღწევად SNR-თან (Rx SNR), რომელიც განისაზღვრება ხმაურის სიმძლავრით, გავრცელებისას წარმოქმნილი დანაკარგებით, ანტენის გაძლიერებით და გადაცემული (Transmit) სიგნალის

(Tx) სიმძლავრით. მისაღწევი Rx SNR მოიცავს ტრანსივერის RF-ის რეალიზაციასთან დაკავშირებულ ყველა რგოლს, მონაცემთა კონვერტირების ჩათვლით.

მაქსიმალური Tx სიმძლავრე შეიძლება შეიზღუდოს რეგულაციებით ან კომპონენტის ხელმისაწვდომი ტექნოლოგიებით. პირველი ხშირად ხდება უფრო დაბალ სიხშირეებზე, ხოლო მეორე – მაღალ სიხშირეებზე, სადაც გადასაცემი სიმძლავრის გენერირებისა და დაბალი ხმაურის მიღწევის შესაძლებლობა მკაცრად იზღუდება ნახევარგამტარული ტექნოლოგიების სამუშაო სიჩქარით. მაქსიმალური სიხშირე ძაბვის ან სიმძლავრის მიხედვით გაძლიერების მისაღწევად (მაგალითად, f_T ან f_{max}), საკომუნიკაციო შესაძლებლობებისთვის განსაზღვრავს მკაცრ ფიზიკურ ლიმიტებს. ისინი კიდევ უფრო მცირდება ნახევარგამტარებში წარმოქმნილი პარაზიტული ეფექტებით და სქემებს შორის ურთიერთკავშირებით. აქედან გამომდინარე, Tx სიმძლავრის მნიშვნელობაში, ჩვენ მხედველობაში ვიღებთ PA-სთვის მისაღწევი გამოსასვლელის შეფასებას შერჩეული ტექნოლოგიური მაგალითებით და სკრუპულოზური ანალიზით, რომელიც მისადაგებულია ზედა მილიმეტრული ტალღების დიაპაზონისადმი. ამას ავსებს PA-ს სიმძლავრის შემცირების მოდელირებისთვის განკუთვნილი სიგნალის ტალღოვან ფორმაზე დამოკიდებული კრესტ-ფაქტორი და RF გადამცემი წრედის სხვა დაზიანებები, რომლებიც შედის ფიქსირებულ „პოსტ-PA“ დანაკარგის კოეფიციენტში. Rx RF წრედის დაზიანებები შედის მიმღების ხმაურის კოეფიციენტში (Noise Figure, NF). სისტემის მიერ გამოყენებული სიხშირის გატარების ზოლი, NF-თან ერთად, განსაზღვრავს ხმაურის სიმძლავრის მთლიან დონეს Rx ანტენის შესასვლელში.

სიგნალთა გავრცელებისას ჯამური დანაკარგი არის თავისუფალ სივრცეში გზაში დანაკარგის, დაბრკოლებების შედეგად წარმოქმნილი დანაკარგების და ატმოსფერული მილვეის ერთობლიობა. ეს ყველაფერი არსებითად დამოკიდებულია ლინკის მანძილზე. გარდა ამისა, ჩვენ

ვთვლით, რომ შესაძლებელია პირდაპირი LoS კავშირის მოწყობა გადამცემიდან მიმღებამდე. გადამცემისა და მიმღების ანტენების მოდულირება ხდება ან ანტენის ელემენტისა და ლინზის, ან საანტენო მესრის გაძლიერების მიხედვით. ანტენის გაძლიერება ასევე მოქმედებს სხივის სიგანეზე, რაც გავლენას ახდენს მხარდაჭერილ მობილურობაზე მაღალი მიმართულობის მქონე საკომუნიკაციო სისტემებში.

2.3.1. ბიტის მიზნობრივი სიჩქარე და სიხშირის გატარების ზოლი

ტერაჰერცულ დიაპაზონში კომუნიკაციებისთვის პოტენციური გამოყენების შემთხვევები მოიცავს კავშირს ბექჰოლით და ფრონტჰოლით, უშუალო სიახლოვის საკომუნიკაციო სისტემებს, სერვერებს შორის უსადენო ლინკებს მონაცემთა ცენტრებში და მაღალსიჩქარიან მონაცემთა კავშირებს, რომლებიც საჭიროა მომავალ 6G ქსელებში შენობებს შიგნით მომსახურებისთვის. ბიტის სიჩქარეზე მოთხოვნები შეიძლება იცვლებოდეს 10-დან 100 გბიტ/წმ-მდე და 1 ტბიტ/წმ-მდეც კი ჰოლოგრაფიული ტიპის კომუნიკაციებისათვის. ლინკის ბიუჯეტის გამოთვლებისთვის ჩვენ ვირჩევთ პირველადი ლინკის პროექტირების პარამეტრებს შემდეგნაირად: გადამტანი სიხშირე 300 გჰც, სისტემის სიხშირული გატარების ზოლი 30 გჰც და ბიტის მიზნობრივი სიჩქარე 100 გბიტ/წმ. ჩატარებული ანალიზის შედეგად ჩვენ განვსაზღვრავთ საკომუნიკაციო ლინკის მიღწევად მანძილს მოცემული პარამეტრებისათვის. ძირითადად გამოიყენება LoS მოდელი, რადგან სხვა სცენარები ადვილად იწვევენ შეზღუდვას კავშირის დიაპაზონისთვის, რაც არაპრაქტიკულია სავსე ცდების ჩატარებისას. ამასთან, არხების სხვა არაიდეალურობისთვის, როგორიცაა სხივის არასრულყოფილი გასწორება ან არეკვა, შეიძლება იქნას გამოყენებული პარამეტრი, რომელიც აღწერს ლინკის ზღვარს, გავრცელების უფრო რთული სცენარების შესა-

ფასებლად. ანალიზის საფუძველზე ქვემოთ ნაჩვენებია, რომ სამწუხაროდ, 100 გკვ სიხშირეებს ოდნავ ქვემოთ მუშაობისას, როდესაც ერთდროულად საჭიროა მონაცემთა უკიდურესად მაღალი სიჩქარე და გადამტანი სიხშირე და, ასევე, ფართო სიხშირის გატარების ზოლი, ლინკის ბიუჯეტი არ უზრუნველყოფს ისეთ ზღვრებს (ზღვრული მნიშვნელობებით განსაზღვრულ რეზერვებს), რომლებიც მხედველობაში მიიღება ლინკის ბიუჯეტის ანალიზისას 6 გკვ-ზე ნაკლებ სიხშირეებზე ფუნქციონირებადი ფიჭური ან ლოკალური არეალის საკომუნიკაციო ქსელებისთვის.

2.3.2. გადაცემის სიმძლავრე და ხმაურის კოეფიციენტი

ტერაჰერცული სიხშირეების დიაპაზონისათვის ერთ-ერთი ყველაზე კრიტიკული პარამეტრია PA-სგან ხელმისაწვდომი RF ენერგია. ზემო ტერაჰერცული სიხშირეები იყენებენ ფოტონებზე დაფუძნებულ ტექნოლოგიებს, რათა მოახდინონ RF სიმძლავრის გენერაცია, ხოლო ქვედა სიხშირეები ეყრდნობა სილიციუმზე ან III-V-ზე დაფუძნებულ ტექნოლოგიებს, როგორიცაა გალიუმის ნიტრიდი (GaN) და InP, რაც საშუალებას იძლევა შემუშავდეს მცირე ზომის PA ამ სიხშირეებზე ფუნქციონირებადი საბაზო სადგურებისა და მობილური ტერმინალებისთვის. მილიმეტრული ტალღების ტრანსივერების კომპაქტური, ხარჯების მიხედვით ეფექტური და ფართომასშტაბიანი ინტეგრაციისათვის, სილიციუმზე დაფუძნებული ტექნოლოგიები (SiGe HBT, CMOS, ან სილიციუმის CMOS იზოლატორზე, SOI) წარმოადგენენ სიცოცხლისუნარიან გადაწყვეტილებებს, განსაკუთრებით მასობრივი ბაზრებისათვის.

RF სიმძლავრის გენერირების მიზნით სიხშირეთა ფართო სპექტრისათვის, სხვადასხვა ნახევარგამტარული ტექნოლოგიების გამოკვლევა მოყვანილია ლიტერატურაში, სადაც მითითებულია საკმაოდ მკაცრი

ურთიერთდამოკიდებულება მიღწევად ზღვრულ გამომავალ სიმძლავრეს, სამუშაო სიხშირეს და გამოყენებულ ნახევარგამტარულ ტექნოლოგიას შორის. დასკვნის სახით ვკითხულობთ, რომ გამოყენებული IC ტექნოლოგიის მიუხედავად, მიღწევადი ზღვრული რადიოსიხშირული სიმძლავრე მცირდება, როდესაც სამუშაო სიხშირე იზრდება, ტრანზისტორის სამუშაო სიჩქარის შეზღუდვების გამო. ლინკის ბიუჯეტის ანალიზისთვის, PA-ს მაქსიმალური ზღვრული სიმძლავრისათვის, არჩეული იქნა ორი რეპრეზენტაციული მნიშვნელობა, კერძოდ, +5 დბმ და +13 დბმ. პირველი მნიშვნელობა წარმოადგენს ლიტერატურიდან ცნობილ მახასიათებელს, რომელიც დაფუძნებულია SiGe HBT და CMOS PA-ზე 200-250 გჰც-სთვის მითითებულ მნიშვნელობებზე, ხოლო მეორე მნიშვნელობა, როგორც აღნიშნულია ლიტერატურაში, არის PA-ს გადაწყვეტილების მნიშვნელობა, რომელიც დაფუძნებულია III-V ტექნოლოგიაზე 300 გჰც სიხშირისათვის.

ასევე, მიმღების ხმაურის კოეფიციენტი არის ტექნოლოგიაზე დამოკიდებული პარამეტრი, რომელიც არის სიხშირისა და f_T -ს ფუნქცია. ზედა მილიმეტრული ტალღების დიაპაზონის მიმღების ან LNA-ების ლიტერატურიდან ცნობილი ხმაურის მაჩვენებლები 10-15 დბ-ის ფარგლებშია და ხმაურის მახასიათებლები შეზღუდულია გამოყენებული IC ტექნოლოგიით. გადამტანი სიხშირის მნიშვნელობის გამო, ეს NF მნიშვნელობები უფრო მაღალია, ვიდრე ამჟამინდელი 5G მიმღების NF-ები. ანალიზისთვის შერჩეული იყო NF-ის სამი მნიშვნელობა, 10 დბ, 12 დბ და 15 დბ, რათა წარმოდგენილი ყოფილიყო ტერაჰერცული დიაპაზონის სხვადასხვა ტიპის მიმღების მოსალოდნელი NF მახასიათებლები. ორი პირველი მნიშვნელობა აღებულია III-V ტექნოლოგიების უფრო დიდი მოწყობილობებისთვის, რომლებიც ითვალისწინებენ საუკეთესო LNA-ს და ტოვებენ გარკვეულ რეზერვს მიმღების სხვა კომპონენტების გასაუმჯობესებლად. ამასთან, მჭიდროდ ინტეგრირებული სილიციუმზე დაფუძნებული ფაზირებული საანტენო მეს-

რებისათვის, არ შეიძლება მოსალოდნელი იყოს 15 დბ-ზე უკეთესი ხმაურის კოეფიციენტის მიღწევა.

2.3.3. ანტენის გაძლიერება

ზოგადად, ტერაჰერცული ანტენების მაღალი გაძლიერების მიღწევის ერთადერთი გზაა ანტენის აპერტურის გაზრდა. კასეგრეინის რეფლექტორულ ანტენას აქვს დიდი აპერტურა და მაღალი გაძლიერება (55 დბი – გაძლიერება იზოტროპულ გამსხივებელთან შედარებით), მაგრამ არ არის რენტაბელური ან ადვილად ინტეგრირებადი. თანამედროვე გადაწყვეტა 300 გჰც-ზე მდგომარეობს სისტემის კორპუსში დიელექტრიკული ლინზის ინტეგრირებაში, რაც ჩვეულებრივ ნიშნავს ანტენურ მოწყობილობას ერთი ფიქსირებული სხივით. გაძლიერების პრაქტიკული მნიშვნელობები დამოკიდებულია ლინზის ზომაზე, ფორმაზე და დიელექტრიკულ თვისებებზე და შეადგენს 20-30 დბი-ს. ანტენები, გადართვადი სხივით, ქვედა მილიმეტრულ ტალღურ დიაპაზონებზე (75 გჰც) კონსტრუირდება ანტენის რამდენიმე ელემენტის ერთ ლინზაში ინტეგრირებით. მილიმეტრული ტალღების დიაპაზონებში, ფაზირებული საანტენო მესრები ეფექტურად გამოყენებადი აღმოჩნდა 5G-ს კომერციულ გადაწყვეტილებებში.

ტერაჰერცულ სიხშირულ სპექტრში კომუნიკაციისათვის შესაძლო საანტენო სისტემის აგებისას პრობლემები უკავშირდება სხივის მართვის შესაძლებლობას. ლინზური ანტენები, თავისი ბუნებით წარმოადგენენ გადაწყვეტას ფიქსირებული სხივით, რაც ნიშნავს, რომ მხოლოდ ერთი ტრანსივერი უზრუნველყოფს კომუნიკაციას ერთი მიმართულებით. ეს შეზღუდვა მოქმედებს ანტენებზე გადართვადი სხივით, ერთ ლინზაში ინტეგრირებული მრავალი ანტენისა და ტრანსივერების შემთხვევაში. გარდა ამისა, ერთი გასხივებული სხივის ფორმა ფიქსირებულია და, ამრიგად, დიდი გაძლიერების მქონე ლინზურ ანტენაში,

ერთი საანტენო ელემენტის გეომეტრიული დაფარვა შეზღუდულია. ალტერნატიულად, დიდი დაფარვის მიღწევა შესაძლებელია ერთდროულად, რამდენიმე საანტენო ელემენტისა და რამდენიმე სხივის გამოყენებით. ინტეგრირებული ლინზური ანტენების უპირატესობები მოიცავს ანტენის მთლიანი აპერტურის ეფექტურ გამოყენებას, გასხივების დიაგრამის მიმართულობის სტაბილურობას ფართო საოპერაციო ზოლზე და ხარჯების ეფექტურობას.

ფაზირებულ საანტენო მესერს აქვს სხივების მართვის უკეთესი შესაძლებლობა. პრაქტიკულად, ერთ აქტიურ ფაზირებულ მესერს შეუძლია წარმოქმნას მრავალი ერთდროული სხივი, მაგრამ ამას მივყავართ RF-ის გარე ინტერფეისის უფრო რთულ რეალიზაციამდე. პრობლემები შეიძლება წარმოიშვას ელემენტებს შორის მანძილების გამო, როდესაც ანტენები უფრო მცირეა, ვიდრე IC-ს სხვა კომპონენტები. ასევე, ანტენის ასობით ან ათასობით ელემენტს სჭირდება ტრანსივერების მნიშვნელოვანი რაოდენობა, რამაც შეიძლება გაზარდოს რეალიზაციის ხარჯები და გამოიწვიოს ენერგიის მოხმარების პრობლემები და, შესაბამისად, გაართულოს სითბური რეჟიმის მართვა.

ტერაჰერცულ სიხშირულ დიაპაზონში კომუნიკაციისათვის ანტენების გამოყენების სწორი სტრატეგია დამოკიდებულია სხივის მართვის მოთხოვნებზე. ფიქსირებული კავშირისათვის მოსახერხებელი გამოსავალია ინტეგრირებული ლინზური ანტენა. ლინზური ანტენა, სხივის გადართვით, საშუალებას იძლევა გამოყენებული იქნას ერთი ან რამდენიმე ერთდროული სხივი და ის შეიძლება ოპტიმალური იყოს დაბალი მობილურობის გამოყენებისათვის. ფაზირებულმა საანტენო მესერებმა შეიძლება აჩვენონ თავიანთი უპირატესობა ზომიერი გამძლიერების და მაღალი მობილურობის საკომუნიკაციო გამოყენებების შემთხვევაში. გაძლიერებასა და მობილურობას შორის კომპრომისმა შეიძლება მიგვიყვანოს ისეთი საანტენო სისტემების გადაწყვეტილებებამ-

მდე, რომლებიც მოიცავენ ანტენების ძირითადი ტიპების კომბინაციებს მაღალი გამლერებით.

ლინკის ბიუჯეტის ანალიზისთვის ჩვენ ვირჩევთ სამი ტიპის ანტენებს. მცირე ზომის ლინზური ანტენა კარგადაა გამოყენებადი ლოკალური, დაბალი მობილურობის, შენობის შიგნით ფუნქციონირებადი მოწყობილობებისთვის, ხოლო დიდი კასეგრენის ანტენა – ბექჰოლის ლინკებისათვის. მობილური მოწყობილობა და საბაზო სადგური, რომლებიც აღჭურვილია ანტენის მესრებით, შედის ანალიზში მობილურობის ასპექტების შესაფასებლად. ანტენის გამლერება 23-26 დბი წარმოადგენს გამონაგარიშებულ გამლერებას მცირე ლინზური ანტენებისთვის, რომელთა დიამეტრია 8-11 მმ და ფუნქციონირებენ 300 გჰც სიხშირეზე. ანტენის გამლერება 55 დბი არის კასეგრენის ანტენის ცნობილი მნიშვნელობა 275 გჰც სიხშირეზე მუშაობისას. საანტენო მესრის გამლერება დამოკიდებულია მესრის ზომაზე, ელემენტის გამლერებაზე და ეფექტურობაზე, და გამოითვლება, როგორც 17.1 დბი და 29.1 დბ, შესაბამისად, მობილური მოწყობილობისა და საბაზო სადგურის 32 და 512 ელემენტიანი საანტენო მესრებისათვის.

2.4. ლინკის ბიუჯეტის გაანგარიშება

ლინკის ბიუჯეტის გამოთვლები ხორციელდება მოკლე დისტანციებისათვის (10 მ-მდე), ლინკებისათვის ორი განსხვავებული სიმეტრიული და სტატიკური პარამეტრების ნაკრებების გამოყენებით (ლინკები 1 და 2) და ერთი მობილური სცენარისთვის (ლინკი 3) ზემოთ მიმართული ლინკისა (აპლინკი) და ქვემოთ მიმართული ლინკის (დაუნლინკის) ასიმეტრიის გათვალისწინებით. ამასთანავე, ერთი ფიქსირებული, გრძელ დისტანციაზე მოქმედი, ბექჰოლის ლინკის სცენარი გაანგარიშებულია ცხრილში 1. ლინკი 1-ს გააჩნია მცირე ფორმა-ფაქტორის მოწყობილობები ორივე ბოლოში, როგორებიცაა წვდომის წერტი-

ლები ან მცირე ზომის პორტატული მოწყობილობები, მცირე ლინზური ანტენით და სილიციუმზე დაფუძნებული ტრანზისტორიანი ტრანსივერით. ლინკი 2 შეიცავს მცირე სადგურს, ფრონტპოლს, ან ლეპტოპის ტიპის მოწყობილობას, ლინზური ანტენებით და III-V ტექნოლოგიით, რომელიც ხელს უწყობს ტრანსივერის უკეთეს მუშაობას. ლინკი 3 წარმოადგენს მობილური სარგებლობის ჩვეულებრივ სცენარს ასიმეტრიული ლინკით, რომელიც შედგება სილიციუმზე დაფუძნებული ტექნოლოგიების გამოყენებით განხორციელებული მობილური ალკურვილობისგან, ხოლო მცირე საბაზო სადგურს აქვს უკეთესი მახასიათებლები, ვინაიდან მასში გამოიყენება ისეთი III-V კომპონენტები, როგორებიცაა PA-ები და LNA-ები, ეფექტურობის გაზრდისა და ფაზირებული საანტენო მესერის გამოყენებისთვის. საბაზო სადგური, განხორციელების კუთხით, ალბათ ყველაზე რთული და პრობლემატური სცენარია, რადგან 512 ელემენტისანი საანტენო მესრის ნაწილად რთულად განახლებადი III-V კომპონენტების რეალიზება შეიძლება არ იყოს პრაქტიკული. ყოველ შემთხვევაში, ეს სცენარი მნიშვნელოვნად უფრო რთულია და მოითხოვს განსაკუთრებულ ტექნოლოგიურ მიღწევებს, უფრო მცირე დისტანციებზე მოქმედი სისტემებისათვის (შედარებით, თანამედროვე 5G მილიმეტრული ტალღების დიაპაზონის კომუნიკაციებთან) და ასეთი სისტემების თანამედროვე ბაზარზე მასიურ განთავსებას. ბექჰოლის სცენარში (ლინკი 4) შესაძლებელია ყველაზე უფრო ეფექტური ტექნოლოგიების გამოყენება, რადგან ანტენა უზრუნველყოფს უზარმაზარ გაძლიერებას და ლინკი ფიქსირებულია. ლინკების ამ ოთხ სცენარში (ლინკებისათვის სიგრძეებით სანტიმეტრებიდან კილომეტრებამდე) განიხილება ტექნოლოგიების გამოყენებისას წარმოშობილი კომპლექსური საკვანძო პრობლემები, რომლებიც დაკავშირებულია დანახარჯებთან და რეალიზაციის სირთულესთან.

საბოლოოდ, ფაზური ხმაური ასევე უნდა იქნას გათვალისწინებული, რადგან ის ხშირად დომინანტური ფაქტორია, განსაკუთრებით მა-

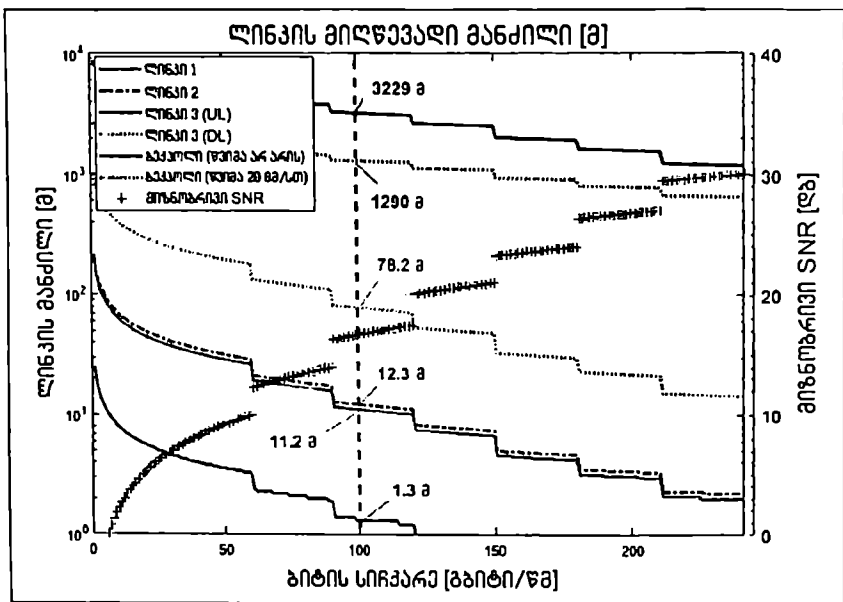
ღალი რიგის მოდულაციებში, რომელთათვისაც საჭიროა SNR-ის მნიშვნელობა 30 დბ ან უფრო მეტიც. აქ, ტალღის ფორმის შერჩევას დიდი მნიშვნელობა აქვს. OFDM-ზე დაფუძნებულ სისტემებში ფაზური ხმაური იწვევს მათში გამოყენებული ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნის (Discrete Fourier Transform, DFT)-ს სიზუსტის დაკარგვას, რაც შემდგომში არღვევს ორთოგონალურობას ქვეგადამტან სიგნალებს შორის. არსებობს ფაზური ხმაურის ორი ეფექტი OFDM ქვეგადამტანზე: საერთო ფაზური შეცდომა (Common Phase Error, CPE) და გადამტანებს შორის ინტერფერენცია (Inter Carrier Interference, ICI). CPE იწვევს ქვეგადამტანის ფაზის როტაციას, რომელიც არ იცვლება OFDM სიმბოლოს პერიოდში, ხოლო ICI-ს შეაქვს ინტერფერენცია გარკვეული სიმბოლოს ნებისმიერ ქვეგადამტანზე ამ სიმბოლოს ყველა სხვა ქვეგადამტანიდან და, შესაბამისად, აგენერირებს ხმაურის მსგავს მახასიათებლებს. შესაბამისად, OFDM-ზე დაფუძნებულ სისტემებში ფაზური ხმაური აკუმულირდება თითოეული სიხშირული ქვეგადამტანის გარშემო, მისი ქვემოთ და ზემოთ გადაყვანისას და ხდება გენერატორის სიმბოლავრის გადანაწილება მთელს დიაპაზონზე. მეორეს მხრივ, ერთ გადამტანიან მოდულაციებში ფაზური ხმაური ძლიერ შესუსტებულია ფაზური დეტექტორის ჩაკეტილ მარყუჟებში (Phase Locked Loop, PLL) და, შესაბამისად, ფილტრაციის საშუალებით ხდება საჭირო მოთხოვნების დაკმაყოფილება. სამწუხაროდ, ტრანზისტორის სამუშაო სიჩქარის შეზღუდვის გამო, PLL დაბალსიხშირული სიგნალის მულტიპლიკაცია ერთადერთი ვარიანტია სიგნალის სიხშირულად ზემოთ ან ქვემოთ გადასაყვანად, რაც იწვევს მაღალ ხმაურს. გარდა ამისა, ფართოზოლოვანი ხმაურის მულტიპლიკაცია PLL-დან, რომელიც, როგორც წესი, ბევრად უფრო დაბალი დონისაა, ვიდრე ახლომდებარე ფაზური ხმაური, მაგრამ მაინც მნიშვნელოვანია, ასევე გადაადგილდება ფართოზოლოვან არხში. ეს ნაწილობრივ გადაუჭრელი საკითხია. ამიტომ, ტაქტური სინქრონიზაციისა და PLL ხარისხის და, ასევე ტალღის ფორმის სწორად

შერჩევა, მოითხოვს სათანადო ყურადღებას 6G-ს კვლევების დროს. მიზნობრივი SNR-ის და Rx SNR-ის შედარება, რომელიც მოცემულია ცხრილში 2.1, მიუთითებს, რომ ლინკის მიზნობრივი მანძილი – ათი მეტრი მიღწეულია ლინკებისათვის 2 და 3, მაგრამ არა ლინკისათვის 1. ლინკი 3-ის სცენარისთვის მიღწევადი ლინკის მანძილი ასიმეტრიულია DL-ის სასარგებლოდ, საბაზო სადგურის გადამცემებში უფრო დიდი რაოდენობით განთავსებული PA-ების გამო. ლინკის მიზნობრივი მანძილი – 1000 მ ბექჰოლის ლინკისათვის, შეიძლება მიღწეულ იქნას ტრანსივერის გარკვეული პარამეტრებისათვის. გასათვალისწინებელია ის ფაქტი, რომ ცხრილში 2.1, PA პარამეტრის გამომავალი სიმძლავრე წარმოადგენს Tx-ის ზღვრულ სიმძლავრეს. ეფექტური იზოტროპულად გასხივებული სიმძლავრე (Effective Isotropic Radiated Power, EIRP) ითვალისწინებს ანტენის ელემენტის, ლინზის და საანტენო მესრის გაძლიერებას და განსაზღვრავს მთლიან ენერგიას, რომელიც გადაიცემა სიგნალის მთავარი წილის მიმართულებით. მოდულაციაზე დამოკიდებული მილევის კოეფიციენტი და PA-ის შემდგომი დანაკარგი საერთო ჯამში შეფასებულია 3.6 დბ-ით 16QAM სიგნალისთვის და ისინი ასევე შედიან EIRP-ში. ანალიზის გასაუმჯობესებლად, ლინკის მიღწევადი მანძილები, ლინკის ყველა განხილული სცენარისთვის და ბიტის განსხვავებული მიზნობრივი სიჩქარეებისათვის, ნაჩვენებია ნახ. 2.3-ზე.

გამოყენებული იყო შვიდი განსხვავებული MPSK/MQAM მოდულაცია ($M = 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256$), რათა დაფარული ყოფილიყო ბიტის სიჩქარის დიაპაზონი 0-დან 240 გბიტ/წმ-მდე, ფიქსირებული სიხშირის გატარების ზოლით 30 გჰც-ით. ბექჰოლი შესწავლილი იქნა, როგორც 20 მმ/სთ წვიმის შემთხვევაში, ასევე მის გარეშე. ძლიერი წვიმა 20 მმ/სთ სიჩქარით იწვევს 10.7 დბ/კმ მილევას 300 გჰც-ზე.

პარამეტრი	ერთეული	ლინკი 1	ლინკი 2	ლინკი 3 (UL)	ლინკი 3 (DL)	ჯამო
სიხშირე	გაჰ			300		
ტალღის სიგრძე	მ			1.0E-3		
ლინკის მანძილი	მ			10		1000
სიხშირის სიხშირის გაბატონების ზოლი	გაჰ			30		
ბიტის მიწოდების სიჩქარე	ბიტ/წმ			100		
მოდულაციის რიგი	ბიტ/სიმ			4		
კოდური სიჩქარე				0.8		
მიწოდების SNR	დბ			16.7		
გზის დანაკარგები თავისუფალ სივრცეში	დბ			102.0		142.0
ატმოსფერული მიწოდება	დბ			0.0		3.0
გავრცელების სრული დანაკარგები	დბ			102.0		145.0
ანტენის ტიპი		ლინკური	ლინკური	შეიარაღებული სანტენო მასური	შეიარაღებული სანტენო მასური	ლინკური
Tx ანტენის რიგები		1	1	32	512	1
Rx ანტენის რიგები		1	1	512	32	1
ანტენის გამტარუნარიანობა Tx	დბ	23.0	26.0	17.1	29.1	55.0
ანტენის გამტარუნარიანობა Rx	დბ	23.0	26.0	29.1	17.1	55.0
-3 დბ სივრცის სიგრძე	გრად	14.4	10.2	28.5	7.1	0.4
PA გამოსავალი სიმძლავრე	დბმ	5.0	13.0	5.0	13.0	13.0
Tx EIRP	დბმ	24.4	35.4	33.6	65.6	64.4
Rx სიმძლავრე	დბმ	-54.6	-40.7	-39.4	-19.4	-25.5
ხმაურის სიმძლავრე	დბმ			-69.2		
Rx ხმაურის კოეფიციენტი	დბ	15	10	12	15	10
ხმაურის ჯამური სიმძლავრე	დბმ	-54.2	-59.2	-57.2	-54.2	-59.2
Rx SNR	დბ	-0.5	18.5	17.7	34.8	33.7
Rx SNR - მიწოდების SNR	დბ	-17.2	1.8	1.0	18.1	17.0

ცხრილი 2.1. ლინკის ბიუჯეტის გამოთვლა

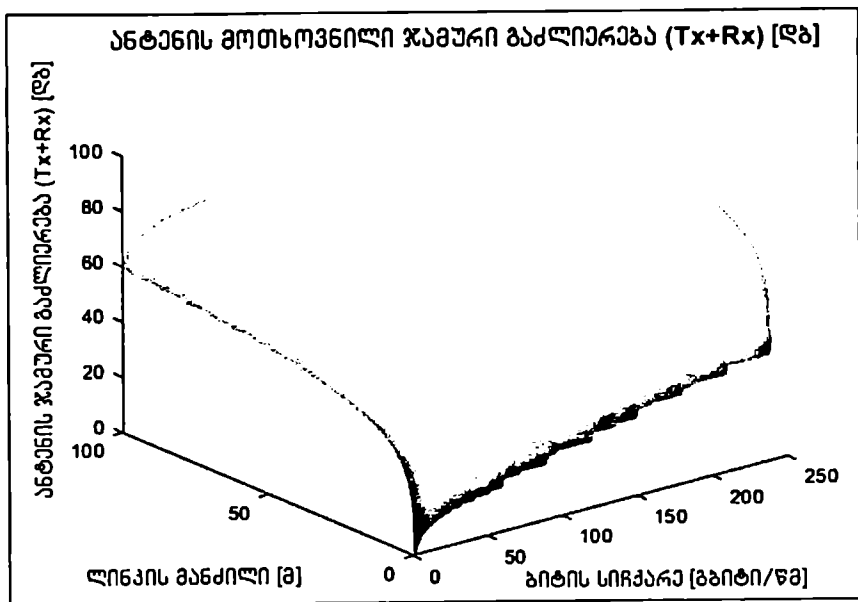


ნახ. 2.3. შერჩეული RF სისტემის პარამეტრების ურთიერთდამოკიდებულება

ცხადია, რომ შენობის გარეთ არსებული ლინკები დამოკიდებულია ამინდის პირობებზე, რაც იწვევს პრობლემებს ტერაჰერცულ სიხშირულ დიაპაზონში სისტემების პროექტირებისას. დამატებით აღვნიშნავთ, რომ ჩვენ განვიხილავდით LoS კავშირს და ტრანსიეფერებს შორის ხაზის სრულყოფილ გასწორებას. თუ ჩვენ დავამატებთ, მაგალითად ლინკის ზღვარს, რომელიც შეიძლება ტოლი იყოს 6 დბ-ის, ლინკის მიღწევადი დიაპაზონი შემცირდება ორჯერ. 6 დბ ზღვარი შეიძლება შეესაბამებოდეს არეკვლას საკმაოდ კარგი ამრეკლავი ზედაპირიდან, ან ლინკის ორივე ბოლოში ანტენის ნახევარსიმძლავრეიანი სხივის არასათანადო გასწორებას.

ნახ. 2.4-ზე მოცემულია მოთხოვნები ანტენის მთლიან გაძლიერებაზე ($T_x + R_x$), რაც წარმოდგენილია, როგორც ლინკისა მანძილის და ბიტის სიჩქარის ფუნქცია, სისტემის შერჩეულ პარამეტრებთან მიმარ-

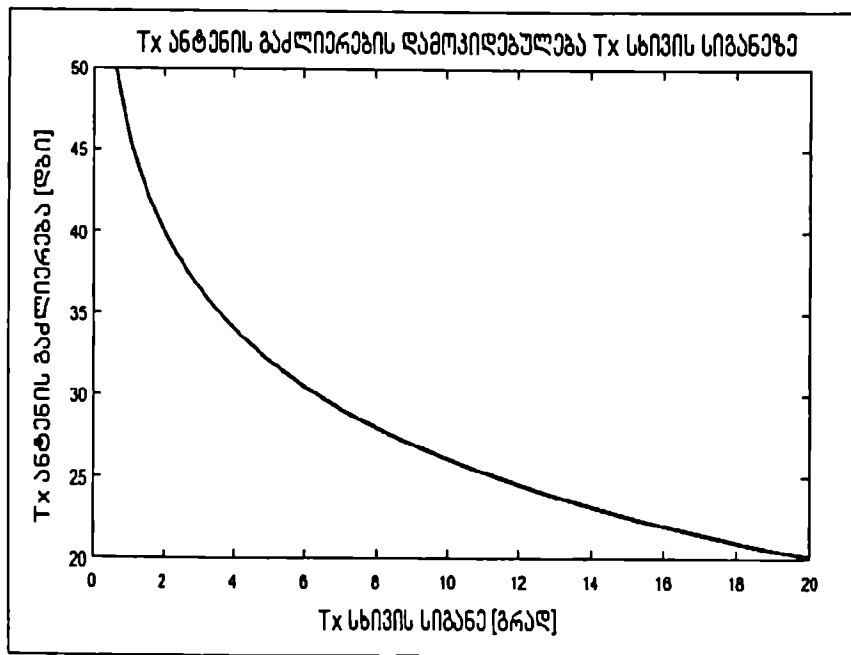
თებაში. 100 გბიტ/წმ სიჩქარე მიიღწევა ლინკის მანძილებისათვის 6.5 მ და 61 მ, თუ ანტენის მთლიანი გაძლიერება, რომელიც გადანაწილებულია გადამცემსა და მიმღებს შორის, არის შესაბამისად, 60 დბი და 80 დბი. ანტენის გაძლიერება გარკვეულწილად დამოკიდებულია ნახევარსიმძლავრიან (-3 დბ) სხივის სიგანესთან. ის ანტენის გაძლიერებიდან კვადრატული ფესვის მნიშვნელობის (წრფივ ერთეულებში) უკუპროპორციულია. ეს აპროქსიმაცია გულისხმობს სიმეტრიულ ანტენის წრიული მიმართულობის დიაგრამას.



ნახ. 2.4 ლინკის პირველი სცენარით მოცემული მოწყობილობისათვის ანტენის სრული გაძლიერების დამოკიდებულება ლინკის მანძილზე

ნახ. 2.5 გვიჩვენებს გამოთვლების შედეგად მიღებულ ნახევარსიმძლავრიანი სხივის სიგანის დამოკიდებულებას ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტზე. მობილურობის მხარდაჭერა, სხივის თვალყურის დევნების თვალსაზრისით, შეიძლება განსაზღვრული იყოს ლინკის მანძი-

ლებზე და ნახევარსიმძლავრეიანი სხივის სიგანეებზე დაფუძნებით. მაგალითად, ლინკის ბიუჯეტის პარამეტრიზაციით ლინკი 2-სთვის, Tx ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტია 26 დბი, რაც შეესაბამება სხივის სიგანეს, განსაზღვრულს 10.2° -იანი კუთხით. ასეთი სხივით მოცული ნახევარსიმძლავრეიანი არეალი დაახლოებით შეადგენს 3.6 მ-ს 10 მ-ის მანძილზე. ამრიგად, მობილურ ტრანსივერს დასჭირდება სხივის ახალი ალოკაცია დაახლოებით ყოველ 3.6 მეტრზე. ბექჰოლის ტრანსივერის მოცემული პარამეტრებისათვის სხივის კუთხე არის 0.4° , რაც ქმნის დიდ სირთულეებს სხივის გასწორების კუთხით და პრაქტიკულად შეუძლებელს ხდის მობილურობას.



ნახ. 25. ანტენის გაძლიერების დამოკიდებულება ნახევარსიმძლავრეიანი სხივის სიგანეზე

2.5. მეორე თავის დასკვნები

მეორე თავში შეფასებულია 300 გჰც-ზე ფუნქციონირებადი, სხვადასხვა ტექნოლოგიით და სირთულით იმპლემენტირებული საკომუნიკაციო ლინკების მანძილები, 6G-ს გამოყენების მოსალოდნელი სცენარების გათვალისწინებით. კომუნიკაციები, ბიტის მაღალი სიჩქარით და სიხშირის გატარების ფართო ზოლით შესაძლებელია, მხოლოდ მოკლე დიაპაზონისთვის, როდესაც ტრანსივერებს, ანტენების ჩათვლით აქვთ მცირე ფორმა-ფაქტორი. ასეთ სცენარებში ლინკის მიღწევადი მანძილი ბიტის მიზნობრივი სიჩქარისათვის 100 გბიტ/წმ შემოიფარგლებოდა 1.3-12.3 მეტრით. შემდეგ, ძალიან დიდი გაძლიერების მქონე ანტენებით, შენობის გარეთა წერტილი-წერტილთან არქიტექტურის ლინკებში, მანძილი შეიძლება მნიშვნელოვნად გაიზარდოს (მაგალითად, აღემატება 3 კმ-ს ბექჰოლის გამოყენებისათვის). გარდა ამისა, გრძელი მანძილების შემცველ შენობის გარეთა ლინკებში, წვიმით გამოწვეული მილევის გავლენა საკმაოდ მნიშვნელოვანია და ძლიერმა წვიმამ შეიძლება მანძილი გაანახევროს. კიდევ ერთი გამოწვევაა, ფაზირებული საანტენო მესრების რეალიზაცია და ძალიან ვიწრო სხივების გასწორების პრობლემა, როგორც მობილურ, ასევე სტატიკურ სცენარებში.

დაფარვის უზრუნველყოფაში დომინირებს Tx სიმძლავრის გამომუშავების შესაძლებლობა, მიმღების ხმაური და გამოყენებული ანტენების გაძლიერება ორივე ლინკის ბოლოებში. ძალიან მაღალი გავრცელების დანაკარგები, რომელებიც თან ახლავს ტერაჰერცულ სიხშირეებს, ანაზღაურდება ძირითადად მაღალი გაძლიერების ანტენებით, ვინაიდან ნახევარგამტარული ტექნოლოგიების გამოყენების გამო, RF სიმძლავრის გენერირებას აქვს კლების ტენდენცია, თუ მას განვიხილავთ, როგორც სიხშირის ფუნქციას. სილიციუმის ტექნოლოგიებზე დაფუძნებული ტრანსივერების ტექნიკური მახასიათებლები უნდა მი-

უახლოვდეს თანამედროვე III-V დონის მახასიათებლებს და არქიტექტურულ ინოვაციებს. ამან შეიძლება ხელი შეუწყოს, მცირე ზომის მოწყობილობებშიც კი, კარგ მახასიათებლებს და დაბალი ფასით ფუნქციონირებას.

მაღალი გაძლიერების მქონე ანტენებს მივყავართ სხივის ვიწრო სიგანედ. ზომიერი მობილურობაც კი ხდება რთული ამოცანა და საჭიროებს როგორც ანტენის კონსტრუირების ადაპტურ გადაწყვეტილებებს, როგორიცაა ლინზური ანტენები გადართვადი სხივით, ასევე სხივების დაჭერისა და თვალყურის დევნების დახვეწილი პროტოკოლები. დიდ მანძილებზე გადაჭიმული ლინკები, როგორც ჩანს, შესაძლებელია მხოლოდ ფიქსირებული ტრანსივერებისათვის, ანტენის ძალიან მაღალი გაძლიერებით, რადგან ანტენები დიდია და მათი სხივები უკიდურესად ვიწრო, მაგალითად, 0.4° . ამასთან, ვიწრო სხივები და გავრცელების მაღალი დანაკარგები ამარტივებს ქსელის დაგეგმვას ინტერფერენციებთან ბრძოლის ტრადიციული მეთოდების გამოყენებისას.

მეორეს მხრივ, სიგნალის სიხშირის გატარების ფართო ზოლს შემოაქვს ინტერფერენციების ახალი სცენარები. RF გადამტანიდან-გადამტანზე ინტერფერენციები შეიძლება არ წარმოადგენდეს კრიტიკულ პრობლემას, მაგრამ დაბალ სიხშირეებზე ფუნქციონირებადმა ფიჭურმა სისტემებმა შეიძლება გავლენა მოახდინოს კომუნიკაციაზე, ელექტრომაგნიტური თავსებადობის (Electromagnetic Compatibility, EMC) მიზეზების გამო, რადგან, ჩვენს მაგალითში, საბაზისო სიგნალის სიხშირის გატარების ზოლის სიგანე ადის 30 გჰც-მდე. აშკარაა, რომ ქვედა მილიმეტრული ტალღების დიაპაზონიდან ტერაჰერცულ სიხშირეებზე გადასვლა არ მოხდება სხვადასხვა საინჟინრო სფეროებში (ელექტრონიკიდან მოყოლებული ალგორითმებამდე) დიდი ტექნოლოგიური მიღწევების გარეშე. შესაბამისად, უდიდესი მნიშვნელობა აქვს ამ შესაძლებლობების ჰოლისტიკურად და რეალისტურად შეფასებას, რო-

დესაც იგეგმება ნაბიჯების გადადგმა 6G კომუნიკაციების მიმართულებით.

მეორე თავში გამოყენებული ლიტერატურა

- J. Chen *et al.*, "Does LO Noise Floor Limit Performance in Multi-Gigabit Millimeter-Wave Communication?" *IEEE Microwave and Wireless Comp. Letters*, vol. 27, no. 8, Aug. 2017, pp. 769-71.
- X. Gu *et al.*, "Development, Implementation, and Characterization of a 64-Element Dual-Polarized Phased-Array Antenna Module for 28-GHz High-Speed Data Communications", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 67, no. 7, July 2019, pp. 2975-84.
- ITU-R Rec. P.838-3, "Specific Attenuation Model for Rain for Use in Prediction Methods", Mar. 2005.
- ITU, "WRC-19 Final Acts", Geneva, Switzerland, Mar. 2020, pp. 1-666.
- T. Kurner, "Turning THz Communications into Reality: Status on Technology, Standardization and Regulation THz Communications", *Proc. 43rd Int'l. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Nagoya, Japan, Sept. 2018.
- S. Mattisson, "An Overview of 5G Requirements and Future Wireless Networks: Accommodating Scaling Technology", *IEEE Solid-State Circuits Mag.*, vol. 10, no. 3, Aug. 2018, pp. 54-60.
- K. Rikkinen *et al.*, "THz Radio Communication: Link Budget Analysis Toward 6G," *IEEE Commun. Magaz.*, vol. 58, no. 11. Nov. 2020, pp. 22-27.
- P. Rodriguez-Vazquez *et al.*, "Signal-Processing Challenges in Leveraging 100 Gb/s Wireless THz", *Proc. 2nd 6G Summit*, Levi, Finland, Mar. 2020.

- N. Sarmah *et al.*, "A Fully Integrated 240-GHz Direct-Conversion Quadrature Transmitter and Receiver Chipset in SiGe Technology", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 64, no. 2, Feb. 2016, pp. 562-74.
- T. Schneider *et al.*, "Link Budget Analysis for Terahertz Fixed Wireless Links", *IEEE Trans. Terahertz Sci. and Tech.*, vol. 2, no. 2, Mar. 2012, pp. 250-56.
- A. Tessmann *et al.*, "A 300 GHz Low-Noise Amplifier S-MMIC for Use in Next-Generation Imaging and Communication Applications", *2017 IEEE MTT-S Int'l. Microwave Symp.*, Honolulu, HI, 2017, pp. 760-63.

თავი 3. IEEE 802.15.3d – სტანდარტიზაციის პირველი ცდები სუბტერაჰერცული სიხშირული დიაპაზონისთვის 6G-ს მიმართულებით

3.1. შესავალი

IEEE 802.15.3 სტანდარტში შესწორებების შეტანის და მოდიფიცირებული IEEE 802.15.3d სტანდარტის რატიფიცირების შემდეგ, გადაიდგა პირველი ნაბიჯი სუბტერაჰერცულ სიხშირულ დიაპაზონში მომხმარებლებისათვის უსადენო კომუნიკაციების სტანდარტიზაციისაკენ. IEEE 802.15.3d გვთავაზობს კომპუტირებულ წერტილი-წერტილთან არქიტექტურის კავშირს, მონაცემთა გადაცემის სიჩქარით 100 გბიტი/წმ და მეტი, ათობით სანტიმეტრიდან რამდენიმე ასეული მეტრის მანძილებზე. ამ თავში, ჩვენ წარმოვადგენთ IEEE 802.15.3d სტანდარტის დეტალიზაციას და დიზაინის ძირითად პრინციპებს, რომლებიც მიღებულია ამ სტანდარტის ფარგლებში. ჩვენ დეტალურად აღვწერთ მიზნობრივ აპლიკაციებს და გამოყენების სცენარებს, აგრეთვე IEEE 802.15.3d ფიზიკური და მედიუმთან წვდომის მართვის ფენების სპეციფიკას. ამის შემდეგ, ჩვენ წარმოვადგენთ IEEE 802.15.3d უსადენო კომუნიკაციების მახასიათებლების პირველადი შეფასების შედეგებს. მახასიათებლებისათვის მიღებული პირველი რიგის შეფასებები აჩვენებს გარკვეულ სარგებლიანობას, 5G უსადენო სისტემების მახასიათებლებთან შედარებით, რითაც გზა ეხსნება 6G ტერაჰერცულ ქსელებს. მესამე თავს ვასრულებთ ტერაჰერცულ სიხშირულ დიაპაზონში ფუნქციონი-

რებადი უსადენო ქსელებისათვის შემდგომი ღონისძიებების აღწერით სტანდარტიზაციისა და მარეგულირებელი ღონისძიებების კუთხით.

3.2. 6G-ს კონცეფცია და ახალი სტანდარტის შემუშავების წინაპირობები

მიმართული უსადენო კომუნიკაციები მილიმეტრული დიაპაზონისთვის (30-300 გჰც), ეს არის ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი სიახლე, რომელიც შემოტანილი იქნა 5G უსადენო ქსელებში. 3GPP პროექტის მიერ NR ტექნოლოგიისთვის, მილიმეტრული კომუნიკაციები 28 გჰც და 73 გჰც სიხშირეებზე 2 გჰც-მდე სიხშირის გატარების ზოლით, საშუალებას იძლევა განხორციელდეს მონაცემთა გაცვლა რამდენიმე გბიტ/წმ-ის სიჩქარით. მილიმეტრული ტალღების NR-ის სტანდარტიზაციის პროცესის საწყისი ეტაპი დასრულდა 2018 წელს და პირველი საცდელი განლაგებების განთავსება უკვე დაიწყო ევროპაში, იაპონიაში, დიდ ბრიტანეთში და ამერიკის შეერთებულ შტატებში.

დროის ამ გრაფიკის შესაბამისად, მილიმეტრული ტალღების კომუნიკაციების გამოყენება 60 გჰც-ზე, ასევე რატიფიცირებულია IEEE-ს მიერ, თავდაპირველად, მაღალი გარჩევადობის ვიდეო გამოსახულების უსადენო ლინკით გადასაცემად (IEEE 802.15.3c – 2009 წლის სტანდარტი) და შემდეგ 2012 წლის IEEE 802.11ad სტანდარტის შესაბამისად, უსადენო ადგილობრივი ქსელებისათვის (Wireless Local Area Network, WLAN). ქვეყნის სპეციფიკური რეგულაციების გათვალისწინებით, IEEE 802.11ad ტერმინალებში შესაძლებელია 6-მდე 2.16 გჰც-იანი არხის მხარდაჭერა. IEEE ამჟამად მუშაობს სხვა მილიმეტრული ტალღების შემდგომ სპეციფიკურ მახასიათებლებზე (IEEE P802.11ay – სტანდარტი), რომლის დასრულებაც ივარაუდება უახლოეს მომავალში.

5G დონის მობილური მილიმეტრული ტალღების კომუნიკაციების განვითარება ახლა თითქმის დასრულებულია და ვენდორები ატარებენ ტესტირებას, მათი ადრეულ დანერგვის მიზნით. ამრიგად, სამეცნიერო კვლევების ფოკუსირება გადატანილია მომავალ უსადენო ქსელებთან დაკავშირებული ხედვების, მოთხოვნებისა და ტექნოლოგიების განსაზღვრისაკენ. 5G-ში მილიმეტრული ტალღების დანერგვის სირთულის გამო, მრავალი დაინტერესებული მხარე თანხმდება, რომ შემდეგი თაობის სისტემები (ხშირად მოიხსენიებიან როგორც 5G +) პირველ რიგში გააუმჯობესებენ მონაცემთა გაცვლის ეფექტურობას არსებულ 28-73 გჰც-იან ზოლებში. ამავდროულად, 100 გჰც-ზე მეტი სიხშირის ათვისება იგეგმება 6G და მის ზემოთა გადაწყვეტილებებისთვის, როგორც ახალი აპლიკაციების ძირითადი მასტიმულირებელი ფაქტორი, რომლებიც ითხოვენ მომხმარებლის გადაცემის ულტრა მაღალ სიჩქარეებს, რაც აღემატება ათობით გბიტ/წმ-ს.

6G-ს კონცეფცია ამჟამად განვითარების ძალიან ადრეულ ეტაპზეა. როგორც უკვე აღვნიშნეთ, განსაკუთრებით გათვალისწინებულია ისეთი ფუტურისტული სცენარების მხარდაჭერა, როგორიცაა მომატებული და ვირტუალური რეალობის სისტემების ყველგან შეღწევა, ჰოლოგრაფიული ტელეპორტაცია და ავტონომიური რობოტების მიერ კოლექტიური მართვა. ტექნოლოგიის თვალსაზრისით სავარაუდო 6G ქსელები, ასევე გათვალისწინებულია მთელი რიგი სიახლეების დანერგვისთვის. ეს მოიცავს სრულ დუპლექსურ უსადენო კომუნიკაციებს, მანქანური სწავლების დანერგვას სისტემების სხვადასხვა მახასიათებლების ოპტიმიზაციისთვის, მულტირადიო და მულტიკავშირებთან დაკავშირებულ გადაწყვეტილებების მიღებას და მრავალ სხვას. რაც შეეხება მონაცემთა გადაცემის უკიდურეს სიჩქარეებს, 6G სისტემები, სავარაუდოდ, შეავსებენ მიკროტალღური და მილიმეტრული ტალღების კავშირის პარამეტრებს უსადენო კომუნიკაციებისათვის 100 გჰც-ზე გაცილებით მაღალი სიხშირეებისათვის, განსაკუთრებით ტერაჰერ-

ცული დიაპაზონის კომუნიკაციებით (300 გჰც – 3 ტჰც) და ხილული სინათლის კომუნიკაციებით (VLC, 400-800 ტჰც), ამასთან ორივე მათგანი უზრუნველყოფს ათეულ, ასობით ან თუნდაც ათასობით გჰც-ის უწყვეტ სიხშირულ ზოლებს. აკადემიური წრეების, ინდუსტრიის, სტანდარტიზაციისა და მარეგულირებელი ორგანოების ძირითადი წარმომადგენლები აქტიურად იკვლევდნენ ასეთი კომუნიკაციების მიზანშეწონილობას ბოლო ათწლეულის განმავლობაში. VLC-სთვის ამ მცდელობამ ახლახან მიგვიყვანა IEEE 802.15.7-2018 სტანდარტის შექმნამდე, სადაც შეჯამებულია PHY ფენის და MAC ქვეფენის გამოყენებასთან დაკავშირებული ტექნიკური პარამეტრები პერსპექტიული ოპტიკური უსადენო კომუნიკაციებისათვის.

IEEE-ს მიერ ტერაჰერცული დიაპაზონის უსადენო კომუნიკაციების სტანდარტიზაცია დაიწყო 2008 წლის დასაწყისში, როდესაც 802.15 ქოლგის ქვეშ შეიქმნა ტერაჰერცული ინტერესების ჯგუფი (Terahertz Interest Group, IGthz). კონსტრუირების კუთხით ძირითადად არჩევანმა და ჯგუფის წევრების მიერ გაკეთებულმა მახასიათებლების წინასწარმა პროგნოზებმა 2014 წელს საფუძველი ჩაეყარა IEEE სამუშაო ჯგუფს (Task Group, TG), რომელსაც დაერქვა TG100G და რომელსაც უნდა ემუშავა IEEE 802.15.3d სტანდარტზე. TG100G-ს მიერ შემუშავებული პირველი IEEE სტანდარტი უსადენო კომუნიკაციებისთვის დაბალი ტერაჰერცული (ანუ სუბტერაჰერცული) დიაპაზონისთვის, კერძოდ, IEEE 802.15.3d სტანდარტი, ოფიციალურად დამტკიცდა 2017 წლის შემოდგომაზე. მიუხედავად იმისა, რომ ძირითადი კონტრიბუტორები ამჟამად მუშაობენ თავიანთ პროტოტიპულ გადაწყვეტილებებზე, შემუშავებული სპეციფიკაციების შესაბამისად, სტანდარტის წარმატებით მიღება მოითხოვს მისი ძირითადი მახასიათებლების და არსებული შეზღუდვების უკეთ გააზრებას ფართო კვლევითი წრეების მიერ.

შემდგომ პარაგრაფებში ჩვენ წარმოვადგენთ IEEE 802.15.3d სტანდარტის მიმოხილვას, რომელიც არის უსადენო კომუნიკაციებისათვის

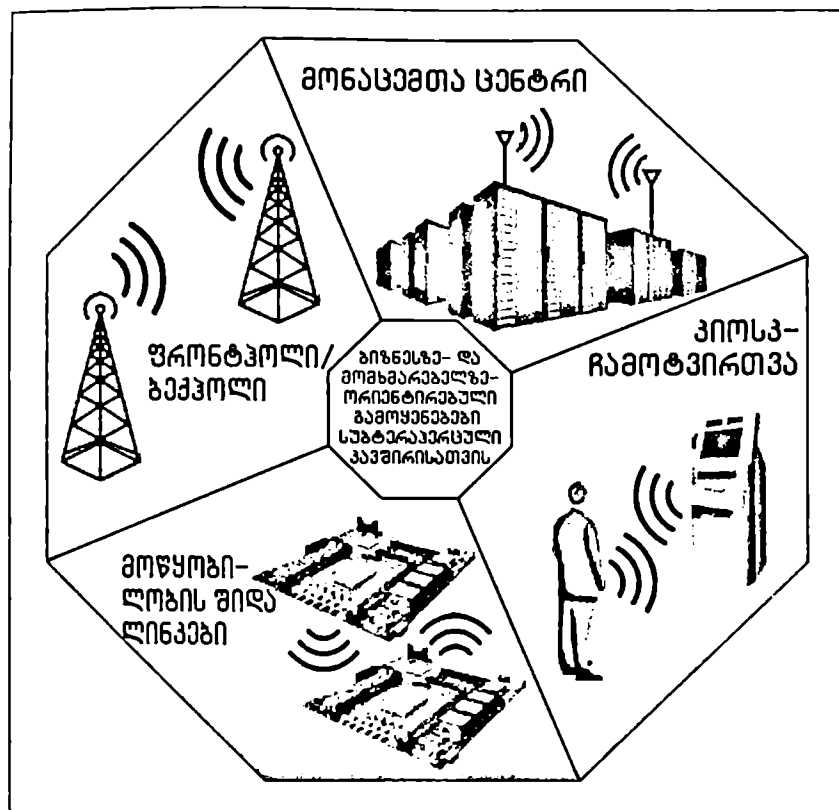
IEEE ოჯახის პირველი სტანდარტი 69 გჰც სიხშირული ზოლის სიგანის არხისათვის სუბტერაჰერცულ დიაპაზონში (კერძოდ, 253-322 გჰც სიხშირულ დიაპაზონში). თავდაპირველად ჩვენ განვიხილავთ მიზნობრივ აპლიკაციებს და გამოყენების სცენარებს. შემდეგ წარმოვადგენთ MAC და PHY ფენების მთავარ დეტალებს. გაანალიზებული იქნება მახასიათებლების პირველადი შეფასებები. მესამე თავის ბოლოს ჩვენ წარმოვადგენთ სამომავლო სამუშაოებს, რომლებიც დაკავშირებულია ტერაჰერცულ დიაპაზონში კომუნიკაციების განვითარებასა და სტანდარტიზაციის საკითხებთან.

3.3. IEEE 802.15d სტანდარტის მოტივაცია და გამოყენების სცენარები

როგორც უკვე აღვნიშნეთ, შემოთავაზებული 802.15.3-2017d სტანდარტი მიღებულია ადრე შემუშავებული 2016 წლის IEEE 802.15.3 სტანდარტში შესწორებების შეტანის შედეგად. ის განსაზღვრავს უსადენო PHY ფენას, რომელიც მუშაობს 100 გბიტ/წმ სიჩქარით და ითვალისწინებს სიჩქარეების უფრო დაბალი მაჩვენებლებით ფუნქციონირებასაც. აქ, ძირითადი მიზანია, სუბტერაჰერცულ სიხშირეებზე კომუნიკაციების შესაძლებლობის ილუსტრაცია, აგრეთვე ისეთი სტანდარტის წარმოდგენა, რომელიც უზრუნველყოფს კავშირს სისტემის რეალიზაციის დაბალი სირთულითა და მაღალი სიჩქარით. სიჩქარის ეს მაჩვენებლები საკმარისად მაღალია გამოყენებების ახალი პროგრამებისთვის (ნახ. 3.1), სადაც გათვალისწინებულია საკომუნიკაციო მანძილის შემცირება, და რომლებიც აღწერილია ამ პარაგრაფში.

IEEE 802.15.3d სტანდარტი, როგორც უსადენო კომუნიკაციებისათვის სტანდარტიზაციის ერთ-ერთი პირველი მცდელობა 300 გჰც-ზე, პირველ რიგში მიზნად ისახავს ისეთი გამოყენების საშუალებების შექ-

მნას, რომლებიც შესაძლებელია რეალიზებულ იქნას ელექტრონიკის მიღწევების ამჟამინდელი დონის გათვალისწინებით.



ნახ. 3.1. IEEE 802.15d-ს მიზნობრივი გამოყენებები

აღსანიშნავია, რომ განსახორციელებელი განთავსებები შემოიფარგლება მოწყობილობებს შორის წერტილი-წერტილთან არქიტექტურის მქონე ლინკებისათვის, რომლებიც მონაცემთა გაცვლის დროს რჩებიან სტატიკური ან კვაზისტატიკური. ეს უკანასკნელი თვისება მნიშვნელოვან განსხვავებას იძლევა IEEE 802.11 ოჯახის სტანდარტებისაგან (განსაკუთრებით IEEE 802.11ad და IEEE P802.11ay სტანდარტებისაგან),

რომლებიც ძირითად მიზნად ისახავენ 60 გჰც სიხშირეზე მობილურ კომუნიკაციებს წერტილი-მრავალწერტილთან პრინციპით, მონაცემთა გადაცემის უფრო დაბალი სიჩქარეებით.

საკომუნიკაციო ლინკების სტაციონარული და თავისი ბუნებით წერტილი-წერტილთან არქიტექტურა, საშუალებას იძლევა შევამციროთ IEEE 802.15.3d სტანდარტის MAC-ის სირთულე, ვინაიდან მრავალჯერად წვდომაზე და ინტერფერენციებზე მოთხოვნები შემსუბუქებულია. გარდა ამისა, შეიძლება გამოყენებულ იქნას პირველადი წვდომისა და მოწყობილობის აღმოჩენის უფრო მარტივი პროცედურები. რეალიზაციის დაბალი სირთულის გარდა, შემცირებულია ზედნადები სასიგნალო ხარჯები, რაც საშუალებას იძლევა უფრო მაღალი იყოს მონაცემთა გადაცემის საქსელო სიჩქარე. კვანძების მობილურობის, აგრეთვე მრავალარხიანი წვდომის მხარდაჭერა, განიხილება როგორც პერსპექტიული მიმართულება სამომავლო მუშაობისთვის.

3.3.1. ფრონტჰოლის და ბექჰოლის უსადენო ლინკები

დაგეგმილი გამტარუნარიანობის მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად, მომავალი უსადენო ქსელები ითვალისწინებს მილიმეტრული ტალღების მცირე ფიჭების ულტრა მკვრივ განლაგებას ხალხმრავალ ადგილებში. აქ, ერთ-ერთი გამოწვევაა მილიმეტრული ტალღების ფიჭასა და ძირითად ქსელს (Core Network, CN) შორის საიმედო და მაღალი სიჩქარის ბექჰოლის კავშირის დამყარება. გარდა ამისა, როდესაც პატარა ფიჭა აღჭურვილია რამდენიმე დაშორებული რადიოსათავო მოწყობილობით (Remote Radio Head, RRH), საჭიროა სტაბილური და სწრაფი ფრონტჰოლის კავშირი RRH-ებსა და საბაზისო სიხშირული ზოლის მოწყობილობას (Baseband Unit, BBU) შორის.

აქ, ოპტიკურ-ბოჭკოვანი კავშირების მასიური გამოყენება, ზრდის ტრანსპორტირების ხარჯებს და ართულებს მილიმეტრული ტალღე-

ბის მცირე ფიჭების განთავსებას. ამიტომ, შემოთავაზებულია უსადენო ალტერნატივა, რომელიც შეავსებს ოპტიკურ კავშირებს რთულ პირობებში ფუნქციონირებისას. მიდგომა მოიხსენიება, როგორც ინტეგრირებული წვდომა და ბექჰოლი (Integrated Access and Backhaul, IAB), და გულისხმობს მილიმეტრული ტალღების წვდომის ტექნოლოგიის ხელმეორე გამოყენებას ბექჰოლისთვის. ეს გადაწყვეტილება საკმაოდ გონივრულია, მაგრამ ასეთ შემთხვევაში მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე შეზღუდულია. წარმოდგენილი IEEE 802.15.3d აერთიანებს ორივე ვარიანტის ძლიერ მხარეს. ერთის მხრივ, სტანდარტი მხარს უჭერს მონაცემთა გადაცემის სიჩქარეს, დაახლოებით 100 გბიტ/წმ-ს, რაც გაცილებით აღემატება თანამედროვე მილიმეტრული ტექნოლოგიებით უზრუნველყოფილ სიჩქარეს, მეორეს მხრივ, IEEE 802.15.3d-ის გამოყენება მნიშვნელოვნად ამარტივებს საკაბელო კომუნიკაციებთან დაკავშირებულ პრობლემებს.

3.3.2. დამატებითი უსადენო ლინკები მონაცემთა ცენტრებში

IEEE 802.15.3d-ით გათვალისწინებული მიმართული კავშირები ასევე შეიძლება გამოყენებულ იქნას სერვერების დგარებს შორის უსადენო კავშირებისთვის მონაცემთა დამუშავების მომავალ ცენტრებში. აქ, ერთ-ერთი დაბრკოლებაა, მონაცემთა ეფექტური გაცვლის უზრუნველყოფა გამოთვლით კვანძებსა და შენახვის კვანძებს შორის. ამჟამინდელი გადაწყვეტილებები ძირითადად იყენებენ მაღალი სიჩქარის Ethernet-ს ოპტიკურ-ბოჭკოვანი ხაზების საშუალებით. ამასთან, მრავალი საკაბელო არხის საჭიროება ართულებს რეკონფიგურაციის შესაძლებლობას და გაგრილების პროცესს, რადგან ხდება ჰაერის ზოგიერთი ნაკადის გადაკეტვა. დღეს აქტიურად შეისწავლება ალტერნატიული გადაწყვეტა, რომელიც გულისხმობს მაღალსიჩქარიანი წერტილი-წერტილთან არქიტექტურის უსადენო ლინკების გამოყენებას დგარების

ერთმანეთთან დაკავშირებისას. ასეთი მიდგომა ხელს შეუწყობს მონაცემთა ცენტრების უფრო მოქნილ დიზაინს და ასევე შეამცირებს კაბელების რაოდენობას. IEEE 802.15.3d მიზნად ისახავს უზრუნველყოს ასეთ „დგარებს შორის“ კავშირი, რითაც ავსებს ოპტიკურ-ბოჭკოვან ხაზებს ზოგიერთ განთავსებებში.

3.3.3. კიოსკ-ჩამოტვირთვები

ბიზნესზე ორიენტირებულიდან სამომხმარებლო სცენარზე გადასვლის პროცესში, IEEE 802.15.3d მიზნად ისახავს მაღალი დონის მონაცემთა გაცვლას ახლომდებარე კომუნიკაციებისთვის. აქ ორი ქვეკატეგორიაა:

- მოწყობილობებს შორის (Device-to-Device, D2D) კომუნიკაციები;
- კიოსკ-ჩამოტვირთვა (ტერმინალ-ჩამოტვირთვა).

სტანდარტიზებული სუბტერაპერგული ლინკი გვთავაზობს ერთი რიგით მაღალ გამტარუნარიანობას არსებულ და ახლო პერიოდში მოსალოდნელ გადაწყვეტილებებთან შედარებით, რომლებიც დაკავშირებულია მიკროტალღოვანი ან თუნდაც, მილიმეტრულ ტალღების დიაპაზონისთვის ახლო რადიუსში მოქმედი უსადენო კომუნიკაციის სისტემებთან. კერძოდ, 2-საათიანი ფილმის (900 მბაიტი) ჩამოტვირთვის დრო მცირდება დაახლოებით 10 წმ-იდან (IEEE 802.11ac) 0.1 წმ-მდე (IEEE 802.15.3d).

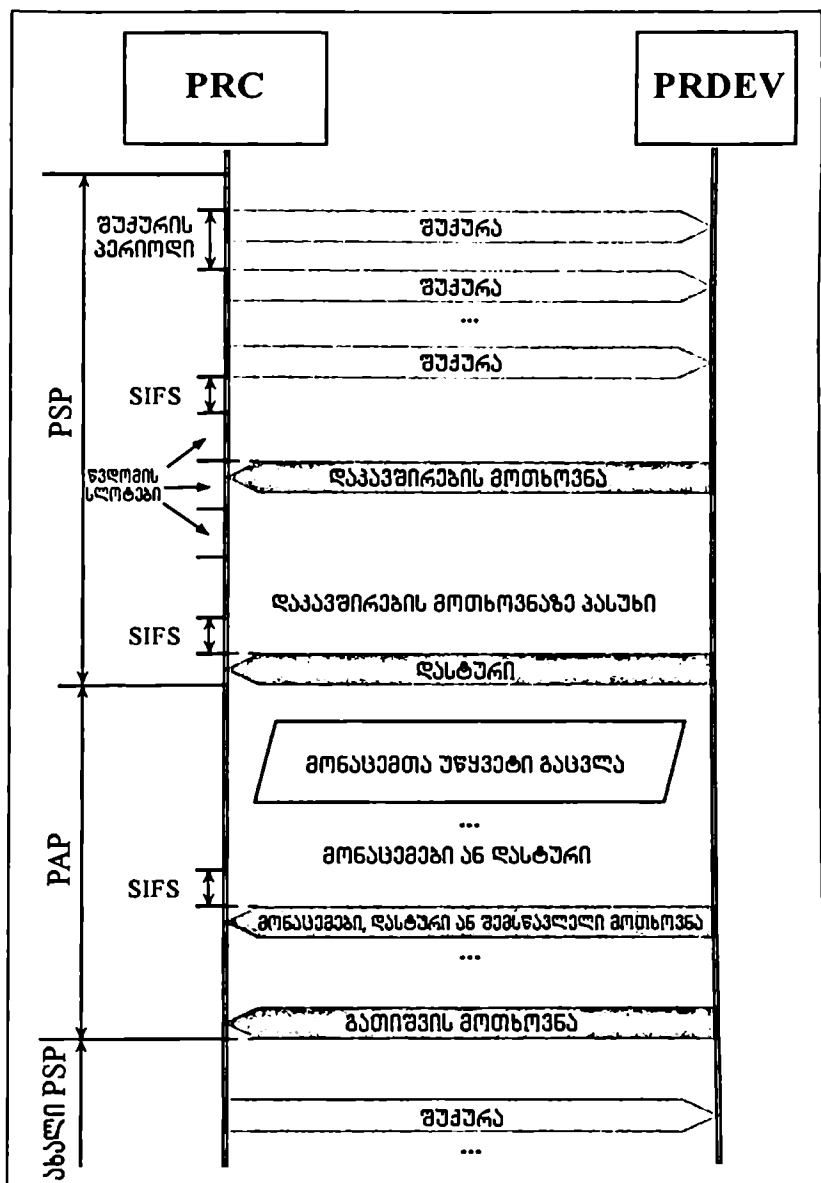
3.3.4. მოწყობილობის შიდა კავშირები

დიაპაზონის შემდგომი შემცირებით, არა მარტო სამომხმარებლო მოწყობილობები, არამედ ელექტრონული კომპონენტებიც ერთი მოწყობილობის შიგნით, შეიძლება იყოს დაკავშირებული IEEE 802.15.3d-სთან. დღეისათვის, თანამედროვე კომპიუტერები უკვე აღჭურვილია რამდენიმე მაღალი სიჩქარის სადენიანი ლინკებით, რომლებიც ერთმა-

ნეთთან აკავშირებს, მაგალითად, ცენტრალური პროცესორის ბლოკს (Central Processing Unit, CPU) ოპერატიულ მეხსიერებასთან შემთხვევითი წვდომით (Random Access Memory, RAM) და ქსელის ინტერფეისის მიკროსქემებთან. გარდა ამისა, უკიდურესად რთული გადაწყვეტილებები გამოიყენება განვითარებად მასიურ მრავალბირთვიან პროცესორებში, გამოთვლითი ბირთვებისა და საერთო ქეშ-მეხსიერების დასაკავშირებლად. კომპიუტერებში მონაცემთა გაცვლის სწრაფი ზრდა იწვევს მათი დიზაინის გართულებას. მაგალითად, თანამედროვე დედაპლატებს უკვე აქვთ 12 ფენა, ხოლო მომავალი პროცესორებისთვის შექმნილი „ქსელები კრისტალზე“ იკავებს პროცესორის სივრცის და ენერგიის მოხმარების 30 პროცენტს. აქ, IEEE 802.15.3d გვთავაზობს შესაძლო ალტერნატივას, რაც უზრუნველყოფს მაღალსიჩქარიან მონაცემთა გადაცემის ღირებულებას კრიტიკულ კომპონენტებს შორის, ხოლო ამავედროულად ამარტივებს განთავსების დიზაინს.

3.4. IEEE 802.15.3d MAC ფენა

IEEE 802.11 და უსადენო ადგილობრივი ქსელის (WLAN) სხვა სტანდარტებისაგან განსხვავებით, IEEE 802.15.3d მხარს უჭერს მხოლოდ წერტილი-წერტილთან არქიტექტურის კომუნიკაციებს. სტანდარტი განიხილავს IEEE 802.15.3e-სთვის განსაზღვრულ MAC ფენას და, ამრიგად, იყენებს ე. წ. წყვილოვანი ქსელის (Pairnet) კონცეფციას, რომელიც აკავშირებს არაუმეტეს ორ მოწყობილობას. კომუნიკაციების წერტილი-წერტილთან ხასიათი ზღუდავს შესაძლო გამოყენების შემთხვევების დიაპაზონს, მაგრამ ამავედროულად ამცირებს ინტერფერენციების და „წვდომისთვის ბრძოლის“ პრობლემას. წყვილოვანქსელიანი MAC ფენის ძირითადი სიგნალების მაღალი დონის აღწერა მოცემულია ნახ. 3.2-ზე.



ნახ. 3.2. IEEE 802.15.3d-ში წყვილოვანსელიანი MAC ფენა

კომუნიკაციები იყოფა ორ ძირითადად პერიოდად:

1. წყვილოვანი ქსელის აწყობის პერიოდი (Pairnet Setup Period, PSP);
2. წყვილოვან ქსელთან დაკავშირების პერიოდი (Pairnet Associated Period, PAP).

PSP-ს განმავლობაში, ერთ-ერთი მოწყობილობა, სახელწოდებით წყვილოვანი ქსელის კოორდინატორი (Pairnet Coordinator, PRC), ქმნის წყვილოვან ქსელს და პერიოდულად ახორციელებს შუქურების მოქმედებას, რომლებიც შეიცავენ ქსელის დეტალებს. შუქურის ფრეიმში შედის ინფორმაცია წვდომის სლოტების რაოდენობისა და ხანგრძლივობის შესახებ, რომელთა გამოყენებაც შეუძლია მოწყობილობას, რომელსაც სურს შეუერთდეს წყვილოვან ქსელს. შემდეგ სხვა მოწყობილობა, რომელიც მზად არის შეუერთდეს წყვილოვან ქსელს (მას ეწოდება წყვილოვანი ქსელის მოწყობილობა (Pairnet Device, PRDEV)) პასუხობს შუქურას, დაკავშირების მოთხოვნის გაგზავნით ერთ-ერთი განსაზღვრული წვდომის სლოტის დასაწყისში. დაკავშირების მოთხოვნის წარმატებით მიღების შემდეგ, PRC წყვეტს შუქურების მოქმედებას და დაკავშირების მოთხოვნაზე პასუხს უგზავნის PRDEV-ს, რითაც ამთავრებს PSP-ს. წყვილოვანი ქსელის დაყენების გარდა, PSP-ს დროს შეიძლება განხორციელდეს უფრო მაღალი ფენის პროტოკოლის დაყენება, როგორიცაა ინტერნეტ პროტოკოლი (Internet Protocol, IP) ან ობიექტების გაცვლის ფაილების გადაცემა (Object Exchange File Transfer, OBEX). ვინაიდან დაკავშირების მოთხოვნისა და დაკავშირების მოთხოვნაზე რეაგირების ფრეიმებს გააჩნიათ ველები, რათა მოიცვან უფრო მაღალი ფენის პროტოკოლის ინფორმაცია, ამიტომ ხორციელდება აღნიშნული დამატებების მხარდაჭერა. მეორე პერიოდი – PAP იწყება დაკავშირების მოთხოვნაზე დადებითი რეაგირების მიღებით და ემდევნება მონაცემთა რეალურ გაცვლას. ამ პერიოდის განმავლობაში PRC და PRDEV გადاسცემენ მონაცემთა ფრეიმებს და ოპციურ დადასტურებებს, დაწყებული PRDEV-ით. PAP-ის დროს გადაცემული ფრეიმები გამოყოფილია ფრე-

იმებს შორის განსაზღვრული მოკლე სივრცეებით (Short Interframe Space, SIFS). როდესაც ერთ-ერთ კვანძს კომუნიკაციის შეწყვეტა სურს, ის აგზავნის გათიშვის მოთხოვნას. PRC-ს ასევე შეუძლია დაასრულოს PAP, თუ განსაზღვრული ტაიმ-აუტის დროს PRDEV-დან არ იყო მიღებული შეტყობინება. თუ PRDEV-ს არ სურს შეწყვიტოს კომუნიკაციები, მაგრამ არა აქვს რეალური გადასაცემი მონაცემები, მას შეუძლია გადასცეს შემსწავლელი მოთხოვნა PRC-ს ტაიმ-აუტის ქრონომეტრის გადატვირთვისთვის. ყოველთვის, როდესაც PAP დასრულებულია (ან გათიშვის მოთხოვნით ან ტაიმ-აუტით), PRC გადადის ისევ PSP-ზე, განაგრძობს შუქურებიდან გადაცემას და ელოდება ახალ კავშირებს.

3.5. IEEE 802.15.3d PHY ფენა

3.5.1. ზოგადი მიმოხილვა

IEEE 802.15.3d-ში PHY ფენას აქვს ორი რეჟიმი:

- ტკც ერთი გადამტანის (Single Carrier) რეჟიმი (ტკც-SC PHY);
- ტკც ჩართვა-გამორთვის (On-off Keying) რეჟიმი (ტკც-OOK PHY).

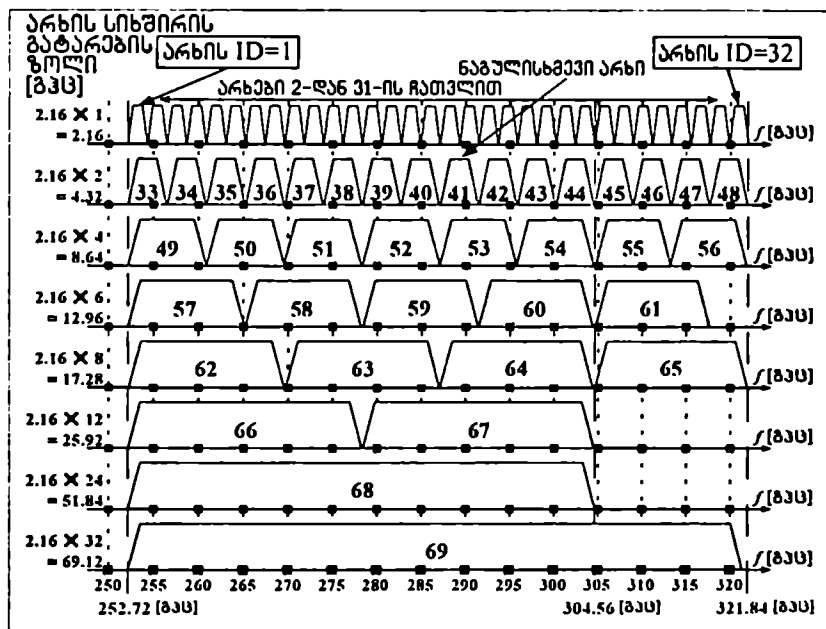
ამ PHY რეჟიმებიდან პირველი, ტკც-SC PHY, შექმნილია მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარისთვის. ეს რეჟიმი, პირველ რიგში, ორიენტირებულია სიხშირის გატარების ზოლის ადრინდელი გამოყენების ისეთ შემთხვევებზე, როგორებიცაა ფრონტპოლი/ბექპოლი და მონაცემთა ცენტრში დამატებითი ლინკები. თავის მხრივ, მეორე რეჟიმი, ტკც-OOK PHY, გამიზნულია სუბტერაპერცული სიხშირული დიაპაზონის დაბალი ღირებულების მოწყობილობებზე, რომლებსაც არ აქვთ კომპლექსური სიგნალების გამოყენების შესაძლებლობა და, ამიტომ, უნდა დაეყრდნონ ინფორმაციას სიგნალთა ამპლიტუდის შესახებ. მაგალითად, ეს ეხება გადაწყვეტილებებს, რომლებიც იყენებენ რეზონანსულ გვირაბულ დიოდებს (Resonant Tunneling Diodes, RTDs). მიუხედა-

ვად ამისა, ათობით გბიტ/წმ გადაცემის სიჩქარე შეიძლება მიღწეული იქნას ტკე-OOK PHY-ით, როდესაც გამოიყენება ყველაზე უფრო ფართო არხები.

3.5.2. მხარდაჭერილი არხები

IEEE 802.15.3d შეიძლება მუშაობდეს სუბტერაპერცულ სიხშირეებზე 252.72 გჰც-დან 321.84 გჰც-მდე. საერთო ჯამში, სულ გვაქვს 69 გადართული არხი (ნახ. 3.3). არსებობს 8 მხარდაჭერილი, არხის სიხშირის გატარების ზოლი, დაწყებული 2.16 გჰც-დან (როგორც ეს მილიმეტრული ტალღების 2012 წლის IEEE 802.11ad სტანდარტშია) დამთავრებული მასიურ 69 გჰც-მდე. გამოყენების შემთხვევიდან და აპარატურის შესაძლებლობებიდან გამომდინარე, ან მთელი სიხშირის დიაპაზონი შეიძლება იყოს განკუთვნილი ერთი 69.12 გჰც-იანი ფართო არხისთვის (CHNL_ID = 69), ან ის შეიძლება გადანაწილდეს რამდენიმე მცირე არხზე. არხების სიხშირის გატარების ზოლები არიან 2.16 გჰც-ს ჯერადი. არხი საიდენტიფიკაციო ნომრით 41 და სიხშირის გატარების ზოლით 4.32 გჰც (2×2.16 გჰც) არის ნაგულისხმევი (Default) არხი.

მსოფლიო რადიოკონფერენციაზე (WRC-19) მიღებული გადაწყვეტილების შესაბამისად, ნახ. 3.3-ზე გამოსახული ყველა სიხშირული ჯგუფი ხელმისაწვდომია ტერაპერცული კომუნიკაციებისთვის გლობალურად (ITU-ს ყველა რეგიონისათვის), თუკი შესრულებულია რადიოასტრონომიული სამსახურების და დედამიწის შემსწავლელი თანამგზავრული სამსახურების დაცვის კონკრეტული პირობები, რაც შემდგომ იქნება განხილული. ეს პირობები მკაფიოდ არ აკონკრეტებს გადაცემის სიმძლავრის რაიმე შეზღუდვას და პრაქტიკაში გამოიყენება, პირველ რიგში, მიწისზედა რადიოასტრონომიული სადგურების მიმდებარე ვიწრო არეალებში.



ნახ.3.3. IEEE 802.15.3d არხების განაწილება

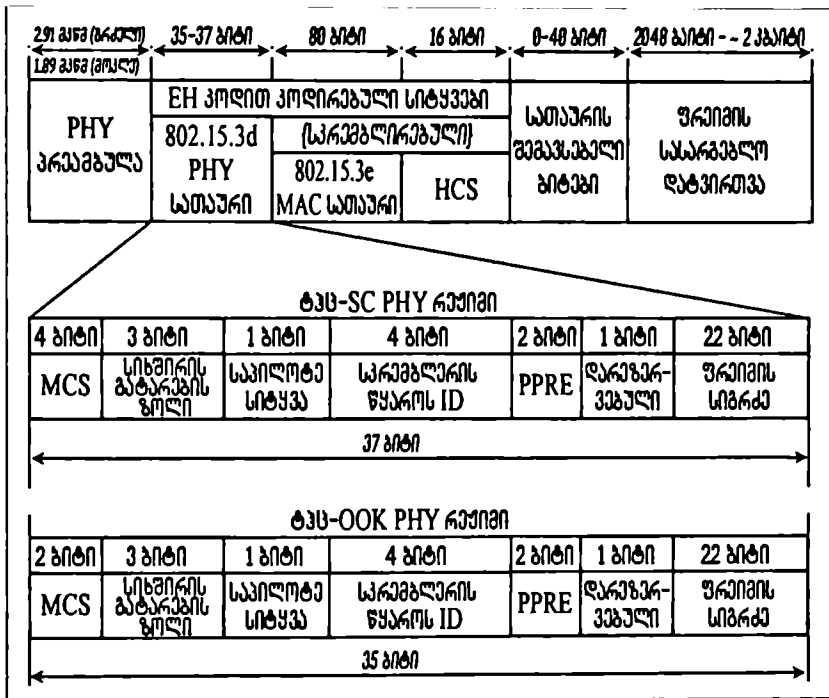
3.5.3. ტკც-SC PHY ფენის რეჟიმი

ტკც-SC რეჟიმი, უპირველეს ყოვლისა, გათვლილია მაღალსიხშირის კომუნიკაციებისათვის. აქ ფრეიმის სიგრძე მერყეობს 2 048 ბაიტიდან 2 099 200 ბაიტამდე, და არ შეიცავს PHY პრეამბულას ან საბაზისო სათაურს. ტკც-SC PHY მხარს უჭერს ექვს განსხვავებულ მოდულაციას. პირველი ოთხია – ორობითი ფაზური მოდულაცია (Binary Phase Shift Keying, BPSK), კვადრატული ფაზური მოდულაცია (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK), 8-ობითი ფაზური მოდულაცია (8-ary Phase Shift Keying, 8PSK) და 8-თი ამპლიტუდურ-ფაზური მოდულაცია (8-ary Amplitude Phase Shift Keying, 8APSK). რეჟიმი ასევე მხარს უჭერს კვადრატული ამპლიტუდური მოდულაციის კონსტელაციებს 16 და 64 სიგნალური წერტილებით – 16QAM და 64QAM. შეცდომების პირდაპირი

გასწორება (Forward Error Correction, FEC) ხორციელდება ორი დაბალი სიმკვრივის ლუწობის შემმოწმებელი (Low Density Parity Check Code, LDPC) კოდით: ან მაღალი 14/15 სიჩქარის მქონე LDPC (1440,1344) კოდით ან შედარებით დაბალი 11/15 სიჩქარის მქონე LDPC (1440,1056) კოდით. BPSK და QPSK მოდულაციები სავალდებულოა ტპც-SC რეჟიმისთვის; დანარჩენები არასავალდებულოა.

ფრეიმის ფორმატი, რომელიც გამოიყენება ტპც-SC რეჟიმში, ილუსტრირებულია ნახ. 3.4-ზე. ფრეიმი იწყება PHY პრეამბულით, რაც ხელს შეუწყობს ფრეიმის აღმოჩენას, სინქრონიზაციის დამყარებას და მიმღებში არხის შეფასებას. არსებობს PHY პრეამბულის ორი ვარიანტი: გრძელი ვერსია გადაიცემა PSP-ს დროს, ხოლო მოკლე ვერსია გადაიცემა PAP-ის დროს. პრეამბულას მოჰყვება PHY სათაური, რომელიც დეტალურადაა აღწერილი ნახ. 3.4-ზე.

ორივე MAC და PHY სათაურები დაცულია სათაურის შემმოწმებელი თანმიმდევრობით (Header Check Sequence, HCS), რომელიც ახორციელებს სიჭარბის ციკლურ შემოწმებას (Cyclic Redundancy Check, CRC), კერძოდ, CRC-16-ის გამოყენებით. საიმედოობის გასაზრდელად, PHY სათაურის, MAC სათაურისა და HCS-ს კომბინაცია კოდირებულია გაფართოებული ჰემინგის (Extended Hamming, EH) კოდზე დაფუძნებულ კასკადურ კოდურ სიტყვებში. კოდის ბლოკს შეიძლება დამატოს სათაურის შესავსები დამატებითი ბიტები, მასში მონაცემთა ნაწილის ისეთი სიგრძის მისაღებად, რომელიც ტოლია მთელი რიცხვის. დაბოლოს, სათაურის შემავსებელ ოპტიურ ბიტებს მოსდევს ფრეიმის სასარგებლო დატვირთვა (Payload), ანუ ფრეიმის მონაცემთა არე, რომელიც შეიცავს გაგზავნილ ან მიღებულ ინფორმაციას.



ნახ. 3.4. IEEE 802.15d ფორმის ფორმატი

3.5.4. ტჟ-OOK PHY ფენის რეჟიმი

განსხვავებით ტჟ-SC რეჟიმისა, რომელიც მიზნად ისახავს მონაცემთა გადაცემის მაქსიმალურად მაღალ სიჩქარეს, IEEE 802.15.3d PHY ფენის ტჟ-OOK რეჟიმი განკუთვნილია უფრო მარტივი მოწყობილობებისთვის. ამ რეჟიმის გამოყენების ძირითადი შემთხვევებია კიოსკ-ჩამოტვირთვა და მოწყობილობაში შიდა კომუნიკაციები, როგორც ეს აღწერილია. ამ რეჟიმში, მიზნობრივი გადაცემის დიაპაზონი, არ აღემატება რამდენიმე მეტრს. ტჟ-OOK რეჟიმი მხარს უჭერს დაბალი სირთულის მოდულაციის ერთ სქემას – ჩართვა-გამორთვის დილაკით (OOK), სადაც მონაცემები წარმოდგენილია, როგორც გადამტანი ტალ-

დის არსებობა (ლოგიკური 1) ან არარსებობა (ლოგიკური 0). OOK მოდულაციის თავზე მხარდაჭერილია სამი FEC სქემა: (240,224) რიდ-სოლომონის კოდი სავალდებულოა ამ რეჟიმისთვის, რადგან ის საშუალებას იძლევა, მოვახდინოთ მარტივი დეკოდირება „რბილი“ გადაწყვეტილების ინფორმაციის გარეშე. FEC-ის დანარჩენი ორი ვარიანტი LDPC-ზე დაფუძნებული სქემები, რომლებიც აღწერილია წინა ქვეპარაგრაფში. ისინი არასავალდებულოა ტპვ-OOK რეჟიმისთვის და საშუალებას იძლევიან დეკოდირებისას გამოყენებულ იქნას რბილი გადაწყვეტილების შემცველი ინფორმაცია.

ფრეიმის სტრუქტურა, რომელიც გამოიყენება ტპვ-OOK რეჟიმში, მსგავსია იმ სტრუქტურისა, რომელიც გამოიყენება ტპვ-SC რეჟიმში (ნახ. 3.4) მხოლოდ მცირე განსხვავებებით. კერძოდ, რადგან არსებობს მხოლოდ ერთი მოდულაცია (OOK), პლუს სამი FEC ვარიანტი, ამიტომ, მხოლოდ ორი ბიტი გამოიყენება PHY სათაურში, რომ განისაზღვროს მიმდინარე მოდულაციისა და კოდირების სქემა (Modulation and Coding Scheme, MCS), განსხვავებით ოთხი ბიტისა, რაც გამოიყენება ტპვ-SC-ში. სხვა ველები იდენტურია, რითაც ტპვ-OOK PHY სათაური ორი ბიტით მოკლეა, ვიდრე ანალოგიური სათაური ტპვ-SC რეჟიმისთვის. მიმღების მიზნობრივი მინიმალური მგრძნობიარობის დონე ამ ორი რეჟიმისთვის ერთი და იგივეა და ტოლია 67 დბმ-ის (11/15 სიჩქარის მქონე LDPC კოდით და ყველაზე უფრო ვიწრო 2.16 გჰც სიხშირის გატარების ზოლით).

3.5.5. მახასიათებლების საწყისი შეფასება

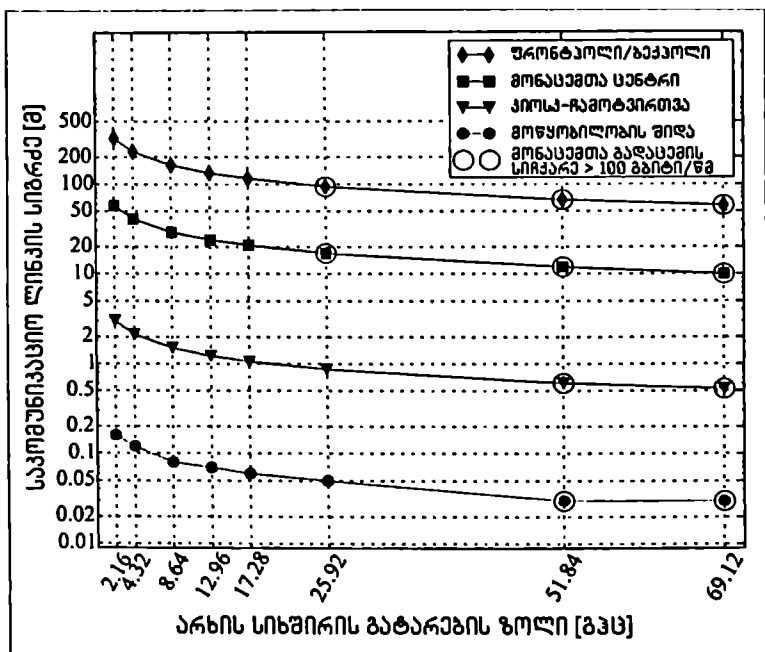
ამ ნაწილში ჩვენ წარმოვადგენთ, IEEE 802.15.3d მახასიათებლებთან დაკავშირებულ პირველად შედეგებს.

პირველ რიგში, გავიხსენებთ PHY-ფენის მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის მაქსიმალურ მაჩვენებლებს, რომლებიც მიღებულია IEEE

802.15.3d სტანდარტისათვის (კერძოდ, განვიხილავთ ცხრილს 13-4 ტპც-SC რეჟიმისთვის და ცხრილს 13-12 ტპც-OOK რეჟიმისათვის, აღნიშნული სტანდარტის აღწერილობიდან). განიხილება წერტილი-წერტილთან კავშირის არქიტექტურა და იგულისხმება, რომ სიგნალისა და ხმაურის თანაფარდობა საკმარისად მაღალია, რათა გარანტირებული იყოს ბიტზე ძალიან მცირე შეცდომის ალბათობა (Bit Error Rate, BER) შერჩეულ MCS-თან მიმართებაში. მონაცემთა სიჩქარე ტპც-OOK რეჟიმისათვის იცვლება 1.64 გბიტ/წმ-დან (ყველაზე უფრო ვიწრო 2.16 გბიტ-იანი არხისთვის) 52.56 გბიტ/წმ-მდე (ყველაზე ფართო 69.12 გბიტ-იანი არხისთვის). თანამედროვე ტპც-SC-ს შეუძლია თეორიულად ხელი შეუწყოს მაღალ 315.39 გბიტ/წმ-მდე გადაცემის სიჩქარეებს 64QAM მოდულაციით და 14/15 სიჩქარის მქონე LDPC კოდით.

საკომუნიკაციო მანძილის მნიშვნელოვანი მახასიათებლები ნაჩვენებია ნახ. 3.5-ზე. ეს ნახაზი ასახავს PRC-სა და PRDEV-ს შორის მაქსიმალურ მანძილს, რაც ჯერ კიდევ საშუალებას იძლევა, განხორციელდეს მონაცემთა საიმედო გაცვლა და ეს მანძილი მოცემულია, როგორც არხის სიხშირის გატარების ზოლის ფუნქცია.

ჩატარებული კვლევების საფუძველზე შემუშავებული იყო ლინკის დონის სიმულატორი. გამოყენების თითოეული შემთხვევისთვის, სიმულატორი იყენებს შესაბამისი აპლიკაციების მიხედვით სპეციფიკურ პარამეტრებს და არხების მოდელებს სუბტერაპერცული კომუნიკაციისთვის. ეფექტური 64QAM მოდულაცია გამოიყენება გრძელი მანძილებისათვის განკუთვნილი ინსტალაციებისათვის (ფრონტჰოლი/ბექჰოლი და მონაცემთა ცენტრი). უფრო ხელშეშლამდგრადი 8APSK მოდულაცია გამოიყენება კიოსკის გადმოსაწერად და მოწყობილობებს შორის კომუნიკაციებისათვის. გამოყენების ყველა შემთხვევა დაფუძნებულია მაღალი სიჩქარის მქონე 14/15 LDPC კოდზე. ძირითადი მოდელირების პარამეტრები მოცემულია ცხრილში 3.1.



ნახ. 3.5. კომუნიკაციის მიღწევადი მანძილი და სიჩქარეები IEEE 802.15d-ს მიზნობრივი გამოყენებების შემთხვევებში

	გსმ/უმტს ბაჰკალი	გსმ სანტარი	კოსკ- ბამტპირთვა	გსმ შიდა
Tx სიმძლავრა	25 დბმ	10 დბმ	0 დბმ	0 დბმ
Tx ბაჰლიარება	30 დბ	30 დბ	24 დბ	6 დბ
Rx ბაჰლიარება	30 დბ	30 დბ	12 დბ	6 დბ
ბაჰმტანი სიხშირე	300 მჰც			
Rx ხმაურის კოეფიციენტი	8 დბ			
შესაღების ვარგის სიღიდა	[-22 - -3] დბ, დამოკიდებულია არჩეულ MCS-ზე და არხის სიხშირის გატარების ზოლზე			

ცხრილი 3.1. მოდელირების ძირითადი პარამეტრები

ნახ. 3.5-ის შესაბამისად, საკომუნიკაციო მანძილი მერყეობს სანტი-მეტრებიდან მოწყობილობებისათვის შიდა კავშირებისათვის და რამდენიმე ასეულ მეტრამდე ფრონტპოლისა და ბექპოლისათვის. ამავე დროს, როგორც ლიტერატურაშია აღწერილი, მაღალ მიმართულობის ანტენების გამოყენება სავალდებულოა როგორც PRC, ასევე PRDEV მხარეებზე, განსაკუთრებით დიდ მანძილებზე ფუნქციონირებადი ფრონტპოლისა და ბექპოლისათვის. ანტენის გაბლიერების კოეფიციენტი, რომელიც ტოლია ან აღემატება 30 დბ-ს საჭიროა სივრცეში გავრცელების დანაკარგისა და შთანთქმის შესამსუბუქებლად. ნახ. 3.5 ასევე გვიჩვენებს მაქსიმალურ მიღწევად მანძილს, რა მანძილზეც შენარჩუნებულია 100 + გბიტ/წმ მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე. ეს მნიშვნელობები აღწევს დაახლოებით 100 მ-ს ფრონტპოლისა და ბექპოლისათვის, 17 მ-ს მონაცემთა ცენტრისთვის, 0.61 მ-ს კოსკ-ჩამოტვირთვისთვის და 0.03 მ-ს (3 სმ) მოწყობილობის შიდა კავშირისთვის. შედეგები რამდენჯერმე დაბალია, ვიდრე 2.16 გჰც-იანი არხის საშუალებით მიღწევადი მნიშვნელობები, რაც ხაზს უსვამს, მანძილის დიაპაზონსა და ლინკის დონის მუშაობას შორის გაცვლით თანაფარდობას. პრაქტიკული დანერგვის დროს, ოპერატორებს შეუძლიათ არეგულირონ დიაპაზონის ეს ბალანსი, კონკრეტული აპლიკაციისა და განთავსების შესაბამისად.

თუ შევაჯამებთ, შეიძლება ითქვას, რომ IEEE 802.15.3d-ის მახასიათებლების წინასწარი შეფასება აჩვენებს, რომ გადაცემის სიჩქარესთან და მანძილის დიაპაზონთან დაკავშირებული მოთხოვნები დაკმაყოფილებულია აღწერილი გამოყენების ყველა შემთხვევაში. ამის მიუხედავად, ჯერ კიდევ მიმდინარეობს უფრო დეტალური შეფასებები, რომელთა მიზანია დაზუსტდეს შედეგები კონკრეტულ პრაქტიკულ გამოყენებებში, როგორიცაა უსადენო ბექპოლი რეალურ გარემოში და მონაცემთა ცენტრები განთავსების რთული ტოპოლოგიით.

3.6. ტერაჰერცული სიხშირული დიაპაზონის სტანდარტიზაციის მიმართულებით წინ გადადგმული ნაბიჯები

3.6.1. ტერაჰერცულ დიაპაზონში კომუნიკაციების მარეგულირებელი ასპექტები 6G-ში

როგორც უკვე აღინიშნა, ტერაჰერცული კომუნიკაციები წარმოადგენენ ერთ-ერთ კანდიდატს, რომელიც უზრუნველყოფს მონაცემთა გადაცემის მაღალ სიჩქარეს 6G ქსელებში. ტერაჰერცულ სისტემებს არ შეუძლიათ დიდი მანძილების რადიუსში დაფარვის შენარჩუნება და, შესაბამისად, ისინი არ იქნებიან შესაფერისი ზოგადი დანიშნულების 6G საეთერო ინტერფეისისთვის. მიუხედავად ამისა, ტერაჰერცული კომუნიკაცია იქნება მნიშვნელოვანი კომპონენტი, რომელიც უზრუნველყოფს მონაცემთა გადაცემის არხებს უაღრესად მაღალი გადაცემის სიჩქარით. ამის ხელშესაწყობად, ცოტა ხნის წინ, WRC 19-ის შემდეგ, ტერაჰერცული კომუნიკაციებისთვის გაიხსნა უპრეცედენტოდ დიდი 160 გჰც სპექტრი და 2020 წლის რადიორეგლამენტში შევიდა ახალი ჩანაწერი (ფუტნოტი) 5.564A, რომელშიც აღწერილია 275-450 გჰც სიხშირული დიაპაზონის გამოყენების პირობები მიწისზედა მობი-ლური და ფიქსირებული სამსახურებისათვის.

მარეგულირებელ პროცესში გაანალიზებული ერთ-ერთი მთავარი საკითხია, ტერაჰერცული კომუნიკაციებიდან წარმოქმნილი შესაძლო ინტერფერენციები დედამიწასა და დედამიწის ორბიტას შორის არსებულ ლინკებზე. ეს ეფექტი ბოლო წლების განმავლობაში ინტენსიურად არის შესწავლილი. შედეგად, პასიურ სერვისებთან სიხშირული სპექტრის გაზიარება მაინც აუცილებელია, მითითებული სიხშირული დიაპაზონის გარკვეულ ნაწილებში. ამის საპირისპიროდ, 252-296 გჰც-ის, 306-313 გჰც-ის, 318-333 გჰც-ის და 356-450 გჰც-ის დიაპაზონებში, არ

არის აუცილებელი პირობების დაწესება (EESS) სამსახურის დასაცავად და არსებობს კარგად მართვადი პირობები რადიოასტრონომიული სამსახურების (Radio Astronomy Service, RAS) დასაცავად. ამრიგად, ძალიან დიდი სიხშირული დიაპაზონები უკვე ხელმისაწვდომია მომავალი ტერაჰერცული საკომუნიკაციო სისტემებისთვის.

წარმოდგენილი WRC გამოყოფები გლობალურია; ისინი მთელს მსოფლიოში მოქმედებენ და საფუძველს ქმნიან შემდგომი მარეგულირებელი საქმიანობისთვის. დღეისათვის არ არის განსაზღვრული გადამცემი სიმძლავრის დონის კონკრეტული შეზღუდვები. 2021 წელს, სავარაუდოდ, გამოჩნდება დამატებითი რეგონული და ეროვნული რეგულაციები. ეს რეგულაციები მოჰყვება ზოგადად მიღებულ შეთანხმებებს, რომლებიც შეჯამებულია WRC-19-ს მიერ, მაგრამ შესაძლოა მათ წარმოგვიდგინონ უფრო მეტი დეტალები, მაგალითად, განსაზღვრონ სიმძლავრეების დაშვებული დონეები, სიხშირეთა ქვედიაპაზონების განაწილება და საჭირო თანაარსებობის მექანიზმების აუცილებლობა და ხასიათი.

3.6.2. IEEE 802.15d სტანდარტის პროტოტიპების შექმნა

დღეისათვის, აქტიურად მიმდინარეობს სამუშაოები IEEE 802.15.3d დიაპაზონებში მოქმედი გამჭოლი (End-to-End) საკომუნიკაციო სისტემების დანერგვის კუთხით. ახალი გადაწყვეტილებები ძირითადად მიღებულია მასშტაბური კვლევებისა და ინფრასტრუქტურული პროექტების ფარგლებში. კერძოდ, ევროკავშირი-იაპონიის პროექტის THoR ფარგლებში შემუშავებული დემონსტრატორი სისტემა იყენებს სპეციალურად შემუშავებულ მიკროსქემებს. ისინი დაფუძნებულია იგივე MCS-ებზე, რომლებიც განსაზღვრულია ტ3გ-SC PHY რეჟიმისთვის. კიდევ ერთი გადაწყვეტილება, რომელიც დაფუძნებულია RTD-ებზე, წარმოდგენილია ევროკავშირის H2020 პროექტში iBROW და მისი მიზანია უზრუნველყოს რეალიზაციის დაბალი სირთულე და დანახარ-

ჯების ეფექტურობა, რომელიც უფრო შესაფერისია ტ3გ-OOK რეჟიმისთვის.

ამ პროტოტიპების კუთხით, რამდენიმე წლის წინ დაწყებულმა აქტივობებმა მიიღო შემდეგი განვითარება IEEE 802.15.3d სპეციფიკაციის საბოლოო დამტკიცებით, აგრეთვე WRC-19-ზე დიდი რაოდენობის სიხშირეების გამოყოფით. აქ, ბოლო მაგალითია ტრანსივერის მიკროსქემა, რომელსაც შეუბლია გამოიყენოს ნახ. 3.3-ზე მოცემული (49-51)-ე და 66-ე არხები. დაგეგმილია, პროტოტიპების შექმნის მიმართულებით შემდგომი სამუშაოების შესრულება, ახალი გადაწყვეტილებების მიღების და სუბტერაპერცული რადიოლინკებისათვის საჭირო ტექნიკის შექმნის შემდეგ.

3.7. მესამე თავის დასკვნები და პერსპექტიული განვითარების გზები

IEEE 802.15.3d განსაზღვრავს უსადენო ტერაპერცულ კავშირებს მხოლოდ ფიქსირებული წერტილი-წერტილთან არქიტექტურის ლინკებისთვის, სადაც:

- ცნობილია ანტენების მიმართულებები ლინკის ორივე ბოლოში;
- ინტერფერენციებთან ბრძოლა შესაძლებელია ლინკის სწორად დაგეგმვით;
- ბრძოლა წვდომისთვის არ არსებობს.

სავარაუდო ტერაპერცულ WLAN ქსელში ეს პირობები არ არის დაცული. ამიტომ, ჯერ უნდა შემუშავდეს სათანადო გადაწყვეტილებები ჩამოთვლილი ასპექტების განსახილველად და არსებული პრობლემის გადასაჭრელად.

ამ სფეროში ახალი სამეცნიერო ნაშრომების გამოქვეყნების შემდეგ, შესაბამისი ალგორითმები უნდა შევიდეს სტანდარტებში. რამდენიმე

შესაძლებლობა ამჟამად განიხილება IEEE 802.15 TAG THz ჯგუფის და სხვა ჯგუფების მიერ, როგორცაა IEEE 802.15.3d-სთვის ახალი შესწორებების შემუშავება, IEEE 802.11-ის სამომავლო გამოცემებში 802.15.3d ცალკეული შერჩეული მახასიათებლების ჩართვა, ან სრულიად ახალი სტანდარტის შექმნა. დღეისათვის, IEEE 802.15 TAG THz ასევე იკვლევს ფიზიკურ და ლინკის ფენებთან დაკავშირებულ ახალ გადაწყვეტილებებს 10-100 გჰც-იანი სიგანის არხებზე სუბტერაჰერცულ და ტერაჰერცულ სიხშირულ დიაპაზონებში. ამ გზაზე, IEEE 802.15.3d-სთვის წარმოდგენილი იდეები და მიღებული გადაწყვეტილებები ხელს შეუწყობენ ტერაჰერცული კომუნიკაციების პრაქტიკულ დანერგვას, აგრეთვე, შექმნიან საფუძველს 6G უსადენო სისტემების პერსპექტიული გამოყენებისათვის.

მესამე თავში გამოყენებული ლიტერატურა

- S. Abadal *et al.*, "On the Area and Energy Scalability of Wireless Network-on-Chip: A Model-Based Benchmarked Design Space Exploration", *IEEE Trans. Net.*, vol. 23, no. 5, Oct. 2015, pp. 1501-13.
- A. A. Boulogeorgos *et al.*, "Terahertz Technologies to Deliver Optical Network Quality of Experience in Wireless Systems Beyond 5G", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 6, June 2018, pp. 144-51.
- A. Fricke, "Channel Modeling Document (CMD)", IEEE 802.15-14-0310-19-003d, Mar. 2016.
- M. Giordani *et al.*, "Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 3, Mar. 2020, pp. 55-61.

- IEEE Std 802.15.3d–2017, “IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-Media Networks – Amendment 2: 100 Gb/s Wireless Switched Point-to-Point Physical Layer”, Oct. 2017, pp. 1-55.
- IEEE Std 802.15.3e–2017, “IEEE Standard for High Data Rate Wireless Multi-Media Networks – Amendment 1: High-Rate Close Proximity Point-to-Point Communications”, June 2017, pp.1-78.
- ITU, “WRC-19 Final Acts,” Geneva, Switzerland, Mar. 2020, pp. 1-666.
- ITU, Radio Regulations, Articles, vol. 1, 2020, pp. 1-442.
- B. K. Jung *et al.*, “Simulation and Automatic Planning of 300 GHz Backhaul Links”, *Proc. IRmmWTHz*, Sept. 2019, pp. 1-3.
- T. Kurner *et al.*, “Applications Requirement Document (ARD)”, IEEE 802.15-14-0304-16-003d, May 2015.
- T. Kurner, “Summary of Results from TG3d Link Level Simulations”, IEEE 802.15-17-0039-04-003d, Feb. 2017.
- S. Lee *et al.*, “9.5 An 80Gb/s 300GHz-Band Single-Chip CMOS Transceiver”, *Proc. IEEE ISSCC*, Feb. 2019, pp. 170-72.
- V. Petrov *et al.*, “IEEE 802.15d: First Standardization Efforts for Sub-Terahertz Band Communication toward 6G”, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 11, Nov. 2020, pp. 28-33.
- V. Petrov *et al.*, “On Unified Vehicular Communications and Radar Sensing in Millimeter-Wave and Low Terahertz Bands”, *IEEE Wireless Commun.*, vol. 26, no. 3, June 2019, pp. 146-53.
- T. S. Rappaport *et al.*, “Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond”, *IEEE Access*, vol. 7, June 2019, pp. 78729-57.

- C. Saha *et al.*, "Millimeter Wave Integrated Access and Backhaul in 5G: Performance Analysis and Design Insights", *IEEE JSAC*, vol. 37, no. 12, Dec. 2019, pp. 2669-84.
- K. Samdanis *et al.*, "The Road Beyond 5G: A Vision and Insight of the Key Technologies", *IEEE Network*, vol. 34, no. 2, Mar./Apr. 2020, pp. 135-41.

თავი 4. 6G ტერაპერცულ სიხშირეებზე გამჭოლი სრული სტეკის ქსელების დანერგვის პერსპექტივები

4.1. შესავალი

ნახევარგამტარული ტექნოლოგიების ბოლოდროინდელმა განვითარებამ გამოიწვია განსაკუთრებული ინტერესი ტერაპერცული სიხშირული დიაპაზონის მიმართ, როგორც ტბიტი/წმ კომუნიკაციის საშუალებამ 6G ქსელებში. უნდა აღინიშნოს, რომ აქამდე ჩატარებული კვლევების უმეტესობა ფოკუსირებული იყო ტერაპერცული მოწყობილობების ფიზიკური თვისებების გააზრებაზე, სქემებზე, ტალღების გავრცელებაზე და ფიზიკური ფენისათვის გადაწყვეტილებების შესწავლაზე. ამასთან, ამ ტექნოლოგიის ინტეგრირება რთულ მობილურ ქსელებში მოითხოვს სრული საკომუნიკაციო სტეკის სწორად შემუშავებას – ქსელის პროექტირების, მართვის, კოორდინაციის, ენერგოეფექტურობის და გამჭოლი, ანუ ქსელის ბოლოების ერთმანეთთან კავშირის (End-to-End Connectivity) საკითხების გათვალისწინებით. მეოთხე თავში მოცემულია იმ პრობლემების მიმოხილვა, რომელთა გადალახვა საჭირო, რათა ტერაპერცული სპექტრი შეტანილი იქნას მობილურ ქსელებში, MAC-ის, ქსელის და სატრანსპორტო ფენის პერსპექტივის გათვალისწინებით, ტერაპერცულ კავშირებზე მონაცემთა გამჭოლი ნაკადის მახასიათებლების შესაბამისად.

4.2. ტერაჰერცული ქსელების განვითარების საკვანძო სფეროები

მოსალოდნელია, რომ უსადენო კომუნიკაციების მკვლევარები ფუნდამენტურად ჩამოაყალიბებენ ციფრული საზოგადოების მოსალოდნელ სიახლეებს 2030 წლამდე. მობილური ტრაფიკის უპრეცედენტო ზრდამ მოითხოვა სპექტრის ახალი ნაწილის ინტეგრირება 5G მობილურ ქსელებში, ანუ მილიმეტრული ტალღების დიაპაზონში. 3GPP უკვე განიხილავს სიხშირული დიაპაზონის გაფართოებას 71 გჰც-მდე 3GPP NR-სთვის, რადგან უფრო მაღალი გადამტანი სიხშირეები უფრო დიდი სიხშირის გატარების ზოლით გამოირჩევა. ამ მიზეზით, ტერაჰერცული ზოლები განიხილება, როგორც 6G ქსელებში მონაცემთა მაღალი გადაცემის სიჩქარის შესაძლო უზრუნველყოფელი ფაქტორები. მართლაც, სიხშირულ სპექტრს 100 გჰც-დან 10 ტჰც-მდე ახასიათებს აუთვისებელი ზოლების ფართო ნაწილები კომუნიკაციებისა და ზონდირებისთვის და, როგორც მესამე თავში აღინიშნა, IEEE-მ შეიმუშავა ფიზიკური ფენა, რომელიც მოიცავს 50 გჰც-ს ტოლ გატარების ზოლს 275 გჰც-დან 325 გჰც-მდე დიაპაზონში.

ამასთან ერთად, ტერაჰერცულმა სიხშირეებმა უკიდურესობამდე გაართულა ქვედა მილიმეტრული ტალღების დიაპაზონის საკომუნიკაციო და ქსელური გამოწვევები. კერძოდ, სიგნალის გავრცელების მკაცრი გარემო იწვევს გზაში მაღალ დანაკარგებს, რომელიც ტალღის სიგრძის კვადრატის (შესაბამისად, ანტენის ერთი ელემენტის ზომის) უკუპროპორციულია, და, გარდა ამისა, ასევე იწვევს მაღალ მოლეკულურ შთანთქმას, სიხშირეთა გარკვეულ დიაპაზონებში. უფრო მეტიც, ტერაჰერცული სიხშირის სიგნალები ვერ აღწევენ ჩვეულებრივ მასალებში და, ამგვარად, ექვემდებარებიან ბლოკირებას. დაბოლოს, ტერაჰერცული მოწყობილობების წარმოების პროცესი, წლების განმავლობაში იყო დიდი პრობლემა და მხოლოდ ელექტრონიკისა და ფოტონი-

კის ბოლოდროინდელმა მიღწევებმა დასაბამი დაუდო პორტატული ტერაპერცული აღჭურვილობის კონსტრუირებას.

ამის მიუხედავად, წამში მრავალგიგაბიტიანი გამტარუნარიანობის დაპირებამ გამოიწვია კვლევითი ძალისხმევის ზრდა ამ გამოწვევების დასაძლევად, ახალი ეფექტური და მაღალი ხარისხის ფიზიკური ფენის ტექნოლოგიების გამოყენებით. მრავალი კვლევა ფოკუსირებულია კომუნიკაციების მანძილების გაზრდაზე მაკრო სცენარებში და სიგნალის გენერაციასა და მოდულაციაზე. მაღალი მიმართულობის მქონე ანტენები გამოიყენება გზაში გაზრდილი დანაკარგების შესამცირებლად, რადგან მათ შეუძლიათ სიმძლავრის ფოკუსირება ვიწრო სხივებში, რაც ზრდის ლინკის ბიუჯეტს და ასევე აძლიერებს კავშირების უსაფრთხოებას, ანუ უფრო რთული ხდება მიყურადება. გარდა ამისა, ტერაპერცული მცირე ტალღის სიგრძე საშუალებას იძლევა მრავალი ანტენის ელემენტი მოთავსებული იქნას მცირე ფორმა-ფაქტორში (1024 ელემენტი 1 მმ²-ზე და 1 ტპც-ზე), რაც, თავის მხრივ, საშუალებას იძლევა გამოყენებულ იქნას ულტრა მასიური MIMO ტექნიკა და საანტენო მესრის ქვემესრებად დაყოფის გადაწყვეტილებები; დაბოლოს, რეკონფიგურირებად ელექტრონულ ზედაპირებს შეუძლიათ იმოქმედონ, როგორც ჰიპერსიგნალიზაცია და გადასაცემი დაბლოკვა არაპირდაპირი ხედვის (NLoS) დროს.

ამასთან, ეს კვლევები ძირითადად ფოკუსირებული იყო ფიზიკური ფენის და RF მიკროსტრუქტურის მოდელირებაზე, პროექტირებაზე და ოპტიმიზაციაზე. საბოლოოდ, კლიენტსა და სერვერს შორის გადასვლების მხოლოდ მცირე ნაწილი იქნება ტერაპერცულ ლინკებზე. ამიტომ, აუცილებელია ამ ტექნოლოგიის მახასიათებლების შესწავლა და გააზრება რთულ გამჭოლ ქსელებში ინტეგრაციის გათვალისწინებით, სადაც პროტოკოლის სტეკის მრავალი კვანძი და ფენა ურთიერთქმედებს, რომ მიაწოდოს პაკეტები ორ აპლიკაციას შორის კავშირის ორ დამაბოლოებელ წერტილში. უფრო მეტიც, ტერაპერცულ დიაპაზონში

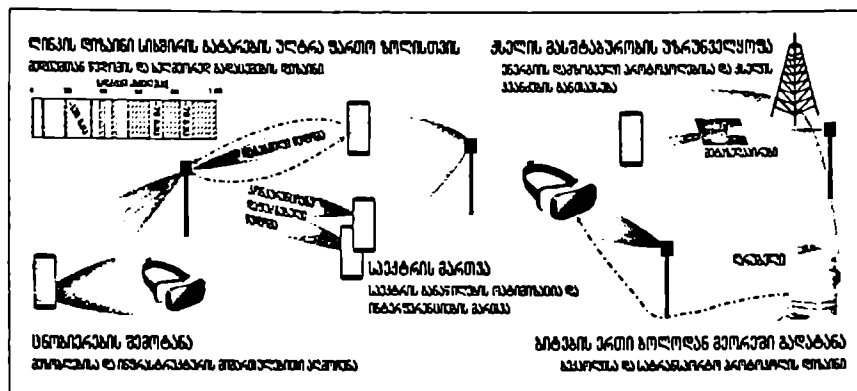
გავრცელების მკაცრი მახასიათებლები, ტერაჰერცული წვდომის წერტილის შეზღუდული დაფარვა, მიმართულობა და სიხშირის გატარების უზარმაზარი ზოლის ხელმისაწვდომობა, წარმოადგენს ახალ გამოწვევებს და პოტენციალს MAC-ის, ქსელისა და სატრანსპორტო ფენებისათვის და შეიძლება მოითხოვდეს უსაღებო ქსელების მომხმარებლის და საკონტროლო დონეების ტრადიციული პარადიგმების გადახედვას.

ამ თავში, ჩვენ განვიხილავთ გამჭოლი, ბოლოების დამაკავშირებელი, ტერაჰერცული ქსელების განვითარების ხუთ საკვანძო სფეროს (შეჯამებულია ნახ. 4.1-ზე), რომლებიც დაფუძნებულია ლიტერატურიდან ცნობილ სრული სტეკის NS-3 (ქსელის სიმულატორი-3, Network Simulator-3) კომპიუტერულ სიმულაციაზე. წარმოდგენილი იქნება ტერაჰერცულ სიხშირეებზე ქსელური პრობლემების გადაჭრის ჰოლისტიკური მიდგომა, რომლის დროსაც გადამწყვეტი მნიშვნელობა ექნება შემდეგი მექანიზმების შესწავლას:

- ცნობიერების შემოტანა, ანუ ინფორმირება მეზობლების, ფიქსირებული ინფრასტრუქტურის და არხების გამოყენების შესახებ, რათა მოხდეს მიმართულებითი კომუნიკაციებით გამოწვეული დახშობის დაძლევა;
- ლინკების კონსტრუირებისას ულტრა ფართო სიხშირის გატარების ზოლების გაითვალისწინება, მედიუმთან წვდომის სქემებში სირთულისა და ეფექტურობის კომპრომისის გაანალიზებით;
- ქსელის მასშტაბურობის (გაზრდის) უზრუნველყოფა მისი განთავსების ენერგოეფექტური პროექტით, აქტიური და პასიური კვანძების გათვალისწინებით;
- სპექტრის მართვა ინტერფერენციების ზემოქმედების გათვალისწინებით და იმის გაცნობიერებით, თუ როგორ შეიძლება ხელმისაწვდომმა სიხშირის გატარების ზოლმა მოიტანოს სარ-

გებლიანობა, უსადენო ბექჰოლისა და მრავალჯერადი კავშირების ორგანიზებისას;

- ბიტების გადატანა ერთი ბოლოდან მეორე ბოლომდე ჩატარებული ანალიზის მიხედვით, თუ რომელი სახის სატრანსპორტო პროტოკოლები უზრუნველყოფენ საუკეთესო მახასიათებლებს.



ნახ. 4.1. კონსტრუირების ძირითადი გამოწვევები გამჭოლი სრული სტეკის ტერაჰერცული ქსელებისათვის

ჩვენ შევარჩიეთ ეს თემები, რადგან ისინი წარმოადგენენ ელემენტებს, რომლებზეც გავლენას ახდენს ტერაჰერცული არხის მახასიათებლები და განთავსებები და მათი რეალური ოპტიმიზაცია აუცილებელია ტერაჰერცულ ლინკებზე 6G გამჭოლი უწყვეტი ურთიერთქმედების უზრუნველსაყოფად. მათ განვიხილავთ მეოთხე თავის დარჩენილ ნაწილში: თითოეული სფეროსთვის, ჩვენ ჯერ განვიხილავთ ტერაჰერცული სცენარების მიერ შემოთავაზებულ გამოწვევებს, შემდეგ კი გამოვყოფთ კვლევის პერსპექტიულ მიმართულებებს.

4.3. ცნობიერების შემოტანა

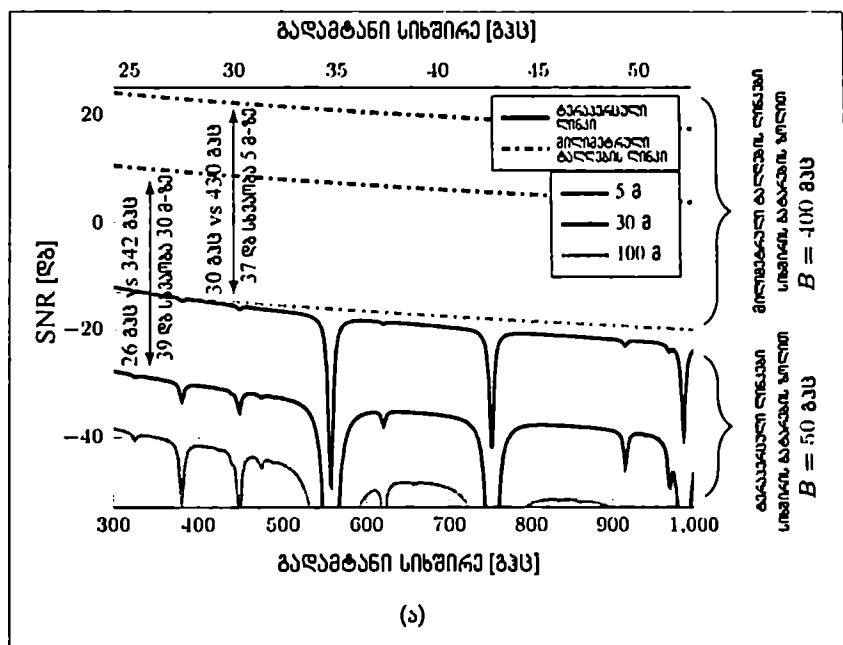
მობილური კვანძები საჭიროებენ ცნობიერების შემოტანას, ანუ ინფორმაციის შეგროვებას მიმდებარე გარემოს შესახებ. შემთხვევითი წვდომის კონტექსტშიც კი, ყოველგვარი კოორდინაციის გარეშე, მოწყობილობებმა მაინც უნდა იცოდნენ შემომავალი გადაცემების შესახებ. უფრო მეტიც, ფიჭურ ან უსადენო LAN (WLAN) სცენარში, სადაც მობილური მომხმარებლები ცვლიან მონაცემებს ფიქსირებულ ინფრასტრუქტურასთან (მაგალითად, საბაზო სადგურებთან და წვდომის წერტილებთან), უსადენო ლინკის თითოეულ საბოლოო წერტილს უნდა ჰქონდეს ინფორმაცია (ცოდნა) მეორის შესახებ: ფიჭურ ქსელებში მომხმარებლები თავდაპირველ წვდომას ახორციელებენ საწყის სადგურთან, რომელიც წარმოადგენს საერთო ქსელის შლიუზს (Gateway) და ახდენს სპექტრის რესურსების გადანაწილებას დაკავშირებული მოწყობილობებისთვის; დაბოლოს, მათ შეიძლება დასჭირდეთ არხის შესწავლა, რათა გაიგონ, დაკავებულია თუ არა იგი და გადაწყვიტონ გადაცემა მხოლოდ მაშინ, როდესაც ის თავისუფალია. ამიტომ, აუცილებელია მობილურმა ტრანსივერებმა მიიღონ ინფორმაცია ფიქსირებული ინფრასტრუქტურის, მათი მეზობლების და, საჭიროების შემთხვევაში, არხის დაკავებულობის შესახებ.

ტრადიციულად, ფიჭური და WLAN ქსელები, რომლებიც ფუნქციონირებენ 6 გჰც-მდე სიხშირეებზე, გადაცემისას იყენებენ ყველა მიმართულებით გადაცემულ სიგნალებს, რომლებიც არ ექვემდებარებიან დახშობას. მაგალითად, LTE საბაზო სადგურების მიერ გამოგზავნილი სინქრონიზაციის სიგნალი ერთდროულად მიიღება მათი დაფარვის ზონის ყველა მომხმარებლის მიერ. თუმცა, 5G ქსელში მილიმეტრული ტალღების კომუნიკაციებით, ეს პარადიგმა შეიცვალა, რადგან მიმართულობა ხელს უშლის მოწყობილობებსა და საბაზო სადგურებს, რომ განახორციელონ გადაცემა და მიღება ყველა მიმართულებით. ამ სის-

ტემებს რეალურად სჭირდებათ ანტენის სხივის მიმართულობის დიაგრამის სწორად ფორმირება, რათა გააუმჯობესენ ლინკის ბიუჯეტი და გაზარდონ კომუნიკაციის დიაპაზონი. მაქსიმალური გაძლიერების მისაღწევად, საბოლოო წერტილებმა უნდა შეათანხმონ მიღებული და გადაცემული სხივები და ამან შეიძლება შემოიტანოს შეფერხებები ლინკის რეგულირებისას, შეზღუდოს ცნობიერება სპექტრის გამოყენების კუთხით და შეამციროს კომუნიკაციების საიმედოობა მაღალი მობილურობის სცენარებში.

4.3.1. ლინკის ბიუჯეტებისა და საწყისი წვდომის შეყოვნებების შედარება

ნახ. 4.2ა ადარებს სიგნალისა და ხმაურის თანაფარდობას, SNR-ს, სხვადასხვა მანძილებზე (5, 30 და 100 მ) მილიმეტრული ტალღების და ტერაჰერცული სიხშირეების ლინკებისათვის. SNR განისაზღვრება მიღებული სიგნალის სიმძლავრისა და ხმაურის სიმძლავრის თანაფარდობით, სხივების მიმართულობის დიაგრამის მიერ შეტანილი გაძლიერების მხედველობაში მიუღებლად, რათა გაგვეანალიზებინა უფრო მაღალი გადამტანი სიხშირის ზემოქმედება გავრცელების დანაკარგებზე. ეს უკანასკნელი გამოითვლება დადგენილი მოდელების მიხედვით (ანუ გამოიყენება 3GPP მოდელი, რომელიც აღწერილია დოკუმენტში “TR 38.901, Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz”, V16.1.0, 2020, 3GPP NR-სთვის და ასევე, ლიტერატურიდან ცნობილი მოდელი ტერაჰერცული ლინკებისათვის 300-1000 გჰც-იანი სპექტრისთვის). სიხშირის გატარების ზოლი არის 400 მჰც მილიმეტრული ტალღებისათვის (რაც წარმოადგენს სიხშირის გატარების მაქსიმალურ ზოლს ერთ გადამტანზე 3GPP NR-სთვის) და არის 50 გჰც ტერაჰერცული სიხშირეებისათვის IEEE 802.15.3d-ს შესაბამისად.



(ა)

ნახ. 4.2ა. ლინკის ბიუჯეტი და მიმართულობის ზემოქმედება MAC ფენაზე: შესწავლილია მილიმეტრული ტალღების და ტერაჰერცული სიხშირეების ლინკები, რომელთათვისაც $P_x = 0.5$ ვტ-ს და ხმაურის კოეფიციენტი უდრის 10 დბ-ს (vs, versus, აღნიშნავს წინააღმდეგ)

მაგალითად, ჩვენ ვხედავთ, რომ SNR-ის მიხედვით სხვაობა გადამტანს 30 გჰც-ზე და გადამტანს 430 გჰც-ზე შორის არის 37 დბ. როგორც უკვე აღვნიშნეთ, ამ განსხვავების ანაზღაურება შესაძლებელია თითოეულ კვანძში საანტენო ელემენტების რაოდენობის გაზრდით, ტერაჰერცული სიხშირეების უფრო მცირე ტალღის სიგრძის წყალობით, მილიმეტრულ ტალღებზე და 6 გჰც-ს ქვემოთ ფუნქციონირებად ქსელებთან შედარებით. ამას მივყავართ უფრო ვიწრო სხივებამდე, რაც აუზმულობებს ლინკის ბიუჯეტს, მაგრამ, ამავე დროს, ზრდის დახშობის პრობლემას, რაც თავის მხრივ ამცირებს მობილური კვანძების ინფორმირებულობას.

მაღალი მიმართულობის მქონე ანტენების გავლენა MAC-ზე და უფრო ზედა ფენებზე ნაჩვენებია ნახ. 4.2ბ-ზე, რომელიც ასახავს შეყოვნებას საწყისი კავშირის დამყარებისას, ამომწურავი სკანირებით საუკეთესო სხივის გადაცემისა და მიღების დადგენის პროცესში, 3GPP NR ფრეიმის სტრუქტურის და მისთვის გამოყენებული შეყოვნების მოდელის ბაზაზე. აღსანიშნავია, რომ საბაზო სადგურები ყოველ T_{ss} წამში აგზავნიან 8, 16, 32 ან 64 მიმართული სინქრონიზაციის სიგნალებს, რაც საშუალებას აძლევს მობილურ კვანძებს შეათასონ არხის ხარისხი და გადაწყვიტონ, თუ რომელია სხივების საუკეთესო წყვილი. მილიმეტრული ტალღების ლინკებისათვის ჩვენ განვიხილავთ რეგულირების პროცედურას, როდესაც 16 ანტენა განთავსებულია საბაზო სადგურებზე და 4 ანტენა კი მომხმარებლის მოწყობილობებზე (UE). ეს იძლევა გაძლიერებას 18 დბ-მდე, რაც LoS პირობებში 100 მ-ზე და 52.6 გჰც-ზე საკმარისია დაახლოებით 0 დბ-იანი SNR-სთვის. ტერაჰერცული სიხშირეებისათვის ნახ. 2ბ-ზე მოცემული კონფიგურაცია შექმნილია მილიმეტრული ტალღების ლინკის მთლიანი ბიუჯეტის შესატყვისად, საბაზო სადგურებზე 1024 ელემენტით და მობილური დაბოლოების წერტილში 256 ელემენტით, ხოლო გაძლიერებაა 54 დბ-მდე. მიუხედავად იმისა, რომ ლინკის ბიუჯეტი იგივეა, უფრო წვრილი სხივი მოითხოვს უფრო მეტი მიმართული სინქრონიზაციის სიგნალებს, იმავე დაფარვის არეალისთვის. აქედან გამომდინარე, 3GPP NR ფრეიმის სტრუქტურაში გადაცემისა და მიღების მხარეს ამომწურავი ძებნა არის ნელი, მაგრამ მაინც ფიზიკურად შესაძლებელი მილიმეტრული ტალღებისთვის (1 წმ-ზე ნაკლები შეყოვნების მქონე ყველაზე უარესი კონფიგურაციისათვისაც კი). მეორეს მხრივ, ტერაჰერცებისათვის, ეს არ არის სიგოცხლისუნარიანი ვარიანტი, ვინაიდან საჭიროა 32 წამზე მეტი, რათა დაასრულდეს სკანირება საუკეთესო შემთხვევაში.

ლინკის ბიუჯეტის გაუმჯობესებასა და სპექტრისა და ინფრასტრუქტურის ინფორმირებულობის საჭიროებას შორის. მილიმეტრული ტალღებისთვის სხივების მართვის გადაწყვეტილებების კვლევამ უკვე მიგვიყვანა ძირითადი ამომწურავი კვლევის რამდენიმე ალტერნატივამდე, რომელებიც ნაწილობრივ შეიძლება ადაპტირდეს ტერაჰერცულ დიაპაზონზე. ამის გარდა, ტერაჰერცული სპექტრის მახასიათებლების გამოყენება შესაძლებელია სხივის მიმართულობის ოპერაციების გასაუმჯობესებლად. პერსპექტიული კვლევის მიმართულებები მოიცავს შემდეგ კომბინაციებს:

- ფრეიმის სტრუქტურის შეცვლა ნახ. 28-ზე წარმოდგენილი NR-ის მახასიათებლების შესაბამისად და სინქრონიზაციისა და რეფერენსული სიგნალების გათვალისწინებით, ტერაჰერცულ სპექტრში არსებული უფრო დიდი სიხშირის გატარების ზოლის გამოყენების მიზნით. მოკლე პილოტ-სიგნალებმა შეიძლება გამოიწვიოს სინქრონიზაციის სიგნალების გადაცემის მეტი შესაძლებლობა, მართვის ზედნადებ სასიგნალო ხარჯებზე ზემოქმედების გარეშე, ხოლო მომხმარებლისთვის სპეციფიკური, თვალყურის მადევნებელი, რამდენიმე სიგნალის მულტიპლექსირება შესაძლებელია განსაზღვრულ სიხშირეზე, თუ პროცესში ჩართული მოწყობილობების ლინკის ბიუჯეტი საკმარისად მაღალია;
- გაუმჯობესებული საანტენო არქიტექტურა, რომელიც შეიძლება გამოყენებულ იქნას მიმართული სიგნალების ერთდროულად გადასაცემად და მისაღებად მრავალი ტრანსივერიდან (მაგალითად, მიმართულობის დიაგრამის ციფრულად ფორმირებით), ან ტერაჰერცული სიგნალების გადაცემისას და მიღებისას გადახრის კუთხის განსაზღვრისთვის (მაგალითად, ანტენებით ტალღის გაჟონვით). საჭიროა შემდგომი კვლევითი ძალისხმევა ციფრული არქიტექტურისა და ანტენების დიზაინ-

ნისა და რელიზაციისთვის ტერაპევტული სპექტრისთვის, მაგრამ ასევე უკვე მიღებულია პერსპექტიული შედეგები მრავალსხივიანი გადაწყვეტილებებით, რომლებიც დაფუძნებულია პლაზმურ ნაწილაკ-ანტენებზე, ან ინფორმაციის შეგროვებით არა მხოლოდ მთავარი სხივის მიხედვით, არამედ მისი გვერდითი წილებითაც;

- სხივების მართვის მრავალსაფეხურიანი სქემები, სადაც არხის თვალყურის დევნების ან ზონდირების სხვადასხვა ეტაპებზე გამოიყენება სხივის კონფიგურაციები სხივის სხვადასხვა სიგანით და, შესაბამისად, გაძლიერებით;
- კონტექსტზე დაფუძნებული სქემები, რომლებიც იყენებენ დამატებით ინფორმაციას გარემომცველი გარემოს შესახებ ინფორმაციის შეგროვების მიზნით. აღსანიშნავია, რომ ტერაპევტულ სპექტრში, ფართო სიხშირის გატარების ზოლი და გვერდულების მახასიათებლები ხელს უწყობენ მედიუმს გახდეს განსაკუთრებით შესაფერისი რადიოსიხშირული ზონდირებისთვის; ამიტომ, ერთი და იგივე საეთერო ინტერფეისი შეიძლება გამოყენებულ იქნას მონაცემების გადასაცემად და მიმდებარე გარემოს ასახვისთვის, მაგალითად, ბლოკირების წყაროების იდენტიფიკაციისათვის;
- MAC პროტოკოლები, რომლებიც ემყარებიან მრავალკავშირიან სისტემებს (მაგალითად, რამდენიმე ტრანსივერის არსებობას მობილურ მოწყობილობებსა და საბაზო სადგურებში) სხვადასხვა სიხშირული დიაპაზონის გამოყენებისთვის და სხვადასხვა დავალების შესასრულებლად: 6 გჰც-მდე ლინკებს შეუძლიათ უზრუნველყონ მაკონტროლებელი გადაფარვა და დაეხმარონ სხივების მართვის ოპერაციების ჩატარებას ტერაპევტულ სპექტრში უკუკავშირის საიმედო ლინკებით.

4.4. საკომუნიკაციო ლინკის დიზაინი ულტრა ფართო სიხშირული გატარების ზოლისთვის

სიხშირული გატარების ზოლის უპრეცედენტო ხელმისაწვდომობა ტერაჰერცებზე, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 4.1-ზე, და ძალიან დიდი მიმართულობა გადაცემის დროს, ასევე მოითხოვენ შემდგომი კვლევის ჩატარებას, მედიუმთან წვდომისა და რეტრანსლაციის მექანიზმებთან დაკავშირებით. აღსანიშნავია, რომ ფიზიკური ფენის მაღალი სიჩქარე საშუალებას აძლევს MAC პროტოკოლებს, იმ შემთხვევაშიც კი მიაღწიონ მაღალ გამტარუნარიანობას, როდესაც რეალიზაციის სიმარტივის სასარგებლოდ, შემცირებულია სიხშირის სპექტრის ზოლი და, შესაბამისად, სპექტრული ეფექტურობა. პროტოკოლების გამოყენება, რომლებიც საჭიროებენ მაღალი დონის კოორდინაციას, შეიძლება არაპრაქტიკული იყოს ტერაჰერცულ ლინკებში გამოსაყენებლად.

მედიუმთან წვდომის პროცესში არჩევანი კეთდება ორ დიზაინს – წინასწარ დაგეგმილსა და კონკურენციაზე დაფუძნებულს შორის. თითოეული ეს პარადიგმა წარმოგვიდგენს პოტენციურ შესაძლებლობებს და შეზღუდვებს, რომლებიც შეიძლება გამოყენებული იქნას სხვადასხვა გამოყენებების შემთხვევებისა და სცენარების დროს. კერძოდ,

- წინასწარ დაგეგმილი წვდომის დროს, ფიზიკური ქსელის საბაზო სადგურები გამოყოფენ დროისა და სიხშირის რესურსებს დაკავშირებული მომხმარებლებისათვის, რითაც თავიდან იცილებენ კონფლიქტებს და, შესაბამისად, იზრდება სპექტრული ეფექტურობა. გარდა ამისა, საბაზო სადგურებზე ცენტრალიზებული მართვა საშუალებას იძლევა მოხდეს ლინკის სწრაფი ადაპტაცია და თვალყურის დევნება. მართლაც, საბაზო სადგურებს შეუძლიათ დაკავშირებული მომხმარებლებისთვის გამოყონ კონკრეტული თვალყურის დევნების ან რეფერენსული სიგნალები და მოახდინონ თავისი ქმედებების კოორდინაცია

ინფრასტრუქტურასთან, რათა მიიღონ ინფორმაცია გარკვეული მომხმარებლისთვის არხის დინამიკის განვითარების შესახებ. ამასთან, შეიძლება რთული იყოს ფიქსირებული ინფრასტრუქტურის მიმართ კავშირის დამყარება და შენარჩუნება ტერაჰერცულ დიაპაზონში სიგნალების გავრცელებისათვის მკაცრი გარემოს გათვალისწინებით და, შესაბამისად, მართვის სიბრტყე უნდა გაუმკლავდეს სიგნალის მიმართულობის მოთხოვნებს;

- ტერაჰერცული MAC ფენის დიზაინთან დაკავშირებული კვლევების უმეტესობაში განხილულია მიდგომები, რომლებიც დაყრდნობილია კონკურენციაზე დაფუძნებულ მედიუმთან წვდომაზე. წინასწარ დაგეგმილი MAC-სგან განსხვავებით, კონკურენციაზე დაფუძნებულ MAC-ს არ სჭირდება მმართველი სიბრტყის ინფრასტრუქტურასთან კავშირი. უფრო მეტიც, მაღალი მიმართულობით გადაცემა და მისი მცირე ხანგრძლივობა (მონაცემთა გადაცემის ულტრა მაღალი სიჩქარის ხელმისაწვდომობის წყალობით) ზღუდავს კონფლიქტების გავლენას მონაცემთა სხვადასხვა კონკურენტულ გაცვლებს შორის. ამის მიუხედავად, კომუნიკაციის ორ დამაბოლოებელ წერტილს მაინც სჭირდება შეთანხმება სხივთა ოპტიმალური წყვილზე; ამრიგად, სხივის ძიების ეტაპი უნდა განიხილებოდეს არხზე თითოეული წვდომისას.

განმეორებითი გადაცემის პროცესში, არაპროგნოზირებადი ბლოკატორები და სხივის ან საბაზო სადგურის ხშირი განახლებები ცუდად მოქმედებენ მიმღებსა და გადამცემს შორის დასტურის შეტყობინების მუდმივ ნაკადზე, რაც გავლენას ახდენს განმეორებითი გადაცემის პროცედურების შემუშავებაზე. გარდა ამისა, მონაცემთა მაღალი სიჩქარის გათვალისწინებით, პირდაპირმა შეცდომების გამასწორებელმა კოდირებამ შეიძლება საკმაოდ რთული გახადოს ტრანსივერის დიზაინი.

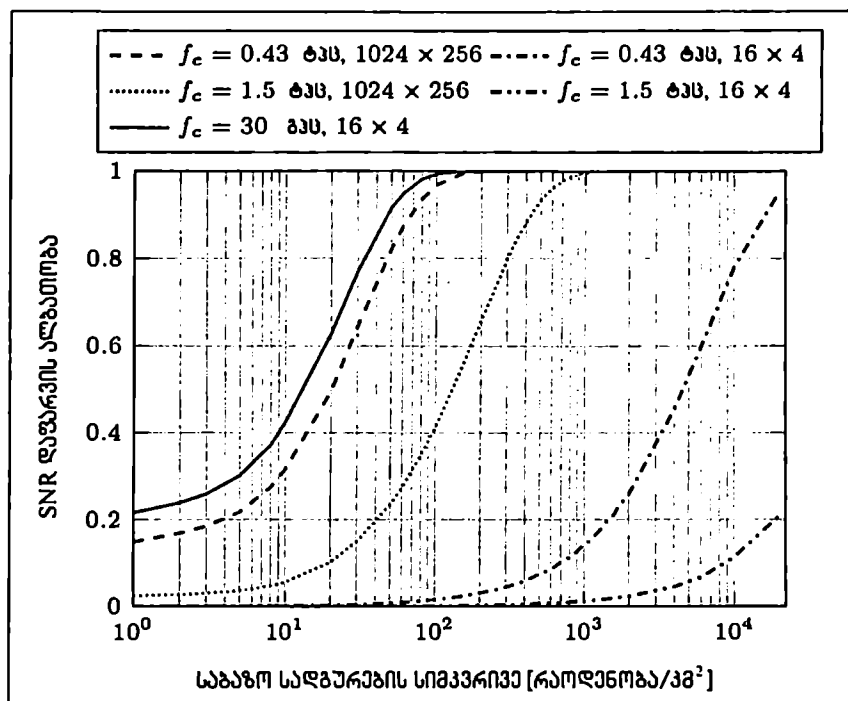
ამიტომ, განმეორებითი გადაცემის ეფექტური პროცესი კვლავ ღია საკითხად რჩება. ამ მიზნით, შეიძლება გამოყენებულ იქნას ქსელის კოდირების თანამედროვე საშუალებები, რომელთაც აქვთ მცირე რეალიზაციის სირთულე. ისინი ამარტივებენ განმეორებითი გადაცემის პროცესს, რადგან არ საჭიროებენ კონკრეტული პაკეტის ხელმეორედ გადაცემას, და ამის ნაცვლად გადასცემენ პაკეტების ჯგუფის შემთხვევით კომბინაციას, რომლის დეკოდირებაც უნდა მოახდინოს მიმღებმა.

4.5. ქსელის მასშტაბურობა

მილიმეტრული ტალღების საბაზო სადგურები განთავსებულია როგორც მაღალი სიმკვრივის მცირე ფიქები 5G ქსელებში მათი დაფარვის შეზღუდულობის გამო. ამ ტენდენციის გათვალისწინებით და ტერაჰერცულ სიხშირულ სპექტრში გზაში უფრო მაღალი დანაკარგების გათვალისწინებით, ტერაჰერცებში მოქმედი ფიქური ქსელის სიმკვრივე კიდევ უფრო გაიზრდება. ეს გავლენას მოახდენს კაპიტალურ და საოპერაციო ხარჯებზე, ენერგიის მოხმარებაზე, ბექჰოლის ინფრასტრუქტურის სირთულეზე და მასშტაბებზე. ამ პარაგრაფში, ჩვენ მიმოვიხილავთ მთავარ გამოწვევებს და კვლევების მიმართულებებს, რომლებიც დაკავშირებულია ტერაჰერცული ქსელის მასიურ განთავსებასთან და მუშაობასთან.

ნახ. 4.3 ასახავს განთავსების სიმკვრივეების სხვაობებს, რაც შეიძლება მოსალოდნელი იყოს მილიმეტრული ტალღების და ტერაჰერცული სიხშირეების სისტემებისთვის. ჩვენ განვიხილავთ სიმულაციებს მონტე-კარლოს მეთოდით, რა დროსაც მაკრო საბაზო სადგურები განლაგებულია შენობებს გარეთ, პუასონის წერტილოვანი პროცესის შესაბამისად და დაფარვის ალბათობები გამოითვლება როგორც იმის ალბათობა, რომ SNR იქნება 0 დბ-იან ზღვარზე მეტი განთავსების ცენტრში

მყოფ სატესტო მომხმარებელს და მინიმუმ ერთი საბაზო სადგურს შორის.



ნახ. 4.3. განსხვავებული განთავსების კონფიგურაციებისათვის ალბათობა იმისა, რომ SNR აღემატება 0 დბ-ს. მილიმეტრული არხის მოდელირება ხდება ურბანული სცენარისთვის მიკროფიჭებით, ლიტერატურიდან ცნობილი ალბათური LoS მოდელისა და გზაში დანაკარგების მოდელის კომბინაციის საშუალებით. ტერაჰერცული დიაპაზონისთვის გზაში დანაკარგები მოდელირებულია მხოლოდ LoS შემთხვევისთვის. ლინკის სხვა პარამეტრები ისეთივეა, როგორიც ნახ. 4.2ა-ზე

მაგალითად, ეს შეიძლება იყოს მეტრიკა, რომელიც იზომება მობილური მოწყობილობებით, თავდაპირველი წვდომის მცდელობის დროს. გზაში დანაკარგები და სხივების ფორმირების გაძლიერება მო-

დელირებულია ისე, როგორც ნაჩვენებია ნახ. 4.2-ზე. ჩვენ ვამჩნევთ, რომ 16 საანტენო ელემენტით საბაზო სადგურზე და 4 საანტენო ელემენტით მობილურ მოწყობილობაზე, 30 გჰც-იან ქსელს აქვს დაფარვის ალბათობა 0.95-ზე მეტი 60 საბაზო სადგურით 1 კმ²-ზე, რაც შეესაბამება ფიჭის საშუალო რადიუსს 72 მ-ს. ანტენის იგივე კონფიგურაცია არ იძლევა ტერაჰერცებზე ადეკვატურ მახასიათებლებს, რადგან მსგავსი დაფარვის ალბათობა მოითხოვს $2 \cdot 10^4$ საბაზო სადგურს 1 კმ²-ზე და 0.43 ტჰც-სთვის. როგორც ადრე აღვნიშნეთ, საანტენო მესრები უფრო დიდი რაოდენობის საანტენო ელემენტებით იქნება საჭირო სიხშირის ამ დიაპაზონის გამოყენებისას. საბაზო სადგურებით 1024 საანტენო ელემენტით და მობილური მოწყობილობებით 256 საანტენო ელემენტით, შესაძლებელია მიღწეულ იქნას დაფარვის ალბათობა 0.9, მინიმუმ 100 საბაზო სადგურით 1 კმ²-ზე 0.43 ტჰც-სთვის და 600 საბაზო სადგურით 1 კმ²-ზე 1.5 ტჰც-თვის, როდესაც ფიჭის საშუალო რადიუსი შესაბამისად არის 56 მ და 23 მ.

4.5.1. ენერგიის დამზოგავი ქსელის დიზაინი

6G კიდევ უფრო გააუმჯობესებს 5G ქსელების ენერგოეფექტურობას, რათა დააბალანსოს ტერაჰერცული კვანძების უფრო დიდი რაოდენობა, რომელთა გამოყენებაც აუცილებელია მილიმეტრული ტალღებთან და 6 გჰც-ს ქვემოთ მდებარე სიხშირეებთან შედარებით. ტერაჰერცულ სიხშირეებზე ფუნქციონირებისას ენერგიის მოხმარების შემცირების შესაძლო სტრატეგიებში შედის:

- მართვის სიბრტყის ეკონომიური დიზაინი, რომელიც მინიმუმამდე ამცირებს საკონტროლო შეტყობინებებსა და მართვის ოპერაციებისათვის განკუთვნილ მუდმივად ჩართულ სიგნალებს;

- ძილის სწრაფი ციკლები საბაზო სადგურებისათვის მკვერივ კლასტერებში. ნახ. 4.3-ზე მოცემული სიმკვერივით განთავსებისას საბაზო სადგურების რაოდენობა სავარაუდოდ მიუახლოვდება და ზოგიერთ რეგიონში შესაძლოა გადააჭარბებს კიდევ ქსელში აქტიური მომხმარებლების რაოდენობას. ამიტომ, ტერაჰერცულმა საბაზო სადგურებმა სწრაფად უნდა გამორთონ ძირითადი რადიოფუნქციები (ენერგიის დაზოგვის მიზნით), როდესაც არ არიან დაკავშირებული მომხმარებლები. ამისათვის, საჭიროა კოორდინაცია მეზობელ საბაზო სადგურებს შორის, რომლებიც ერთმანეთს აცნობებენ გამორთულ საბაზო სადგურებზე გადაადგილებული მომხმარებლების შესახებ, რათა მათ სწრაფად განაახლონ ოპერაციები ან გააღვიძონ სისტემები დაბალი სიმძლავრის რადიოსთან მრავალჯერადი შეერთებების გამოყენებით;
- ენერგიის დაზოგვის მდგომარეობები მობილური მოწყობილობებისთვის, როდესაც არ ხდება აქტიური გადაცემა და მოლოდინის რეჟიმის ცვალებადობა ინტერვალებით, რომლებშიც ქსელს შეუძლია მოწყობილობის გამოძახება. ტერაჰერცების სპეციფიკური გამოწვევა, ეს არის კავშირის შენარჩუნება მოლოდინის რეჟიმში, მაღალი მიმართულობის ლინკებით, რადგან სხივების საუკეთესო წყვილი შეიძლება შეიცვალოს, თუ მობილური მოწყობილობა, ენერგიის დაბალი მოხმარების პროცესში, გადაადგილდება ქსელში;
- ენერგიის შეგროვება ინფრასტრუქტურითა და მობილური მოწყობილობებით, რომლებიც იყენებენ თანამედროვე ენერგიის შეგროვების თვითმხარდაშერ სტემებს ძილის ციკლების დროს.

4.5.2. მართვის სიბრტყე ამრეკლავი საანტენო მესრებისა და მეტაზედაპირებისათვის

დიდი საანტენო მასივების შემთხვევაშიც კი, ტერაჰერცული ლინკებით თანაბარზომიერი დაშვებით დაფარვა შეიძლება შეუძლებელი იყოს ხარჯისა და ენერგიის მოხმარების თვალსაზრისით. ცხელი წერტილები და შენობების შიდა სცენარები წარმოადგენენ უფრო სავარაუდო კანდიდატებს ტერაჰერცული დიაპაზონების ადრეული განთავსებისათვის. მათთვის ტრადიციული საბაზო სადგურის დაფარვა შეიძლება გაუმჯობესდეს ქსელის ინფრასტრუქტურის ახალი ელემენტებით, კერძოდ, ამრეკლავი საანტენო მესრებით და მეტაზედაპირებით. ეს მოწყობილობები, შესაბამისად დაფუძნებულია ფაზირებულ საანტენო მესრებზე და ნაწომასალებზე, რომლებსაც შეუძლიათ მართონ მათზე დაცემული ტერაჰერცული ტალღა და არეკლონ ტერაჰერცული კვანძის მიერ გადაცემული სიგნალი მობილური მომხმარებლის მიმართულებით. მათი დანერგვა აუმჯობესებს ლინკის ბიუჯეტს და დაფარვას NLoS პირობებში და ამცირებს საბაზო სადგურების სრულ სიმკვრივეს. ამასთან, ფიქსირებულ ინფრასტრუქტურასთან მათი ინტეგრაცია საჭიროებს სპეციალური მართვის სიბრტყის შექმნას, მართვისათვის განკუთვნილი პროტოკოლებით და ქსელური პროცედურებით, რომლებიც ორიენტირებულია სხვადასხვა ამრეკლავ მოწყობილობებს შორის მომხმარებელთა გადართვაზე და მაღალსიჩქარიან მობილურ სცენარებში თვალყურის დევნებაზე. უფრო მეტიც, ტერაჰერცული ქსელების მასშტაბურობა გაზდის არაპრაქტიკულს ხელით მართვად კონფიგურაციებს, რაც მოითხოვს ინტელექტუალური პროცედურების ჩატარებას, რომლებიც ავტომატურად აკავშირებენ და ერთობლივად აოპტიმიზებენ საბაზო სადგურების პარამეტრებს და ამრეკლავ კვანძებს ჩაერთო და ითამაშე (Plug-and-Play) რეჟიმში.

4.6. სპექტრის მართვა

ტერაჰერცულ დიაპაზონში სპექტრის დიდი აუთვისებელი ნაწილი ასევე ქმნის ახალ შესაძლებლობებს სპექტრის მართვისათვის. სინამდვილეში, რადიოწვდომისთვის დიდი სიხშირული გატარების ზოლის გამოყოფის გარდა, შესაძლებელია ქსელის მახასიათებლების გაუმჯობესება სპექტრის ხელმეორედ გამოყენების სქემების, სიხშირული დიაპაზონის შიგნით ფუნქციონირებადი მაღალი გამტარუნარიანობის მქონე უსადენო ბექჰოლის და მრავალკავშირიანობის გამოყენებით.

4.6.1. ინტერფერენციები

უპირველეს ყოვლისა, მნიშვნელოვანია ინტერფერენციების გავლენის აღწერა განსაკუთრებული მიმართულობის მქონე ლინკების განხილვისას. მართლაც, ისევე როგორც მილიმეტრული ტალღები, ტერაჰერცული ქსელები შეიძლება იყოს შეზღუდული ხმაურის ზემოქმედების ქვეშ, გადაცემისას მიმართულობის დიაგრამის ეფექტური ფორმირებისა და თითოეული საბაზო სადგურის შეზღუდული დაფარვის წყალობით. თუმცა, იმავდროულად, მაღალ სიმკვრივეს, რომელიც საჭიროა დაფარვის უზრუნველსაყოფად (როგორც ეს ადრე განვიხილეთ), შეუძლია წარმოქმნას დამატებითი ინტერფერენციები; დაბოლოს, პაკეტური გადაცემები ართულებს შესაძლო ინტერფერენციების წყაროების მოკვლევას და პროგნოზირებას. ამ მიზნით, პერიოდულად წარმოქმნილი ინტერფერენციების წყაროების აღმოსაჩენად და მათი გავლენების შესამსუბუქებლად, შემოთავაზებული იქნა განმტკიცებული სწავლების (Reinforcement Learning, RL) სქემა, სადაც ნაჩვენებია, თუ როგორ შეუძლიათ ადაპტურ, სწავლის საფუძველზე შექმნილ მიდგომებს გაუმკლავდნენ რთულ და დინამიურ ტერაჰერცულ სცენარებს. ტერაჰერცულ დიაპაზონში ინტერფერენციების ხასიათმა შეიძლება

გავლენა მოახდინოს სპექტრის ხელახალი გამოყენების და მისი გაზიარების სქემების სტრუქტურაზე, რომლებიც შეიძლება მეტნაკლებად აგრესიულად იქნან მორგებული ფიჭებს შორის ინტერფერენციების თავიდან აცილების საჭიროებებზე. გარდა ამისა, უნდა გადამუშავდეს ინტერფერენციების მენეჯმენტის სტრატეგიები, როგორც აქტიური, ისე პასიური მომხმარებლების გათვალისწინებით (მაგალითად, მოხდეს მოქმედი ოპერატორების დაცვა, რომლებიც იყენებენ სპექტრს რადიოასტრონომიისა და დედამიწის ატმოსფეროს შესწავლისათვის) ტერაჰერცულ კვანძებში საკოორდინაციო კონტურებით, რომლებიც უნდა იყვნენ საკმაოდ სწრაფები, რათა წარმატებით იფუნქციონირონ უაღრესად დინამიურ ინტერფერენციულ გარემოში.

4.6.2. უსადენო ბექჰოლი

ხელმისაწვდომი სიხშირის გატარების ფართო ზოლები შეიძლება ასევე გამოყენებული იქნან ტერაჰერცული საბაზო სადგურების ზოლს შიდა ბექჰოლისათვის. განთავსების მაღალი სიმკვრივე უკიდურესად ძვირადღირებულს გახდის თითოეულ საბაზო სადგურზე სადენიან ბექჰოლს, რაც მოითხოვს სრულად უსადენო გადაწყვეტილებას. მსგავსი სქემა, ინტეგრირებული პირდაპირი წვდომით და ბექჰოლით, უკვე გამოიყენება 5G ქსელებში. მილიმეტრულ ტალღებზე ამ სქემის გამოყენებასთან შედარებით, ტერაჰერცული სიხშირეები სარგებლობენ სპექტრის უფრო მაღალი ხელმისაწვდომობით, რამაც შეიძლება გააუმჯობესოს მომსახურების ხარისხი გამჭოლი (ბოლოების დამაკავშირებელი) ტრაფიკების ნაკადებისათვის, მრავალჯერად უსადენო გადასვლებზე. უფრო მეტიც, ფიქსირებული სარელეო ხაზები ამარტივებენ სხივების მართვას, მაგრამ ქსელის ოპერატორებმა დიდი სიფრთხილით უნდა შეიმუშაონ უსადენო ბექჰოლის ქსელის განლაგება და ტო-

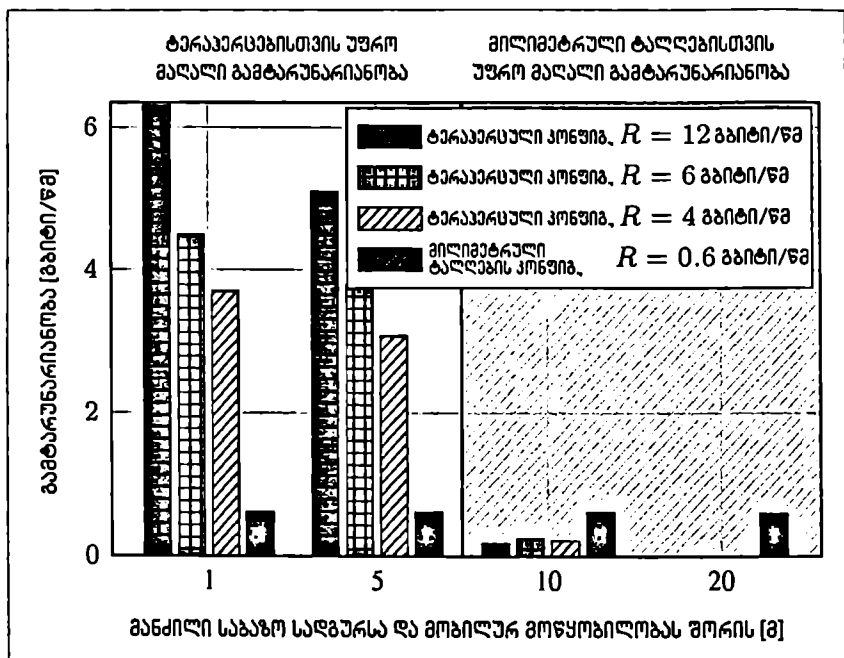
პოლოგია, რომ უზრუნველყონ კავშირი ყველა საბაზო სადგურთან ბლოკირების არსებობის შემთხვევაში.

4.6.3. მრავალკავშირიანობა

საბოლოოდ, 6G ქსელები დაეყრდნობა 6 გჰც-ს ქვემოთა სიხშირეების, მილიმეტრული ტალღების და ტერაჰერცული დიაპაზონების კომბინაციას და შესაძლოა ოპტიკურ უსადენო ლინკებსაც. ამრიგად, უნდა მოხდეს ქსელის ინფრასტრუქტურის და მობილური მოწყობილობების სწრაფი ადაპტირება და ისინი, კონკრეტული სიტუაციიდან გამომდინარე, გამოიყენებენ ისეთ გადამტანს, რომელიც უზრუნველყოფს საუკეთესო მახასიათებლებს.

ნახ. 4.4-ზე შედარებულია 1.0345 ტჰც-ზე ფუნქციონირებადი 74 გჰც სიხშირის გატარების ზოლის მქონე ტერაჰერცული ლინკის გამტარუნარიანობა (რაც შეესაბამება ლიტერატურიდან ცნობილ 1 ტჰც-ზე მეტი სპექტრის პირველ ხელმისაწვდომ ფანჯარას) მილიმეტრული ტალღების ლინკის გამტარუნარიანობასთან, რომელიც მუშაობს 28 გჰც-ზე მაქსიმალური სიხშირის გატარების ზოლით (ანუ 400 მჰც-ით) და რომელიც დაშვებულია 3GPP NR-ში.

გამოყენებული იყო სრული სტეკის სიმულაციები, ასევე ლიტერატურიდან ცნობილი ქსელების დისკრეტული ხდომილების სიმულაციის მეთოდი NS-3 ტერაჰერცული სიხშირეების (TeraSim) და მილიმეტრული ტალღების მოდულებით. აპლიკაცია არის მუდმივი სიჩქარის ბიტის წყარო, მომხმარებლის დატაგრამის პროტოკოლით (User Datagram Protocol, UDP) სატრანსპორტო ფენაში. უსადენო კვანძები აღჭურვილია მიმართულებითი მესრებით: ტერაჰერცებისათვის მბრუნავი საანტენო მესრებით, როგორც TeraSim-ის მიხედვით ნაგულისხმევ მაკროსცენარში, და ფაზირებული მესრებით 64 და 16 ანტენის ელემენტით, შესაბამისად. საბაზო სადგურსა და მოწყობილობაში.



ნახ. 4.4 UDP გამტარუნარიანობა სხვადასხვა სიჩქარით R და მანძილით საბაზო სადგურებსა და მობილური მოწყობილობებს შორის

ქსელის ეს კონფიგურაცია გამოყოფს ორ ოპერაციულ რეჟიმს, საბაზო სადგურსა და მობილურ მოწყობილობას შორის მანძილის შესაბამისად. მოკლე მანძილებისათვის (ანუ 1 მ და 5 მ) ტერაჰერცული ლინკი, მილიმეტრული კავშირის მიმართ, იგებს უფრო დიდი სიხშირის გატარების ზოლის გამო და უზრუნველყოფს უფრო მაღალ გამტარუნარიანობას. ამასთან, როდესაც მანძილი იზრდება, გზაში დანაკარგები ტერაჰერცულ ლინკებზე უფრო სწრაფი ტემპით იზრდება, ვიდრე მილიმეტრული ტალღებისათვის, რაც საბოლოოდ ხდება უკეთესი არჩევანი, გამტარუნარიანობის თვალსაზრისით, როდესაც მანძილი ხდება 10 მ და 20 მ. ამიტომ, 6G ტერაჰერცულმა მოწყობილობებმა უნდა გამოიყენონ მრავალკავშირიანობა, არა მხოლოდ მართვის სიბრტყისათვის

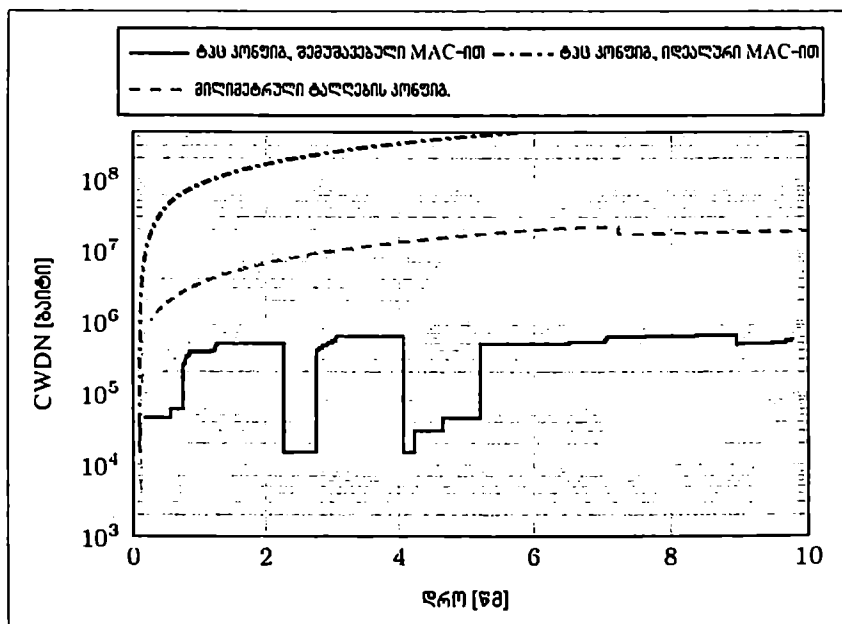
და სხვის მენეჯმენტისათვის, როგორც უკვე აღვნიშნეთ, არამედ მომხმარებლის სიბრტყისთვისაც, როდესაც ხორციელდება მონაცემთა პაკეტების გადაგზავნა სხვადასხვა შესაძლო საეთერო ინტერფეისებზე, მიმორიგებული გადაცემის უზრუნველსაყოფად.

4.7. ბიტების გადადგილება ერთი ბოლოდან მეორე ბოლომდე

როგორც ადრე აღვნიშნა, ფიქური ან სპეციალური ქსელების ტერაპერცული ლინკები გამჭოლი კავშირის დროს შეადგენენ გადასვლების მხოლოდ ნაწილს და გადაიტანენ განსხვავებული აპლიკაციების ფართო სპექტრის მიერ წარმოქმნილ ტრაფიკს სხვადასხვა ძირითადი სატრანსპორტო პროტოკოლით, მაგალითად, გადაცემის მართვის პროტოკოლით (Transmission Control Protocol, TCP). ამრიგად, გამჭოლი (ბოლოების დამაკავშირებელი) კავშირის მახასიათებლები განისაზღვრება ამ აპლიკაციებსა და პროტოკოლებს და ფიზიკურ ფენაში არსებულ რესურსებს შორის ურთიერთქმედებით, ხოლო სუბოპტიმალურმა ურთიერთქმედებამ შეიძლება ხელი შეუშალოს ტერაპერცული კავშირების სიხშირის გატარების ფართო ზოლის და მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარეების სრულ გამოყენებას. არსებული კვლევები გვიჩვენებენ, რომ მილიმეტრულ ტალღებზე ფუნქციონირებისას, არხში დიდი ოდენობის წყვეტები და სხივების ფორმირების პროცესი აუარესებენ TCP გადატვირთვის ტრადიციული მართვის სქემების მუშაობას. ამიტომ, ტერაპერცული ლინკების პროტოკოლის სტეკის შემუშავებისას უნდა იქნას გათვალისწინებული სატრანსპორტო ფენასთან ურთიერთქმედებაც.

ნახ. 4.5 ასახავს TCP-ის პრობლემებს ტერაპერცული ლინკებისათვის, კერძოდ შედარებულია დაგროვების ფანჯრის ევოლუცია ერთი

TCP ნაკადისათვის მილიმეტრული ტალღების ლინკზე (28 გჰც) დაგეგმილი MAC-ით და ტერაჰერცულ ლინკზე (1.0345 ტჰც) ორი MAC ფენის კონფიგურაციით. პირველს აქვს კონკრეტული სხივის მენეჯმენტი და კონკურენცია, ხოლო მეორე იდეალურია (ანუ, ყოველთვის ყველა რესურსი, ერთი და იგივე მომხმარებელს ენიჭება, სხივების საუკეთესო წყვილის საშუალებით). აქ CWDN (Congestion Window) აღნიშნავს დაგროვების ფანჯარას.



ნახ. 4.5. TCP CUBIC დაგროვების ფანჯრის ევოლუცია. საბაზო სადგური და მობილური მოწყობილობა 1 მ მანძილზეა, იგივე კონფიგურაციით, როგორც ნახ. 4.4-ზე

ჩვენ ვაკვირდებით, რომ დაგროვების ფანჯარა ტერაჰერცული ლინკით და რეალისტური MAC-ით მცირდება რამდენჯერმე, მაგრამ არა იმის გამო, რომ გამტარუნარიანობაა მიღწეული, არამედ კონკურენცია-

ზე დაფუძნებულ წვდომასა და TCP ქრონომეტრებს (რომლებიც ახდენენ ტაიმ-აუტების გაშვებას და დაგროვების ფანჯრის აღდგენას) შორის არაეფექტური ურთიერთქმედების გამო. საერთო ჯამში, უფრო ფართო სიხშირის გატარების ზოლის მიუხედავად, საშუალო გამტარუნარიანობით 66 მბიტ/წმ 520 მბიტ/წმ-ს წინააღმდეგ, ეს კონფიგურაცია მახასიათებლების მიხედვით ბევრად უარესია, ვიდრე მილიმეტრულ ტალღებზე დაფუძნებულ კონფიგურაცია. იდეალური MAC კონფიგურაცია ხაზს უსვამს კიდევ ერთ პრობლემას, რომელსაც TCP შეიძლება განიცდიდეს ტერაჰერცულ კავშირებზე: ფიზიკური ფენის ხელმისაწვდომი რესურსების არაოპტიმალური გამოყენება, TCP-ის ნელი წრფივი წამატების გამო დაგროვების თავიდან აცილების პროცესში.

დაბოლოს, მობილურ მოწყობილობებში დღეისთვის არსებული პროტოკოლის სტეკები არ არის შექმნილი მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის გასაუმჯობესებლად, რამაც შეიძლება ათობით გბიტ/წმ-ს მიაღწიოს. გამტარუნარიანობის ზრდასთან ერთად, მოწყობილობის CPU უფრო დატვირთულია, ვინაიდან ამუშავებს მიღებულ პაკეტებს. უფრო მეტიც, დაგროვებისა და ნაკადის მართვის შესახებ გადაწყვეტილებები ბევრად უფრო ხშირად უნდა იქნას მიღებული. ამიტომ, ქსელის სტეკის დამუშავებამ შეიძლება სწრაფად განმუხტოს მობილური მოწყობილობების აკუმულატორი, როდესაც ფუნქციონირება ხდება მაღალი გამტარუნარიანობით. ეს იძლევა საფუძველს, რათა ჩატარდეს დამატებითი სიმულაციური და ექსპერიმენტული კვლევები ტერაჰერცულ სიხშირეებზე უფრო მარტივი ქსელისა და სატრანსპორტო პროტოკოლების შემუშავების პროცესში (მაგალითად, UDP და QUIC პროტოკოლებზე, ან TCP-ის სამომავლო განვითარებაზე დაყრდნობით). უფრო მეტიც, საჭიროა დამატებითი ანალიზის ჩატარება იმის გასარკვევად, არის თუ არა გადატვირთვის მექანიზმები სასარგებლო ტერაჰერცული ლინკებისათვის, მონაცემების გადაცემის მოცემული სიჩქარეების გათვალისწინებით.

4.8. მეოთხე თავის დასკვნები და ღია საკითხები

ტერაჰერცული ფიზიკური ფენის დიზაინი კვლავაც წარმოადგენს სამეცნიერო კვლევის თემას მრავალი მიმართულებით. ამ თავში, ჩვენ წარმოვადგინეთ სტეკის პროტოკოლის მაღალ ფენებთან ასოცირებული მთავარი საკითხები, ასევე განვიხილეთ განთავსებასთან და ენერგომოხმარებასთან დაკავშირებულ გამოწვევები.

დავადგინეთ შესაბამისი ქსელური პრობლემები, წარმოვადგინეთ ამ პრობლემების ანალიზი და წინასწარი შედეგები, რაც ხელს შეუწყობს მომავალი კვლევის ჩატარებას 6G ტერაჰერცის ქსელებზე MAC ფენაზე და ზემოთ. ჩვენი ანალიზის შედეგად გამოიკვეთა მომავალ კვლევებთან დაკავშირებული ხუთი ძირითადი კითხვა:

- როგორ შეიძლება შემუშავდეს სხივების მართვისა და მედიუმთან წვდომის სქემები, ტერაჰერცული სპექტრის მახასიათებლების გამოყენებისთვის, მაგალითად, ზონდირების, ანტენის დიდი მასივებისა და კომუნიკაციების კომბინირებით?
- ჭირდებათ კი ტერაჰერცულ ქსელებს საიმედო მართვის სიბრტყე და დაგეგმილი MAC-ი, თუ უზრუნველყოფს კონკურენციაზე დაფუძნებული წვდომა უკეთეს გაცვლით თანაფარდობას რეალიზაციის სირთულესა და მახასიათებლებს შორის? როგორ შეიძლება მმართველი სიბრტყის გაფართოება მეტაზე-დაპირებზე?
- რომელია ყველაზე უფრო ეფექტური სტრატეგიები, რომლებიც საშუალებას მოგვცემენ განვათავსოთ მაღალი სიმკვრივის და ენერგოეფექტური ქსელი?
- რა ტიპის პოლიტიკა უნდა შემუშავდეს ტერაჰერცული სპექტრის სამართავად, დინამიური ინტერფერენციის წყაროების, ხელმისაწვდომი ფართო სიხშირის გატარების ზოლის და მრავ-

ვალკავშირიანობის გამოყენების შესაძლებლობის გათვალისწინებით?

- როგორ შეიძლება სატრანსპორტო პროტოკოლების შემუშავების და რეალიზაციის პროცესი განვითარდეს ისე, რომ დაკმაყოფილდეს ულტრა ფართო სიხშირის გატარების ზოლში ფუნქციონირებადი ძალიან ცვალებადი ლინკების მოთხოვნები?

კვლევის პროცესში წამოჭრილი ეს კითხვები და მოცემული თავში განხილული იდეები შეიძლება გამოყენებულ იქნას, როგორც ამოსავალი წერტილი, გამჭოლი სრული სტეკის ტერაჰერცული ქსელების ანალიზისათვის და პროექტირების კუთხით შემდგომი პროგრესისთვის, უპრეცედენტოდ დიდი სიხშირული გატარების ზოლისაგან (რაც ხელმისაწვდომია სპექტრის ამ ნაწილში) სარგებლის მისაღებად.

მეოთხე თავში გამოყენებული ლიტერატურა

- I. F. Akyildiz *et al.*, “Realizing Ultra-Massive MIMO (1024×1024) communication in the (0.06-10) Terahertz Band”, *Nano Commun. Networks*, vol. 8, June 2016, pp. 46-54.
- I. F. Akyildiz *et al.*, “Combating the Distance Problem in the Millimeter Wave and Terahertz Frequency Bands”, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 6, June 2018, pp. 102-08.
- R. Barazideh *et al.*, “Reinforcement Learning for Mitigating Intermittent Interference in Terahertz Communication Networks”, *IEEE ICC Wksp.*, June 2020.
- Y. Ghasempour *et al.*, “Single-Shot Link Discovery for Terahertz Wireless Networks”, *Nature Commun.*, vol. 11, no. 1, Apr. 2020, pp. 1-6.

- M. Giordani *et al.*, "Toward 6G Networks: Use Cases and Technologies", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 3, Mar. 2020, pp. 55-61.
- M. Giordani *et al.*, "A Tutorial on Beam Management for 3GPP NR at mmWave Frequencies", *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 1, 1st qtr. 2019, pp. 173-96.
- Z. Hossain *et al.*, "TeraSim: An ns-3 Extension to Simulate Terahertz-Band Communication Networks", *Nano Commun. Networks*, vol. 17, Sept. 2018, pp. 36-44.
- J. M. Jornet *et al.*, "Channel Modeling and Capacity Analysis for Electromagnetic Wireless Nanonetworks in the Terahertz Band", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 10, Oct. 2011, pp. 3211-21.
- V. Petrov *et al.*, "Interference and SINR in Millimeter Wave and Terahertz Communication Systems with Blocking and Directional Antennas", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 3, Mar. 2017, pp. 1791-1808.
- C. V. Phung *et al.*, "Improving THz Quality-of-Transmission with Systematic RLNC and Auxiliary Channels", *IEEE ICC Wksp.*, 2020.
- M. Polese *et al.*, "Toward End-to-End, Full-Stack 6G Terahertz Networks", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 11, Nov. 2020, pp. 48-54.
- T. S. Rappaport *et al.*, "Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond", *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 78729-57.
- M. Mezzavilla *et al.*, "End-to-End Simulation of 5G mmWave Networks", *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, 3rd qtr. 2018, pp. 2237-63.

- Q. Xia *et al.*, "A Link-layer Synchronization and Medium Access Control Protocol for Terahertz-band Communication Networks", *IEEE Trans. Mobile Comp.*, vol. 20, no. 1, Jan. 2021, pp. 2-18.
- L. Yan *et al.*, "A Dynamic Array-of-Subarrays Architecture and Hybrid Precoding Algorithms for Terahertz Wireless Communications", *IEEE JSAC*, vol. 38, no. 9, Sept. 2020, pp. 2041-2056.
- 3GPP, "TR 38.901, Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz", V16.1.0, 2020.

თავი 5. 6G ეპოქა – ულტრა დაბალი შეყოვნება, მცირე ენერგია და მასიურობა CSIT-ით შეზღუდული სქემების ბაზაზე

5.1. შესავალი

ინფორმაცია არხის მდგომარეობის შესახებ (Channel State Information, CSI) ტრადიციული უსადენო საკომუნიკაციო სისტემების ძირითადი პარამეტრია, მაგრამ მისი მოპოვება შესაძლოა გაძნელდეს მომავლის ქსელებში, რომლებიც მხარს დაუჭერენ მომსახურების ხარისხის ისეთ მკაცრ შეზღუდვებს, როგორებიცაა უკიდურესად დაბალი შეყოვნება, მცირე მოხმარებული ენერგია და ერთდროულად დაკავშირებული მოწყობილობების დიდი რაოდენობა, სადაც CSI-ს განსაზღვრა ძვირი და არაპრაქტიკული გახდება. ჩვენ მიმოვიხილავთ CSI-ს მთავარ შეზღუდვებს გადამცემი (Transmit) მხარის (CSIT) შესაბამის დიზაინებში 6G-ს ეპოქის გამოწვევების გათვალისწინებით; შევაფასებთ, თუ როგორ უნდა შემუშავდეს და გამოვიყენოთ ეფექტური CSIT-ით შეზღუდული სქემები, რომლებიც საშუალებას იძლევიან დავაკმაყოფილოთ ახალი და მკაცრი მოთხოვნები და გამოვიყოფთ კვლევის ზოგიერთ ძირითად მიმართულებას. ჩვენ ჩავუღრმავდებით საპილოტე მიმდევრობების ეფექტურად განაწილების იდეებს, რომლებიც ეყრდნობიან სტატისტიკურ CSIT-ს ან/და ადგილმდებარეობაზე დაფუძნებულ სტრატეგიებს; დაბოლოს, შერჩეულ გამოყენების შემთხვევებზე დაყრდნობით, ჩვენ ვუჩვენებთ ამ იდეების სიცოცხლისუნარიანობას.

5.2. CSIT-ით შეზღუდული სქემების შემუშავება

როგორც მრეწველობის, ასევე აკადემიური სფეროების ძალისხმევა მიმართულია მონაცემებით გადატვირთული მდგრადი საზოგადოების ჩამოყალიბებისკენ, რომელიც უზრუნველყოფს თითქმის მყისიერ შეუზღუდავ ეკოლოგიურად უსაფრთხო კავშირს, რასაც მიჰყავართ 6G-ს ეპოქასთან. აქ, ძირითადი გამოწვევები დაკავშირებულია არაერთგვაროვანი მახასიათებლების ფართო სპექტრის მხარდაჭერასთან და ურთიერთსაწინააღმდეგო მოთხოვნებთან, როგორებიცაა მაგალითად, ულტრა დაბალი შეყოვნება, ულტრა მაღალი სიმძლავრე, დაბალი ენერგომოხმარება, მასიური კავშირის მხარდაჭერა და ულტრა მაღალი მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე. ეს რთული მოთხოვნები მოითხოვს სისტემის ოპტიმიზაციის ჩვეულებრივი მიდგომებისა და დიზაინის კრიტერიუმების სრულ გადახედვას. მაგალითად, არხის მდგომარეობის შესახებ ზუსტი ინფორმაცია ანუ CSI, რომელიც მიიღება პილოტ-სიგნალების სატრენინგო მიმდევრობების სათანადო გადაცემით, თანამედროვე საკომუნიკაციო სისტემების ძირითადი პარამეტრია. ამასთან, მართალია CSI-ს მიღებაზე გაწეული დახარჯები, როგორც წესი, უმნიშვნელოა ტრადიციულ ფართოზოლოვან ქსელებზე ორიენტირებულ სერვისებში, მაგრამ ეს არ შეიძლება მისაღები იყოს შეყოვნებასა და ენერგიის ხარჯვაზე მკაცრი შეზღუდვების ან/და უზარმაზარი რაოდენობის მოწყობილობების მომსახურების პირობებში.

CSI მიმღების (Receiver) მხარეს (CSIR), საშუალებას იძლევა გამოყენებულ იქნას კოჰერენტულ მიმღებთა სქემები, რაც აოპტიმიზებს მონაცემთა დეკოდირების პროცედურებს. მასთან დაკავშირებული ხარჯები წარმოადგენს კომუნიკაციის დამატებით შეფერხებას, ვინაიდან მონაცემთა დეკოდირება არ იწყება CSIR-ის მოპოვების დასრულებამდე და დამატებითი ძალისხმევა აუცილებელია, არა მხოლოდ სიგნალის ფაზის შესაფასებლად, არამედ კოჰერენტული დეკოდირების განსა-

ხორციელდება. სიტუაცია უფრო რთული ხდება გრანტის გარეშე (Grant-free) წვდომის სქემებში, რომლებშიც არ ხდება ფაზის დარეზერვება. აღვნიშნავთ, რომ ულტრა საიმედო და დაბალი შეყოვნების კომუნიკაციისათვის (Ultra-Reliable Low-Latency Communication, URLLC), დაბალ შეყოვნებასთან დაკავშირებული შეზღუდვის დასაკმაყოფილებლად, გრანტის გარეშე გადაცემა არის სიცოცხლისუნარიანი გამოსავალი, სადაც UE გადასცემს თავის მონაცემებს დაშვებისგან თავისუფალი რესურსით, როგორც კი ეს მონაცემები ბუფერში განთავსდება. UE გადასცემს მონაცემებს შესვლა-გასვლის სწრაფ რეჟიმში, დაგეგმვაზე მოთხოვნის შეტყობინების გაგზავნის და ქსელიდან რესურსების გამოყოფაზე შეტყობინების მიღების გარეშე. ყოველივე ეს მნიშვნელოვნად ამცირებს შეყოვნებას. გადაცემა არის შემთხვევითი და ხდება წინასწარ განსაზღვრული, კონკურენციული რესურსების დამგროვებელის გამოყენებით. ამრიგად, შესაძლოა მოხდეს კონფლიქტები მომხმარებლების გადაცემებს შორის, განსაკუთრებით მჭიდრო განთავსებების პირობებში. გამოჩნდა კომპრესირებული ზონდირების ისეთი მეთოდები, როდესაც მომხმარებლები ამატებენ მიმდევრობებს და გადასცემენ მონაცემებს, რომლებიც შემდეგ გამოიყენება როგორც აქტივობის გამოვლენისთვის, ასევე CSIR-ის მოსაპოვებლად. CSIR-ის მოპოვების პრობლემა კიდევ უფრო კრიტიკულია დროში ცვალებად არხებში (მაგალითად, მაღალი მობილურობის პირობებში), რომელთათვისაც არაკოჰერენტული სქემები უზრუნველყოფენ უკეთეს შედეგებს.

გამოწვევები და მასთან დაკავშირებული ხარჯები უფრო მკაცრია, როდესაც CSI მოითხოვება გადამცემის მხარეს (CSIT), მაგალითად, ოპტიმალური მრავალმომხმარებელიანი სივრცითი წინასწარი კოდირების ან/და რესურსების განაწილების ინტელექტუალური სქემებისთვის. სინამდვილეში, CSIT-ს მოპოვება ძალზე შეზღუდულია URLLC რეალიზაციისა და დაბალი ენერგიის სისტემების მასიური განთავსებისთვის, რაც ხელს უწყობს CSIT-ით შეზღუდული ეფექტური სქემების

შემუშავებას. აღსანიშნავია, რომ ათწლეულების წინ, ადაპტური მოდუ-
ლაციისა და კოდირების სქემებისა და მრავალანტენიანი სისტემების
სხივების მიმართულობის დიაგრამის ფორმირებამდე (შემდგომში, სი-
მარტივისთვის, სხივების ფორმირებამდე), უსადენო საკომუნიკაციო
სისტემები მუშაობდნენ CSIT-ის გარეშე. ამასთან, როგორც არასდროს,
ამჟამინდელი და სამომავლო სისტემების მუშაობის მკაცრი მოთხოვნე-
ბი უფრო პრობლემატურს ხდის CSIT-ით შეზღუდული სქემების შემუ-
შავებას და დანერგვას. ამ თავში, ჩვენ ამ საკითხებზე გავამახვილებთ
ყურადღებას და განსახილველი ოთხი ასპექტი გამოიყოფა შემდეგნა-
ირად:

- განვიხილავთ 6G ეპოქის მოთხოვნების დაკმაყოფილების კუ-
თხით CSIT-ის მოპოვებასთან დაკავშირებული პროცედურების
ხარჯებსა და გამოწვევებს;
- მიმოვიხილავთ ლიტერატურიდან ცნობილ, განხილვის პრო-
ცესში მყოფ რამდენიმე გადაწყვეტილებას და შემოთავაზებულ
ახალ იდეებს, რომლებიც საშუალებას იძლევიან თავიდან იქნას
აცილებული მყისიერი CSIT-ის საჭიროება, რაც უზრუნველ-
ყოფს ულტრა დაბალ შეყოვნებას, დაბალ ენერგეტიკულ დანა-
ხარჯებს და მასიურ კომუნიკაციებს;
- შევისწავლით გამოყენების მაგალითს იმის შესახებ, თუ როგორ
შეიძლება სიმძლავრით ეფექტურად უზრუნველყოთ დიდი
რაოდენობის ენერგიის შემგროვებელი მოწყობილობები, CSIT-
სგან თავისუფალი სქემების მეშვეობით;
- განვიხილავთ ღია პრობლემებს და სამომავლო კვლევით მი-
მართულებებს, CSIT-ით შეზღუდული ეფექტური სქემების შე-
მუშავების პროცესში.

5.3. CSIT-ის მოპოვებისთვის გაწეული დანახარჯები

როგორც წესი, CSIT-ზე დაფუძნებულ გადაწყვეტილებები გამომდინარეობს იმ დასაბუთებული ვარაუდისგან, რომ არხის შესახებ ინფორმაცია ქსელში ადვილად და ფართოდ ხელმისაწვდომია. ამასთან, ასეთი CSIT-ის მოპოვება ძვირი და შეუძლებელიც კი არის რეალიზაციის პრაქტიკულ სცენარებში. ამ პარაგრაფში, ჩვენ მიმოვიხილავთ ამ პრობლემასთან დაკავშირებულ დანახარჯებსა და გამოწვევებს. სიმარტივისთვის, შემდგომში აღვნიშნოთ S -ით კვანძი, მონაცემთა შეტყობინებით, რომელიც მზად არის გადასაცემად, ხოლო D -თი ამ შეტყობინებისთვის განკუთვნილი მიმღები.

5.3.1. შეყოვნების ღირებულება

დუპლექსურ სისტემებში არხების სიხშირული დაყოფით (Frequency-Division Duplex, FDD), სადაც დაუნლინკის და აპლინკის არხები მუშაობენ სხვადასხვა სიხშირეზე, S გადასცემს პილოტურ სიგნალებს, ხოლო D იყენებს მათ არხის შესაფასებლად. შემდეგ D უკან უგზავნის ინფორმაციას S -ს, რითაც შემოაქვს დამატებითი შეყოვნება და წარმოქმნის შეცდომებს. თუ CSIT-ის მოპოვების დრო შეზღუდულია, სიზუსტე (პირდაპირ არის დაკავშირებული საპილოტე სიგნალის ენერგიასა და ორთოგონალურობის დონესთან, კვანტიზაციის დასაშვებ შეცდომასთან ერთად) და საიმედოობა (განისაზღვრება უკუკავშირის არხში შეცდომის დონის მახასიათებელით) შეიძლება სერიოზულად გაუარესდეს. როდესაც D არის ძალიან მარტივი მოწყობილობა, მაგალითად, IoT სენსორი, არხის შეფასება შეიძლება იყოს შეუძლებელი იმის გამო, რომ შეზღუდულია საბაზისო სიგნალის დამუშავების შესაძლებლობები. ტრენინგის ზედნადები სასიგნალო ხარჯები იზრდება გა-

დამცემი ანტენების რაოდენობასთან ერთად; ამრიგად, წარმოიქმნება პრობლემები, როდესაც S აღჭურვილია ანტენების დიდი მესრებით.

მეორეს მხრივ, დუპლექსურ სისტემებში არხების დროითი დაყოფით (Time-Division Duplex, TDD), სადაც აპლინკისა და დაუნლინკის არხები იყოფენ ერთსა და იმავე სიხშირულ რესურსს, ზემოხსენებული საკითხების მოგვარება შესაძლებელია არხების ურთიერთობის (Reciprocity) გამოყენებით (გადამცემს შეუძლია დაუნლინკის არხის შეფასება აპლინკის არხის ზონდირებით და პირიქით). ამასთან, არხების ეს ურთიერთობა მგრძნობიარეა აპარატურის დაზიანების მიმართ, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც S და D ძალიან განსხვავებული მოწყობილობებია. ზოგადად, არხების არაერთგვაროვნების შესამცირებლად, საჭიროა დაკალიბრების მეთოდების გამოყენება. მიუხედავად იმისა, რომ მათ შეიძლება იმუშაონ ხანგრძლივი დროის განმავლობაში, მაგალითად, თითოეული 10 წუთი ცენტრალიზებული MIMO სისტემებში საერთო დროის განაწილებით, ისინი შეიძლება მოთხოვნილი იყვნენ ფრეიმებზე დაფუძნებულ განაწილებულ არქიტექტურაში. მიმდების მობილურობა, რაც იწვევს დროში ცვალებად არხებს, განსაკუთრებით დაუნლინკსა და აპლინკს შორის, საკმაოდ რთულს და ბვირადღირებულს ხდის არხის თვალყურის დევნებას და წარმოადგენს კიდევ ერთ მნიშვნელოვან გამოწვევას.

CSIT-ის მოპოვებისათვის დროზე დამოკიდებული მოთხოვნები არ არის ტრივიალური, TDD-სთვისაც კი, და ისინი პროპორციულად იზრდებიან საპილოტე მიმდევრობების სიგრძის შესაბამისად, რომელიც ჩვეულებრივ გამოთვლილია ისე, რომ თავიდან იქნას აცილებული არაორთოგონალურობა მრავალ მომხმარებელთა არაკოორდინირებულ რეალიზაციებში.

5.3.2. ენერგიის ღირებულება

ზოგადად, CSIT შეფასების სიზუსტე დამოკიდებულია დაკავშირებულ პროცედურებში დახარჯულ ენერგიაზე. IoT-ის D მოწყობილობის მიერ დახარჯული ენერგია პროპორციულია პილოტ-სიგნალის ენერგიის TDD-ში, რომელიც მკაფიოდ განისაზღვრება ტრენინგის დროით და სიმძლავრით, მაშინ როდესაც D მოწყობილობის მიერ FDD-ში მოხმარებული ენერგია მოიცავს არხის შეფასების დროს (რომელიც ტრენინგის დროის პროპორციულია) და უკუკავშირით გადაცემისას დახარჯულ ენერგიებს (ეს უკანასკნელი TDD-ში ტრენინგის სიმძლავრის ექვივალენტია). ამრიგად, შესაძლებელია გარკვეული კომპრომისის მიღწევა ელექტროენერგიის ხარჯვასა და CSIT-ის სიზუსტეს შორის, რაც გავლენას ახდენს მონაცემთა გადაცემის შემდგომ ეტაპზე. ლიტერატურაში ხშირად განიხილება სისტემის ენერგოეფექტურობის ოპტიმიზაციის პრობლემა, რომელიც იზომება მონაცემების სასარგებლო გამტარუნარიანობასა (ან გადაცემის სიჩქარესა) და სიმძლავრეს (ან ენერგიას) შორის ფარდობით, არასრულყოფილი CSIT-ის გათვალისწინებით. ამასთან, დაბალი სიმძლავრის IoT-ში, დაბალი ენერგიით ოპერირება ხშირად ბევრად უფრო მნიშვნელოვანია, ვიდრე მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე ან გამტარუნარიანობის მახასიათებლები. ძირითადი მიზეზები არის ის, რომ (ა) – გადაცემები უმეტესად სპორადულია (მაგალითად, მოვლენებზე ორიენტირებული ტრაფიკის გამო), (ბ) – გადაცემის სიჩქარე ხშირად არსებითად მცირე და ფიქსირებულია და (გ) – ასეთი მარტივი მოწყობილობები მუშაობენ აკუმულატორით ან დაკავშირებული არიან ენერგიის სუსტ წყაროებთან, როგორც ამას ადგილი აქვს საკომუნიკაციო ქსელებში უსადენო ენერგიის გამოყენებით. მთავარი საკითხი მდგომარეობს ქსელის მუშაობის ვადის ოპტიმიზაციაში, რათა თავიდან იქნას აცილებული არხების ტრენინგის ხში-

რი პროცედურები, რომლებზეც იხარჯება მნიშვნელოვანი ენერგეტიკული რესურსები.

5.3.3. მასშტაბურობა

კოორდინირებულ სისტემებში ტრენინგის ზედნადები სასიგნალო ხარჯები შეიძლება დარჩეს ფიქსირებული, მაგრამ ამასთან ერთად ბერადღირებული, რაც განპირობებულია დაგეგმვის (თუ ტრაფიკი არ არის პერიოდული ან ნახევრად პერიოდულია) და სინქრონიზაციის ხარჯებით. მეორეს მხრივ, არაკოორდინირებულ ერთფიჭიან/ცენტრალიზებულ ქსელებში ეს ხარჯები იზრდება:

- (მინიმუმ) ლოგარითმულად, TDD-ში ქსელის ზომის მიხედვით, რათა უზრუნველყოფილი იქნას პილოტ-სიგნალების ორთოგონალურობა და, შესაბამისად, კონფლიქტების თავიდან აცილება;
- წრფივად, FDD-ში S -ში ანტენების რაოდენობის ზრდასთან ერთად, რათა მოხდეს თითოეული გადამცემი ანტენის მიერ არხის შეფასება.

იმავდროულად, სიტუაცია უფრო კრიტიკულია მრავალფიჭიან ქსელებში და სისტემებში განაწილებული ანტენებით (Distributed Antenna Systems, DAS), რადგან ტრენინგის სასიგნალო ხარჯები იზრდება ასევე სისტემის ზომის/სიმკვრივის შესაბამისად. ამასთანავე, შეიძლება საჭირო იყოს შეფასების გაუმჯობესებული საშუალებები და პილოტ-სიგნალების გონივრული დაგეგმვა არხის მდგომარეობის ზუსტი შეფასების მისაღებად და, მაგალითად, ეფექტური მასიური MIMO-ს უზრუნველსაყოფად.

5.4. CSIT-ით შეზღუდული გადაწყვეტილებები 6G სისტემებისთვის

5G სისტემებმა უკვე შემოიტანეს სერვისები ულტრა დაბალი შეყოვნების, ენერგოეფექტურობის და მასიური მხარდაჭერის მოთხოვნებით, რომელთათვისაც ზემოხსენებული CSIT-ის მოპოვების ხარჯები რთულად გადასალახი ბარიერია. ამასთან, ამოცანები, რომლებიც დგას 6G ეპოქის მიმართ, უდავოდ უფრო მძიმეა, ვინაიდან მახასიათებლებზე მოთხოვნები უფრო ჰეტეროგენული, კონფლიქტური და მკაცრი იქნება, ვიდრე ოდესმე, მაგალითად, ნულოვანი ენერგიის (Zero Energy, ZE) მოწყობილობებით 3D ფართო დაფარვის და უკიდურესად დაბალი შეყოვნების მქონე ულტრა საიმედო ფართოზოლოვანი სერვისების უზრუნველსაყოფად. ეს მოტივირებული იქნება ახალი გამოყენების სცენარებით, როგორებიცაა გრძნობების ინტერნეტი (Internet of Senses, IoS) და ZE IoT, და რთული ტექნოლოგიების ფართო დანერგვით, როგორებიცაა, მაგალითად, ინტელექტუალური ამრეკლავი ზედაპირები (Intelligent Reflecting Surfaces, IRS), ენერგიის შეგროვება, კომუნიკაციები უკუგაფანტვით და განაწილებული ლეჯერი (Distributed Ledger). ჩვენ განვიხილავთ პერსპექტიულ სტრატეგიებს 6G სისტემებში ულტრა დაბალი შეყოვნების, დაბალი ენერგიის და ექსტრემალური მასიურობის მხარდაჭერის უზრუნველსაყოფად. აღსანიშნავია, რომ ულტრა დაბალი სიმძლავრის სქემების დიზაინის, მანქანური სწავლების (ანუ ML-ის) და ხელოვნური ინტელექტის (ანუ AI-ის) ალგორითმების და სანტიმეტრის/მილიმეტრის დონის სიზუსტის პოზიციონირების ტექნიკის სავარაუდო მიღწევები ხელს შეუწყობენ ამგვარი სტრატეგიების დანერგვას 6G ეპოქის პირობებში.

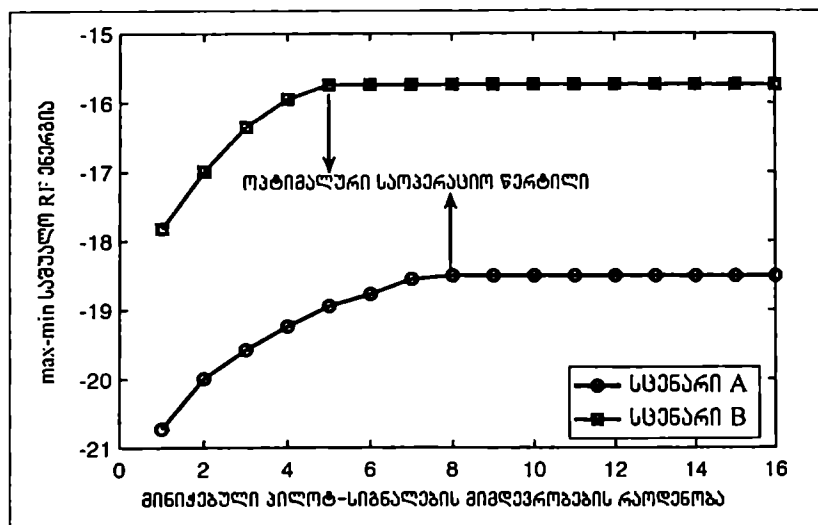
5.4.1. პილოტ-სიგნალების მიმდევრობების ეფექტური გამოყოფა

რაც უფრო მეტი ქსელის პილოტ-სიგნალია გამოყენებული CSIT-ს მოპოვებისათვის, მით უფრო მკაცრია მოთხოვნები დროის დანახარჯებზე და ენერგიის მოხმარებაზე. ამრიგად, ქსელის ზრდასთან ერთად, ორთოგონალური პილოტ-სიგნალებით სარგებლობა ხდება არა-ეფექტური და მიუწვდომელი. საპილოტე ჯგუფების მკაცრი შეზღუდვით, არა მხოლოდ შეიძლება შემცირდეს საჭირო დროისა და ენერგიის დანახარჯები, არამედ ალტერნატიულად, ნებადართული ხდება ქსელის მასშტაბირება. არაორთოგონალური პილოტ-სიგნალების მიმდევრობის გამოყენება შეიძლება მიზანშეწონილი იყოს, მაგალითად, თუ გამოვიყენებთ გრანტის გარეშე დაშვების სქემებს, რაც თავის მხრივ ზრდის კონფლიქტების ალბათობას და, შესაბამისად, იწვევს უფრო ხანგრძლივ შეფერხებებს. ამრიგად, ამგვარი კონფლიქტების ხდომილების ალბათობა მინიმუმამდე უნდა შემცირდეს. მაგალითად, ლიტერატურიდან შემოთავაზებულია D დანიშნულების ადგილების კლასტერიზაცია, მათი არხების კოვარიანტობის მატრიცების საფუძველზე, რათა პილოტ-სიგნალები ხელახლა იქნას გამოყენებული მომხმარებლებში, რომლებსაც აქვთ ორთოგონალური არხების საკმარისი ქვესივრცეები, რითაც ამცირებენ პილოტ-სიგნალებით გადატვირთვის ეფექტს მასიურ MIMO რეჟიმში. კლასტერიზაციის მიდგომები ასევე შეიძლება ეფექტურად იქნას გამოყენებული არა მასიური ანტენების რეჟიმში: მაგალითად, მსგავსი ტრაფიკის პროფილის მქონე მოწყობილობები შეიძლება გაერთიანდნენ კლასტერებში და გამოიყენონ პილოტ-სიგნალების სპეციფიკური ჯგუფი (რომელზეც წვდომა შეიძლება მოხდეს შემთხვევითი მეთოდით); ერთი რეალიზაციის დროს მოწყობილობები, მცირე აქტიურობის ალბათობით, შეიძლება დაჯგუფდნენ კლასტერებში, რომელთაც აქვთ პილოტ-სიგნალების უფრო მცირე

ჯგუფები, იმ კლასტერებთან შედარებით, რომლებიც შეიცავენ უფრო დიდი აქტიურობით გამორჩეულ მოწყობილობებს, და რომელთაც, პირიქით, სჭირდებათ პილოტ-სიგნალების უფრო დიდი ჯგუფები. ამ გზით, კონფლიქტების შანსები იკლებს. ამგვარი სტრატეგია, რომელიც რეალიზებადია რისკის მიმართ მგრძნობიარე ახალი ML/AI ალგორითმების საშუალებით, შეიძლება კიდევ უფრო გაუმჯობესდეს მხარდაჭერილი სერვისების სხვადასხვა მახასიათებლებისა და მოთხოვნების გათვალისწინებით. მაგალითად, კლასტერებში უნდა გაერთიანდნენ უფრო მეტი ისეთი პილოტ-სიგნალები, რომლებსაც უფრო მეტი შანსი აქვთ, რომ მოითხოვონ URLLC სერვისები და რომლებიც უფრო მგრძნობიარეა კონფლიქტების მიმართ. მეორეს მხრივ, ZE მოწყობილობები მხოლოდ გარკვეულწილად უნდა იყოს სასურველი, რადგან მათი გადაცემები შეიძლება შინაგანად იყოს შეზღუდული მონაცემთა რაოდენობით/ენერგიით.

ზოგიერთ შემთხვევაში შეიძლება უფრო მიზანშეწონილიც კი იყოს, რომ გარკვეულ მომხმარებლებს სულაც არ მიეკუთვნოთ პილოტ-სიგნალები. ერთ-ერთი ასეთი მაგალითია ენერგიის შემგროვებელი მოწყობილობების უსადენო კვება. განვიხილოთ S სიმძლავრის შუქურა (Power Beacon, PB) მრავალი ანტენით, რომელიც აგზავნის RF სიგნალებს დაბალი სიმძლავრის ენერგიის შემგროვებელი კვანძების $\{D\}$ კვებისათვის, ანუ ენერგიის უსადენო გადაცემის (Wireless Energy Transfer, WET) დაყენებისათვის. S იყენებს სხივების ფორმირებას, რომელიც დაფუძნებულია მყისიერ CSIT-ზე, მოწყობილობების შეგროვებული ენერგიის სტატისტიკის გასაუმჯობესებლად. მაქსიმალური ეფექტურობის მისაღწევად, სხივების ფორმირების პრობლემა შეიძლება გადაწყვეტილი იქნას ისე, რომ მოხდეს იმ მინიმიზირებული ენერგიის მაქსიმალურად გაზრდა, რომლის შეგროვებაც შესაძლებელია ნებისმიერი მოწყობილობის მიერ. ტრადიციული მიდგომა დაეყრდნობოდა არხის ინფორმაციას მოწყობილობების სრული ნაკრების შესახებ, რო-

მელიც შეიძლება იყოს დიდი, რაც ხელს უშლის ენერგოეფექტური პილოტ-სიგნალებით სარგებლობის პერსპექტივას. ამასთან, უსადენო ენერგიით კვების ეფექტურობა სწრაფად მცირდება მანძილთან ერთად, ხარისხის მათემატიკური კანონის შესაბამისად. აქედან გამომდინარე, მოსალოდნელია, რომ ყველაზე შორეული მომხმარებლების არხები უპირატესობას მიიღებენ სხივების ფორმირების შემქმნელ დიზაინში და, აქედან გამომდინარე, არხების ტრენინგი შეიძლება შესაბამისად შემცირდეს, რაც ილუსტრირებულია ნახ. 5.1-ზე. ასევე, LoS-ის ზრდასთან ერთად, უფრო მცირე რაოდენობის პილოტ-სიგნალების მიმდევრობაა საჭირო, რადგან არხები ხდება უფრო დეტერმინირებული.



ნახ. 5.1. დამაბოლოებელ მოწყობილობებზე ხელმისაწვდომი max-min საშუალო RF ენერგია. ჩვენ განვიხილავთ კომპლექსს, რომელიც შეიცავს 16 ენერგიის შემგროვებელ მოწყობილობას და ერთ PB-ს, რომელიც აღჭურვილია ოთხი ანტენით. არხზე ზემოქმედებას ახდენს კვაზი-სტატისტიკური რაისის მიყუჩება პირდაპირი ხედვის (LoS) კოეფიციენტით 3 დბ. თითოეული მოწყობილობა D_i , $i = 1, 2, \dots, 16$, განიცდის გზაში დანაკარგებს $50 + i/2$ დბ (სცენარი A) ან $44 + i$ დბ (სცენარი B). გადაცემის სიმძლავრე ნორმალიზებულია

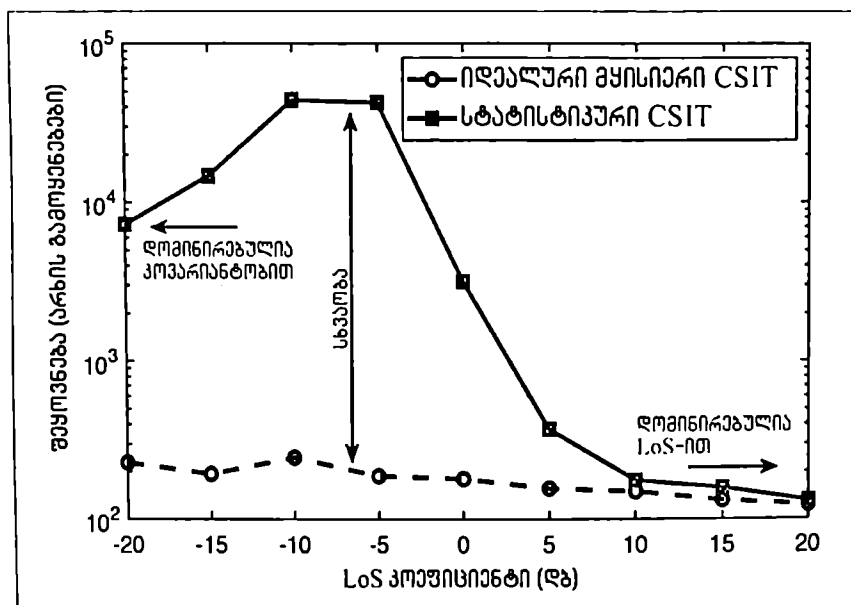
5.4.2. არხის სტატისტიკის და სტრუქტურის გამოყენება

პილოტ-სიგნალების ეფექტურად მიკუთვნებისათვის მიზანშეწონილია არა მხოლოდ მრავალგზიანი გავრცელების სტრუქტურის ან გადამცემი არხების სტატისტიკური ცოდნის გამოყენება, არამედ სხივების სივრცითი ფორმირებაც შეიძლება მთლიანად დაეყრდნოს ამ მახასიათებლებს. სტატისტიკური CSIT ზუსტი რჩება სტატისტიკური დაყენების დიდი დროის პერიოდში და მისი პროგნოზირებაც შესაძლებელია ML/AI და სხვა სტატისტიკური მეთოდების საფუძველზე. ეს საშუალებას იძლევა განვახორციელოთ CSIT-ის მოპოვების პროცედურები, როდესაც შეყოვნება ან/და ენერგიის შეზღუდვა მისაღებია, და დავეყრდნოთ შესწავლილი არხის სტატისტიკას, როდესაც შეზღუდვები გამკაცრდება და CSIT-ის დამხმარე პროცედურები მიუწვდომელია. ამ გზით, პილოტ-სიგნალების რაოდენობა შეიძლება შემცირდეს, რაც დამატებით უზრუნველყოფს ადრე განხილულ შესაძლო უპირატესობებს.

სხივების სტატისტიკურმა მაფორმირებლებმა დიდი ყურადღება მიიპყრო ადრეული GSM სისტემებიდან მოყოლებული ახლანდელ მასიური MIMO-ს პერიოდამდე, თუმცა მათ ვერ მიაღწიეს სრულ წარმატებას. ეს ალბათ იმიტომ ხდება, რომ მათი მახასიათებლები მკაცრად ქვეოპტიმალურია ფართოზოლოვან ქსელებზე ორიენტირებული სერვისებისთვის, სადაც CSIT-ის მოპოვებაზე მყისიერი ზედნადები სასიგნალო ხარჯების ზემოქმედება ჩვეულებრივ უმნიშვნელოა, ან/და როდესაც არხებს აქვთ ტენდენცია მნიშვნელოვანი მიყურებისაკენ. ამასთან, პირველი მიზეზი უკვე არ არის მართებული მრავალი სერვისისათვის და მით უმეტეს 6G ეპოქაში (როგორც ეს ამ თავის წინა პარაგრაფებში იყო განხილული), ხოლო მეორე მიზეზი, შეიძლება არ წარმოადგენდეს პრობლემას ქსელის სიმკვრივის მომატების გამო.

ახლა განვიხილოთ მარტივი კონფიგურაცია, რომელშიც N აღჭურვილია ოთხი ანტენით და დაუნლინკში ემსახურება ერთანტენიან ოთხ

მომხმარებელს. S იყენებს წინასწარი კოდირების ვექტორს, რათა მაქსიმალურად გაიზარდოს მინიმალური გასაშუალოებული სიგნალისა და ინტერფერენცია-პლუს-ხმაურის თანაფარდობა (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR). თუ კვანძები ექვემდებარებიან შეყვანება-გათიშვის შეზღუდვებს, როგორც ესაა URLLC-ში, შეგვიძლია ეს შეზღუდვები ავსახოთ შესაბამის გასაშუალოებულ SINR მოთხოვნებზე, რადგან არხის სტატისტიკა ცნობილია. ნახ. 5.2-ზე ჩვენ შეგვიძლია დავაკვირდეთ, რომ სტატისტიკური წინასწარი კოდერის მახასიათებლები უმჯობესდება LoS (პირდაპირი) კომპონენტის გაძლიერებით, სხვა (გაფანტულ) მრავალ გზაზე გავრცელებულ სხივებთან შედარებით. ეს უაღრესად მნიშვნელოვანია მკვრივი განთავსებებისას და DAS-სთვის, როდესაც საკომუნიკაციო წყვილები განიცდიან გზაში ნაკლები დანაკარგების შესაბამის მიღევას (უფრო მოკლე გამყოფი მანძილების გამო), რაც შედეგად ზრდის შესაბამის მიღებულ ენერგიას LoS კომპონენტის მეშვეობით (პირდაპირი ლინკი). ამრიგად, შესაბამის სტატისტიკურ წინასწარ კოდერს შეუძლია მიაღწიოს თითქმის ოპტიმალურ მახასიათებელს სიგნალების გავრცელების ასეთ პირობებში. ამასთან ერთად, მომავალი უსადენო სისტემები მნიშვნელოვნად ისარგებლებენ IRS-ების მასიური განლაგებით. ეს მეტაზედაპირები, რომლებიც შედგებიან მრავალი პასიური ამრეკლავი ელემენტისგან, გამოიყენებიან S -დან D -ზე გადასვლისას დაბლოკილი საკომუნიკაციო არხების დასახმარებლად, პროგრამული უზრუნველყოფით კონტროლირებადი ალტერნატიული LoS გზის შექმნით. ვინაიდან IRS-ები ძირითადად პასიურია, მათი ურთიერთქმედების მატრიცების შემუშავება არ შეიძლება დაეყრდნოს არხების ხშირ ტრენინგს. სინამდვილეში, როგორც ნახ. 5.2-ზე წარმოდგენილი შედეგებიდან ჩანს, ტრენინგი შეიძლება მნიშვნელოვნად შემცირდეს LoS-ის ინფორმაციაზე დაყრდნობით, რაზეც ძირითადად გავლენას ახდენს არხის საშუალო მაჩვენებელი და ქსელის გეომეტრია.



ნახ. 5.2. შეყოვნების დამოკიდებულება LoS კოეფიციენტზე მიზნობრივი შეცდომის ალბათობისთვის 10^{-4} . ჩვენ განვიხილავთ კვაზი-სტატისტიკურ რაისის მიყრებას, ლინკის მიმართ გასაშუალოებული სიგნალისა და ხმაურის თანაფარდობით 6 დბ. N აღჭურვილია ერთგვაროვანი წრფივი მესრით (Uniform Linear Array, ULA), რომლის ანტენის ელემენტები გაყოფილია ტალღის ნახევარსიგრძით, ხოლო აზიმუტის კუთხე $\{D_i\}$ გადამცემი ანტენის სამიზნის მიმართ ბოლო მოწყობილობებთან დაკავშირებით არის 0° , 30° , 60° და 90° . ჩვენ ვიღებთ ნამდვილი რიცხვებისგან შედგენილ კოვარიანტობის მატრიცებს, ექსპონენციალური კორელაციით და პარამეტრით $i/5$ D_i -თვის

დაბოლოს, სტატისტიკური CSIT და ხელმისაწვდომი გვერდითი ინფორმაცია (მაგალითად, ინფორმაცია აკუმულატორის დატენვის შესახებ) შეიძლება ინტელექტუალურად იქნას გამოყენებული რესურსების ეფექტურად განაწილებისთვის, თუნდაც ერთანტენიან კონფიგურა-

ციებში, მომსახურების ხარისხის (QoS) მიმართ ალბათური შეზღუდვების პირობებში.

5.4.3. ადგილმდებარეობაზე დაფუძნებული სტრატეგიები

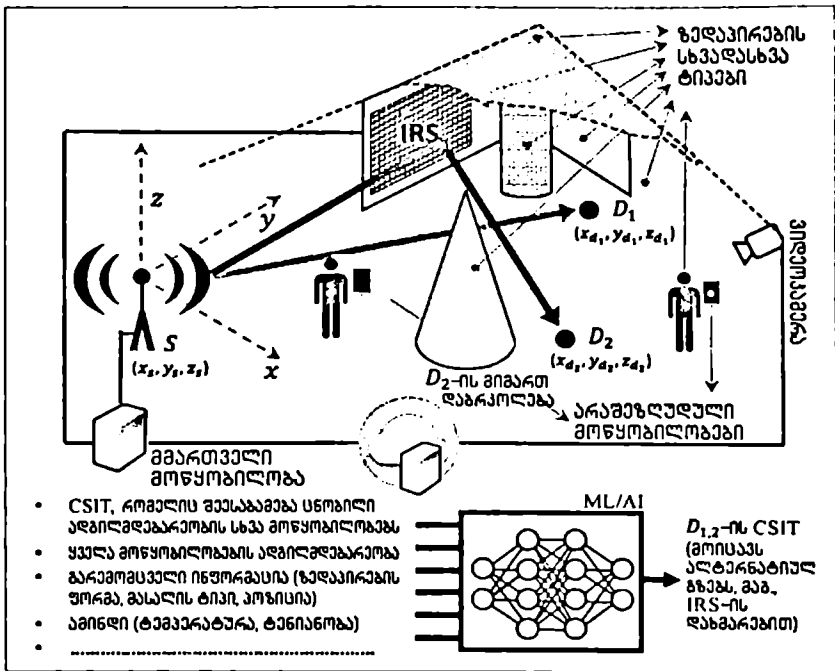
როდესაც CSIT-ის მოპოვება პილოტ-სიგნალების გადაცემებით ხდება ძვირი ან თუნდაც არაპრაქტიკული, შეიძლება გამოყენებულ იქნას ადგილმდებარეობის ინფორმაცია სასიგნალო რესურსების და უკუკავშირის შეფერხების ეფექტურად შესამცირებლად. ადგილმდებარეობის შესახებ ინფორმაცია ღირებულია, მაგალითად, რიგორც მიღებული სიმძლავრის და ინტერფერენციების დონის ინდიკატორი (როგორც კვანძთან დაკავშირებული კრიტერიუმი) და ასევე, ეფექტური სარელეო კავშირის შერჩევისა და მარშრუტიზაციის სტრატეგიის უზრუნველსაყოფად, განსაკუთრებით IoT-ის მომავალში გამოსაყენებული სცენარებისათვის, როდესაც ინფორმაციის ჰეტეროგენული წყაროები დინამიურად ურთიერთქმედებენ განაწილებული წესით. DAS-ში და მრავალკავშირიან სცენარებში ადგილმდებარეობის შესახებ ინფორმაცია შეიძლება გამოყენებულ იქნას სხვადასხვა გადამცემი S კვანძებიდან სიგნალების გავრცელების შეფერხების შესაფასებლად და, შესაბამისად, გადამცემი სიგნალების სინქრონიზაციის ადაპტაციისთვის. ადგილმდებარეობაზე დაფუძნებული გადაწყვეტილებები აღწევენ დაბალ სპექტრულ ეფექტურობას მაღალ დინამიურ სცენარებში, თუმცა დაბალი დანახარჯებით, გაზომვებისა და სიგნალების გაცვლის თვალსაზრისით (ამრიგად, უფრო მეტი დროითი და ენერგეტიკული ეკონომიით), CSIT-ზე დაფუძნებულ ტიპიურ მიდგომებთან შედარებით.

ასევე, არსებობენ გადაწყვეტილებები, რომლებიც ადგილმდებარეობის ინფორმაციას პირდაპირ აკავშირებენ რადიოარხთან, მაგალითად, როდესაც ფიჭის ცენტრში/პერიფერიაზე მყოფი მომხმარებლები, თავიანთი ადგილმდებარეობებიდან გამომდინარე, იყენებენ რესურ-

სებს დაბალი ენერგიის გლობალური ქსელის განთავსებებში. ასეთ შემთხვევაში შესაძლებელია განხორციელდეს ადგილმდებარეობაზე დაფუძნებული სიგნალების მრავალმისამართიანი გადაცემა, რაც კონკურენციის შემცირების გამო ზრდის პაკეტების მიწოდების საიმედოობას. არხების წარმოდგენა ადგილმდებარეობის არეალში, რომელიც დაფუძნებულია ლოკალური გაფანტვის გეომეტრიული შეზღუდვებზე, გამოიყენება არხის ეფექტურად შეფასებისათვის განაწილებულ MIMO სისტემებში პილოტ-სიგნალების შემცირებული რაოდენობით.

ადგილმდებარეობის შესახებ ინფორმაცია ცოტა ხნის წინ გამოყენებული იქნა ML/AI ჩარჩოებში, არხის ხარისხის დასადგენად იმ ადგილებშიც კი, სადაც ადრე არ არსებობდა გაზომვების შესახებ ინფორმაცია. ამასთან დაკავშირებით, გამოყენებულია გაუსის პროცესის მიდგომა მიღებული ენერგიის გაზომვებთან და დროითი კორელაციის მონაცემთა ბაზასთან, რათა დადგინდეს ადგილმდებარეობაზე დამოკიდებული არხის ხარისხი და განისაზღვროს რესურსების განაწილების სტრატეგიები. ზოგადად, ადგილმდებარეობაზე დაფუძნებული CSIT შეფასება თავისი ბუნებით უხეში და სტატისტიკურია, ვინაიდან მცირე მასშტაბის მიყუჩების პროგნოზირება უკიდურესად რთული ამოცანაა. ამასთან, ML/AI-ის მხარდაჭერით გამოყენებულ მეთოდებს შეუძლიათ ისარგებლონ ბევრად უფრო მრავალფეროვანი მონაცემებით, რათა ზუსტად განსაზღვრონ უფრო მაღალი ხარისხის CSIT-ის სტატისტიკა 6G სისტემების მიმართ, რითაც ამცირებენ პროგნოზირების გაურკვევლობას და იძლევიან უფრო ეფექტური გადაწყვეტილების მიღების და რესურსების უკეთ განაწილების საშუალებას. ჩვენ განვიხილავთ ისეთი გამოყენებების სცენარებს, როგორებიცაა ილუსტრირებული ნახ. 5.3-ზე, სადაც საბაზო სადგური S საჭიროებს ეფექტურად მოემსახუროს ორ D_1 და D_2 მოწყობილობას, ხოლო პილოტ-სიგნალების დახმარებით CSIT-ის მოპოვების პროცედურები მიუწვდომელია. ML/AI მეთოდებში შესაძლებელია შეტანილი იქნას ის მონაცემები, რომლებიც,

როგორც ცნობილია, გავლენას ახდენს RF გავრცელების პირობებზე. ეს მონაცემებია:



ნახ. 5.3. ML/AI-ით მხარდაჭერით CSIT-ის მოპოვების ტიპური სცენარი. ადგილმდებარეობის შესახებ ინფორმაცია ყველაზე უფრო მნიშვნელოვანი შემავალი მონაცემია. გამოყენების შესაბამისად, ML/AI ბლოკი შეიძლება იყოს მმართველ მოწყობილობაში ან ღრუბლოვანი სერვერში

- გეომეტრია და გარემოს სამშენებლო მასალები, რომლებიც ძირითადად გავლენას ახდენენ არეკვლის, დიფრაქციის, შეღწევადობისა და გაფანტვის მოვლენებზე და მათი მიღება შესაძლებელია ვიზუალიზაციის საშუალებით, და რომლებიც ხელმისაწვდომია ადგილობრივად ან ღრუბლიდან;
- ამინდის პირობები (ტენიანობა და ტემპერატურა), რომლებიც ცვლის მასალების მახასიათებლებს და მათი მიღება შესაძლებელია

ბელია ღრუბლიდან ან ადგილობრივად, ზონდირების საფუძველზე;

- ფაქტობრივი (განახლებული) მონაცემების ასახვის გარდა, არხის ინფორმაცია გარკვეულ ადგილებში (რომელთა მიღება *A* -ს შეუძლია სხვა არა შეზღუდული მოწყობილობებიდან). გასათვალისწინებელია, რომ ეს მონაცემები გამოიყენება ML/AI ბლოკში შესატანად მხოლოდ მისი განახლებისას; წინააღმდეგ შემთხვევაში იგი გამოიყენება ტრენინგისთვის.

თუ არსებობს იმის ვარაუდი, რომ არხები დაბლოკილია, *A* -ს შეუძლია ისარგებლოს IRS-ის განთავსებების საშუალებით უზრუნველყოფილი ალტერნატიული გზებით. ამ ალტერნატიული არხების შეფასება შესაძლებელია, რაც იძლევა რესურსების ეფექტურად განაწილების საშუალებას *A* -ზე.

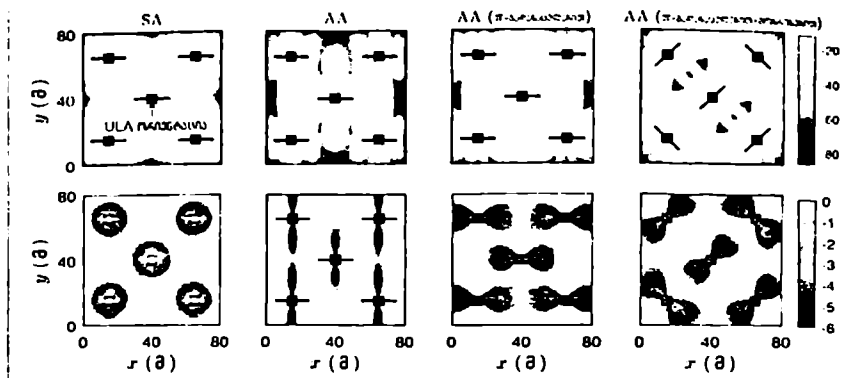
5.5. გამოყენების მაგალითი: CSIT-სგან თავისუფალი მასიური WET

ყველაზე მკაცრი სცენარებისათვის (როგორცაა, მაგალითად, ZE მოწყობილობებისთვის მასიური WET) შეიძლება ძალიან სასარგებლო იყოს CSIT-სგან თავისუფალი სქემები. გასათვალისწინებელია, რომ მყისიერ CSIT-ზე დაყრდნობით მუშაობა (პილოტ-სიგნალების შემცირებული რაოდენობით), როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 5.1-ზე, აქ სრულად მოსახერხებელი არ არის, რადგან ყველაზე უფრო შორს მყოფი (და უფრო ენერგიით შეზღუდული) მომხმარებლები, მაინც იძულებული იქნებიან არხების ტრენინგისთვის დახარჯონ ძვირადღირებული ენერგორესურსები. შეყოვნების მკაცრი შეზღუდვების პირობებში, სხივების სტატისტიკური ფორმირება შესაძლებელია, ანალოგიურად ჩვენი წინა განხილვებისა ნახ. 5.2-სთვის. ამასთან, დამხმარე პროცედურებში ენერ-

გის ხარჯვა სრულად არ არის თავიდან აცილებული. დაბოლოს, რაც უფრო მკვერთია ქსელი, მით უფრო ეფექტურია CSIT-სგან თავისუფალი სქემები.

მასიური WET-სთვის, CSIT-სგან თავისუფალი ორი პერსპექტიული სქემა შემდეგნაირია: (ა) – ყველა ანტენა ფუნქციონირებს ერთდროულად (All Antennas, AA), რომლის მიხედვითაც PB გადასცემს ერთსა და იმავე სიგნალს ყველა ანტენისაგან ერთდროულად და (ბ) – ფუნქციონირება ხდება გადართვადი ანტენებით (Switching Antennas, SA), რომლის მიხედვითაც PB გადასცემს ერთ ანტენიდან ერთ ჯერზე ისე, რომ ყველა ანტენა გამოიყენება კოპერენტული ბლოკის დროს; ამრიგად, საჭიროა მხოლოდ ერთი RF ჯაჭვი, რაც ამცირებს სისტემაში სიმძლავრის მოხმარებას, მოწყობილობების სირთულეს და ოპერაციულ ხარჯებს. ასეთი სქემების გამოყენება დაწყებულია 1990-იანი წლებიდან, მაგრამ უსადენო კომუნიკაციის კონტექსტში, შეზღუდული მრავალმომხმარებლიანი მხარდაჭერით. ამასთან, MIMO-ს და მისი გეომეტრიული მოდელირების, სიგნალის დამუშავების და პროგრამული უზრუნველყოფით კონტროლირებადი როტორების განხრით ბოლოდროინდელმა მიღწევებმა შეიძლება სრულად მოახდინონ მათი პოტენციალის რეალიზაცია მასიური WET-ის კონტექსტში.

დადასტურებულია, რომ AA მნიშვნელოვან სარგებელს იღებს სივრცითი კორელაციისა და LoS-სგან; მიუხედავად იმისა, რომ SA არ აუზრუნველყოფს RF-ის ხელმისაწვდომი სიმძლავრის საშუალო სტატისტიკას, ის უზრუნველყოფს გადაცემისას სრულ მიმორიგებას, რაც განსაკუთრებით სასურველია NLoS-ის პირობებში. ამ პარაგრაფში შეფასებულია CSIT-სგან თავისუფალი სქემები მრავალ PB-ს სცენარში. ნახ. 5.4-ზე სითბური რუკის სახით მოცემულია საშუალო შეგროვებული ენერგიისა და ენერგიის გათიშვის ალბათობის მნიშვნელობები.



ნახ. 5.4. სითბური რუკა: ა) საშუალო შეგროვებული ენერგია დბმ-ში (პირველი რიგი); ბ) $\log_{10}$ ენერგიის გათიშვის ალბათობისა (მეორე რიგი) 80×80 მ² ფართობზე. ზუთი PB, რომლებიც აღჭურვილია ოთხი ULA ანტენით, გადასცემენ დამოუკიდებელ სიგნალებს. ჩვენ განვიხილავთ გზაში დანაკარგების მოდელს ლოგარითმული მანძილით და ექსპონენტი 3, ხოლო მანძილზე დამოუკიდებელი დანაკარგებია 26 დბ. არხები იმყოფებიან კვაზი-სტატიკური რაისის მიყუჩების მოქმედების ქვეშ LoS კოეფიციენტით, რომელიც უდრის 10 დბ-ს. ენერგიის შეგროვების სქემა მუშაობს მგრძნობიარობით, გაჯერებით და გარდაქმნის ეფექტურობით, შესაბამისად, -22 დბმ, -8 დბმ და 35 პროცენტი

SA მთელს ფართობზე უზრუნველყოფს ერთგვაროვან მახასიათებელს, როგორც საშუალო შეგროვებული ენერგიის, ასევე ენერგიის გათიშვის ალბათობის კუთხით, ხოლო AA-ს მახასიათებელი მკაცრად არის დამოკიდებული ULA-ს ორიენტაციაზე. AA-ს მუშაობის გაუმჯობესება შეიძლება ანტენის მიმდევრობით ელემენტებში სიგნალების ფაზების π რადიანით გადანაცვლებით ან/და ანტენების სწორად მობრუნებით. მიუხედავად იმისა, რომ საწყისი AA საშუალებას აძლევს ენერგიის შემგროვებელ მოწყობილობებს შეაგროვონ ენერგია არანაკლებ 20 დბმ საშუალოდ მთელი ფართობის 15 პროცენტზე, ასეთი დაფარვა შეიძლება გაიზარდოს 23 პროცენტამდე SA-ს გამოყენების შემ-

თხვევაში, ან თითქმის 30 პროცენტამდე, თუ გამოიყენება ორი უფრო გაუმჯობესებული AA სქემა.

5.6. მეხუთე თავის დასკვნები და ძირითადი გამოწვევები

ჩვენ განვიხილეთ მყისიერი CSIT-ის მოპოვებისთვის უზარმაზარ ხარჯებთან დაკავშირებული პრობლემები, მომავალი საკომუნიკაციო სისტემების კონსტრუირების პროცესში, სადაც მკაცრი QoS შეზღუდვები მიგვიყვანს უკიდურესად რთულ გამოწვევებთან. ხარჯები გაანალიზებულია შეყვანებისა და ენერგიის ხარჯვის თვალსაზრისით, ასევე გათვალისწინებული იყო მოწყობილობების რაოდენობის მასშტაბურობა. ჩვენ განვიხილეთ რამდენიმე შესაძლო მიდგომა, რომლებიც მოიცავს პილოტ-სიგნალების მიმდევრობების ეფექტურ განაწილებას და სქემებს, რომლებიც ეყრდნობიან სტატისტიკურ CSIT-ს, ან ადგილმდებარეობებზე დაფუძნებულ პროგნოზირებად CSIT-ს ML/AI-ის გათვალისწინებით.

ჩვენ ვაჩვენეთ, რომ დაბალი სიმძლავრის მასიურ კონფიგურაციებში, არა ყველა ენერგიის შემგროვებელი მოწყობილობისთვის შეიძლება საჭირო გახდეს CSIT-ით მომსახურება, რაც დაზოგავს ძვირად ღირებული ენერგიის რესურსს; ხოლო საკომუნიკაციო სისტემის დაუნლონკში სტატისტიკური CSIT სქემები უახლოვდება ოპტიმალურ მახასიათებლებს LoS-ის კოეფიციენტის ზრდასთან ერთად, რაც მათ ხელსაყრელს ხდის ქსელის სიმკვრივის ზრდის დროს. ჩვენ ხაზი გავუსვით შემუშავებული CSIT-სგან თავისუფალი WET სქემების ეფექტურობას კონფიგურაციებში მრავალი PB-ით. შედეგები ცხადყოფს, რომ მუშაობის გაუმჯობესება მიიღწევა თითოეული ანტენის მიერ გადაცემული სიგნალის ფაზების სწორად გადანაცვლებით ან საანტენო მესრის მობ-

რუნებით. ამ თავში განხილულ საკითხებთან დაკავშირებული ძირითადი გამოწვევები და კვლევების მიმართულებები მოცემულია ცხრილში 5.1.

[illegible]

ცხრილი 5.1. ძირითადი გამოწვევები და კვლევითი მიმართულებები

მეხუთე თავში გამოყენებული ლიტერატურა

A. Adhikary *et al.*, "Joint Spatial Division and Multiplexing – The Large-Scale Array Regime", *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 59, no. 10, Oct. 2013, pp. 6441-63.

- M. Botsov *et al.*, "Comparison of Location-Based and CSI-Based Resource Allocation in D2D-Enabled Cellular Networks", *Proc. IEEE ICC*, 2015, pp. 2529-34.
- E. D. Carvalho *et al.*, "Random Access Protocols for Massive MIMO", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 5, May 2017, pp. 216-22.
- R. Di Taranto *et al.*, "Location-Aware Communications for 5G Networks: How Location Information Can Improve Scalability, Latency, and Robustness of 5G", *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 31, no. 6, Nov 2014, pp. 102-12.
- O. L. A. Lopez *et al.*, "Statistical Analysis of Multiple Antenna Strategies for Wireless Energy Transfer", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 10, Oct. 2019, pp. 7245-62.
- O. L. A. Lopez *et al.*, "On CSI-Free Multi-Antenna Schemes for Massive RF Wireless Energy Transfer", *IEEE Internet of Things J.*, vol. 8, no. 1, Jan. 2021, pp. 278-96.
- O. L. A. Lopez *et al.*, "Ultra-Low Latency, Low Energy, and Massiveness in the 6G Era via Efficient CSIT-Limited Schemes", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 11, Nov. 2020, pp. 56-61.
- E. Mah, *Phase Sweeping Transmit Diversity with Fading Resistant Constellations*, Ph.D. dissertation, National Library of Canada – Bibliotheque Nationale Du Canada, 1999.
- N. H. Mahmood *et al.* (Eds.), "White Paper on Critical and Massive Machine Type Communication Towards 6G", 6G Research Visions, 2020.
- A. Molev-Shteiman *et al.*, "Location-Domain Channel Representation for Estimating Distributed MIMO Channels", *IEEE COMCAS*, Nov. 2019, pp. 1-6.

- P. Popovski *et al.*, "Wireless Access for Ultra-Reliable Low-Latency Communication: Principles and Building Blocks", *IEEE Network*, vol. 32, no. 2, Mar./Apr. 2018, pp. 16-23.
- S. Qiu *et al.*, "Downlink Precoding with Mixed Statistical and Imperfect Instantaneous CSI for Massive MIMO Systems", *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. 67, no. 4, 2018, pp. 3028-41.
- R. Rogalin *et al.*, "Scalable Synchronization and Reciprocity Calibration for Distributed Multiuser MIMO", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 4, Apr. 2014, pp. 1815-31.
- L. Sanguinetti *et al.*, "Toward Massive MIMO 2.0: Understanding Spatial Correlation, Interference Suppression, and Pilot Contamination", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 1, 2020, pp. 232-57.
- A. Taha *et al.*, "Deep Reinforcement Learning for Intelligent Reflecting Surfaces: Towards Standalone Operation", *IEEE SPAWC*, May 2020, pp. 1-6.
- H. Yin *et al.*, "A Coordinated Approach to Channel Estimation in Large-Scale Multiple-Antenna Systems", *IEEE JSAC*, vol. 31, no. 2, Feb. 2013, pp. 264-73.

თავი 6. ბლოკჩეინით მხარდაჭერილი პლატფორმის გამოყენება 6G ქსელის დეცენტრალიზებული მართვისას

6.1. შესავალი

5G-ს საზღვრებს გარეთ მობილური ქსელის ევოლუცია მოითხოვს სპექტრის მენეჯმენტის სრულად გადახედვას. მახასიათებლებზე უპრეცედენტო მოლოდინის დასაკმაყოფილებლად, მომავალი 6G ქსელები მოითხოვენ სიხშირული სპექტრის გააზრებულად გადანაწილებას მოცულობის, დროის და გამოყენების არეალის მიხედვით. ამ თავში, ჩვენ შევისწავლით ახალ მიმართულებას – ბლოკჩეინის ინტეგრაციას მობილური ქსელის ინფრასტრუქტურაში. კერძოდ, განვიხილავთ შემოთავაზებული არქიტექტურის პოტენციურ სარგებლიანობას და გამოწვევებს, სპექტრისა და ინფრასტრუქტურის გადანაწილების თვალსაზრისით. დეტალურად იქნება შესწავლილი ბლოკჩეინის რეალიზაციის ძირითადი ასპექტები 6G-სთვის, როგორებიცაა სპექტრისა და ინფრასტრუქტურის ტოკენიზაციის (Tokenization) მოდელი, განაწილებული ლეჯერის სტრუქტურა და შესაძლო კონსენსუსის ალგორითმები. აღვნიშნავთ, რომ ტოკენიზაცია, როდესაც გამოიყენება მონაცემთა უსაფრთხოების სფეროში, ეს არის მონაცემთა კონფიდენციალური ელემენტის არაკონფიდენციალურ ეკვივალენტად (ტოკენად) ჩანაცვლების პროცესი. ტოკენს არ გააჩნია შიდა და გარე გამოყენებებისთვის ვარგისი, დამოუკიდებელი აზრობრივი მნიშვნელობა ან ღირებულება. ტოკენიზაციის სისტემის მეშვეობით შეიძლება ტოკენის უკან ასახვაც კონფიდენციალურ მონაცემებში. მომსახურების უზრუნველსაყოფად,

ჩვენ შევისწავლით ნახევრად მუდმივი, დინამიური და ინტელექტუალური სპექტრით ვაჭრობის სამი ტიპის სმარტ-კონტრაქტს და თითოეული მათგანისათვის გავაანალიზებთ ოპერაციების რაოდენობას. კომპიუტერული სიმულაციის შედეგები აჩვენებს, რომ საშუალო გამტარუნარიანობა ინტელექტუალური სპექტრით ვაჭრობის შემთხვევაში 7 პროცენტით მეტია, ვიდრე ნახევრად მუდმივი ვაჭრობისას და 4 პროცენტით დაბალია, ვიდრე დინამიური ვაჭრობისას. ოპერატორების ეკონომიკური პერსპექტივიდან გამომდინარე, ინტელექტუალური ვაჭრობა უზრუნველყოფს 19 პროცენტით მეტ მოგებას, ვიდრე ნახევრად მუდმივი ვაჭრობა და 8 პროცენტით ნაკლებ მოგებას, ინტელექტუალურ ვაჭრობასთან შედარებით. ინტელექტუალურ ვაჭრობას ასევე აქვს ბლოკჩეინში უფრო დაბალი ზედნადები ხარჯების ოდენობა, ვიდრე დინამიური ვაჭრობას, ამასთან ძალიან ახლოს არის ნახევრად მუდმივი ვაჭრობის ყველაზე დაბალ ზედნადებ ხარჯებთან.

6.2. ბლოკჩეინის გამოყენების მიზნები

5G-ს შექმნასთან ერთად, ჩვენ გადავდით ციფრული საზოგადოების ახალ ეპოქაში, რომელიც საყოველთაოდ დაკავშირებულია განაწილებული და უაღრესად ჰეტეროგენული ქსელის ინფრასტრუქტურით. მობილური ქსელის შემდგომი ევოლუცია 6G-ს მიმართულებით, მოიტანს კიდევ უფრო მეტ ჰეტეროგენობას და, სავარაუდოდ, მხარს დაუჭერს ისეთ აპლიკაციებს, რომლებიც აქამდე არ იყო დანერგილი, მაგალითად ვირტუალურ და მომატებულ რეალობას (VR/AR), საყოველთაოდ მყისიერ კომუნიკაციებს, ყოვლისმომცველ ინტელექტსა და უნარების ინტერნეტს. ამასთან, 6G-ში ახალი ტერაჰერცული დიაპაზონების შემოტანით, ათასობით დამატებითი ულტრა მცირე ზომის ფიჭვებით და თავისუფლების ძალიან მაღალი ხარისხით, მკვეთრად გაიზრდება ქსელის მართვის სირთულე, სპექტრის განაწილებას-

თან დაკავშირებული პრობლემები და გართულდება ყველა მოსალოდნელი სერვისის ორკესტრირება. დღესაც კი, მობილური ქსელის ოპერატორებს (Mobile Network Operators, MNOs) არ შეუძლიათ ეფექტურად მართონ თავიანთი მოცულობითი ინფრასტრუქტურა და ხელმისაწვდომი სპექტრი. არსებული მობილური ქსელები ხშირად უმოქმედოა, მაგრამ პიკის საათებში, მაინც ვერ უმკლავდებიან ტრაფიკის მოთხოვნას. ეს არაეფექტურობა აიძულებს ოპერატორებს გაზარდონ ფასები, საბოლოო მომხმარებლებისათვის მობილური ტელეფონების ყოველი ახალი თაობის შემოტანისას, დამატებითი სიხშირის გატარების ზოლისათვის ძვირადღირებული სალიცენზიო მოსაკრებლების გამო, რაც დაკავშირებულია ინფრასტრუქტურის განთავსების და ტექნიკური მომსახურების მზარდ ხარჯებთან. ამრიგად, აუცილებელია, რომ MNO-ებმა შეცვალონ თავიანთი ცენტრალიზებული ბიზნეს მოდელი უფრო მოქნილი დეცენტრალიზებული მოდელით, რომელიც დაფუძნებული იქნება ქსელის ვირტუალიზაციაზე, სპექტრისა და ინფრასტრუქტურის გადანაწილებაზე, პროგრამული უზრუნველყოფით განსაზღვრულ ქსელებზე (Software Defined Networks, SDNs) და ინტელექტუალურ ავტომატიზებულ მენეჯმენტზე. ამრიგად, უახლოეს მომავალში, შეიძლება ველოდოთ, რომ გამოჩნდება მრავალი მიკრო-MNO მოქნილი ბიზნეს მოდელებით, რომლებიც რეაგირებას მოახდენენ კონკრეტული მიმართულებების ან ვერტიკალების ბაზრის მოთხოვნებზე. მიკრო-MNO-ს ამგვარი პარადიგმა მოითხოვს რეალურ დროში დეცენტრალიზებული სპექტრის განაწილებას და რესურსების ძალიან სწორად გამოყენებას დროსა და სივრცეში. შესაბამისად, საჭიროა საიმედო და მასშტაბური გადაწყვეტილებების მიღება, რომლებიც შესაძლებელს გახდის კვაზი-რეალურ დროში სპექტრისა და ინფრასტრუქტურის გადანაწილებას ასობით MNO-ს შორის, ასევე გააუმჯობესებენ შეთანხმებებს მომსახურების დონის შესახებ (Service-level Agreement, SLA) და

ფინანსურ ურთიერთქმედებას MNO-ებსა და საბოლოო მომხმარებლებს შორის.

არც თუ ისე დიდი ხანია, რაც ბლოკჩეინმა შეიძინა დიდი მიმზიდველობა, როგორც პერსპექტიულმა ტექნოლოგიამ დეცენტრალიზებული გამოყენებებისათვის. ბლოკჩეინი არის განაწილებული ლეჯერის ტექნოლოგია, რომელიც უზრუნველყოფს მასშტაბურ დეცენტრალიზებულ პლატფორმას, რომელსაც შეუძლია მუდმივად ჩაწეროს და გადაამოწმოს სხვადასხვა სუბიექტებს შორის ტრანზაქციები ცენტრალური, ნდობით აღჭურვილი მხარის გარეშე. ამ ტექნოლოგიის ძირითადი მახასიათებლებია დეცენტრალიზაცია, გამჭვირვალობა, ანონიმურობა, უცვლელობა, უსაფრთხოება და ტრანზაქციის მცირე დრო. მნიშვნელოვანია, რომ ეკონომიკურ და საკანონმდებლო მექანიზმებზე დაყრდნობით, ბლოკჩეინმა შეიძლება გარღვევა შეიტანოს მობილური ქსელის ბაზარზე, MNO-ებს შორის სპექტრისა და ინფრასტრუქტურის საიმედოდ გადანაწილებით, MNO-ს დინამიური გადართვით საბოლოო მომხმარებლებთან, როუმინგით საზღვრებს გარეშე, ხარისხის მართვით და ა.შ. ამიტომ, ბლოკჩეინი ფართოდ განიხილება, როგორც 6G-ს შემადგენელი ერთ-ერთი ძირითადი და პერსპექტიული ტექნოლოგია.

მიუხედავად იმისა, რომ დღეისათვის არსებულ ზოგიერთ კვლევაში უკვე შესწავლილია ბლოკჩეინის ინტეგრაცია 5G/6G-სთვის, მათი უმეტესობა ეხება ბლოკჩეინის კონკრეტულ დეტალებს, როგორებიცაა ბლოკის შექმნა, კონსენსუსის ალგორითმი, მაინინგი და ქსელის ასპექტების მოკლე განხილვა. ამჟამად რამდენიმე კვლევაა ჩატარებული, რომლებიც დაკავშირებულია ბლოკჩეინის რეალიზაციასთან, როგორც მობილური ქსელის ეკოსისტემის ძირითად ელემენტთან. ეს კვლევები გთავაზობენ ბლოკჩეინის გამოყენებას ისეთი კონკრეტული პრობლემების გადასაჭრელად, როგორებიცაა სპექტრისა და ინფრასტრუქტუ-

რის გადანაწილება, SLA მენეჯმენტი და საბოლოო მომხმარებლების კონფიდენციალურობის დაცვა.

6G მობილური ქსელის ახლებური ხედვით, ბლოკჩეინი გამოყენებულ უნდა იქნას სპექტრის მარეგულირებელ ორგანოს, MNO-ებს და საბოლოო მომხმარებლებს შორის უმაღლეს დონეზე განაწილებული და ვირტუალიზებული ქსელის ინფრასტრუქტურის შესაძლებლობების გასაფართოებლად და ფინანსური შეთანხმებების გამარტივების მიზნით, სმარტ-კონტრაქტებისა და კრიპტოვალუტების საფუძველზე. ჩვენ ავხსნით, თუ როგორ შეიძლება ბლოკჩეინის მიერ მომხმარებელთა დაშვების და მომსახურების არსებული ფუნქციების განხორციელება და განვიხილავთ ამ ინტეგრაციის პოტენციურ სარგებელს. გარდა ამისა, განვიხილავთ იქნება სპექტრისა და ინფრასტრუქტურის ტოკენიზაციის ახალ მოდელი, რათა ისინი გაყიდული იქნან, როგორც აქტივები ლეჯერების გაცვლის პლატფორმებზე. დაბოლოს, ჩვენ განვიხილავთ და შევადარებთ სმარტ-კონტრაქტების საფუძველზე შემუშავებულ, საბოლოო მომხმარებლებთან მომსახურების მიწოდების სხვადასხვა სცენარს.

ამ თავიდან გამომდინარე ძირითადი შედეგები შემდეგია:

1. ბლოკჩეინზე დაფუძნებული დეცენტრალიზებული მრავალპერატორიანი 6G მობილური ქსელის მენეჯმენტის ახალი ხედვა;
2. ტოკენიზაციის ახალი მოდელი კვაზი-რეალურ დროში სპექტრისა და ინფრასტრუქტურის ვაჭრობისათვის მრავალ MNO-ს შორის;
3. MNO-ს დინამიური შერჩევით და SLA-ს გამოყენებით საბოლოო მომხმარებლებისათვის მომსახურების მიწოდების მიზნით შემუშავებული სამი ტიპის სმარტ-კონტრაქტი.

ამ თავის დანარჩენი ნაწილი შემდეგნაირად არის ორგანიზებული. ჩვენ ჯერ განვიხილავთ ბლოკჩეინის ინტეგრაციის მახასიათებლებსა და პოტენციალს 6G-ში; შემდეგ, ჩვენ წარმოვადგენთ ბლოკჩეინზე დამ-

ყარებული 6G მობილური ქსელის არქიტექტურას და ბოლოს განვიხილავთ საბოლოო მომხმარებლებისათვის მომსახურების მიწოდების სმარტ-კონტრაქტებს, სპექტრით ვაჭრობის სხვადასხვა სცენარების მიხედვით.

6.3. 6G-ში ბლოკჩეინის ინტეგრაციის ძირითადი თავისებურებები და პოტენციალი

6.3.1. ბლოკჩეინის თავისებურებები

განაწილებული ლეჯერი ბლოკჩეინში შეიცავს ინფორმაციას ქსელის მდგომარეობის შესახებ და იძლევა ნებისმიერი შესაბამისი ცვლილების თვალყურის დევნების შესაძლებლობას. ბლოკჩეინმა დაადასტურა, რომ ის არის ეფექტური ტექნოლოგია, სხვადასხვა სახის ფინანსური შეთანხმებისთვის ურთიერთ არასანდო მხარეებს შორის. უფრო მეტიც, ბლოკჩეინი საშუალებას იძლევა რეალურ სამყაროში აქტივების ღირებულება გაციფრულდეს შესაბამისი კრიპტოვალუტით (ე.ი. მოხდეს ტოკენიზაცია) და მათი გაცვლა განხორციელდეს ავტომატიზებული სმარტ-კონტრაქტებით. ამიტომ, ამ თავში განვიხილავთ ბლოკჩეინს, როგორც ძირითად ტექნოლოგიას, რომელიც საშუალებას იძლევა განხორციელდეს სპექტრით ავტომატიზებული დეცენტრალიზებული ვაჭრობა და ურთიერთშეთანხმება, მობილური ქსელის სხვადასხვა სუბიექტებს შორის. ქვემოთ აღწერილია ძირითადი მახასიათებლები, რომლებიც მიმზიდველს ხდიან ბლოკჩეინს 6G მობილური ქსელისთვის.

უცვლელობა: ბლოკჩეინი შექმნილია ისე, რომ არ დაუშვას დადასტურებული ტრანზაქციის წაშლა (ანუ შეთანხმება MNO-ებს შორის). ეს უზუნქვია ამარტივებს ნებისმიერ დავას MNO-სა და მომხმარებლებს შო-

რის ეროვნული კანონმდებლობის დარღვევასთან დაკავშირებით, როგორცაა, მაგალითად, მომხმარებლის არასასურველი ოპერაციები, რომლებიც გამოწვეულია თაღლითური სპამით.

დეცენტრალიზაცია: ცენტრალური ხელისუფლების (მაგალითად, ბანკის, მთავრობის) გარეშე, დეცენტრალიზებული ნდობის უზრუნველსაყოფად, ბლოკჩეინი იყენებს კონსენსუსის მექანიზმს, ტრანზაქციების ვალიდაციისთვის და სისტემის სწორი მდგომარეობის დასაზუსტებლად (მაგალითად, სპექტრის განაწილება).

უსაფრთხოება: ტრანზაქციის თითოეულ ბლოკს აქვს უნიკალური კრიპტოგრაფიული ჰეში (Hash), რომელიც უზრუნველყოფს ინფორმაციის მთლიანობას და სისწორეს. ჰეშის გაანგარიშება ხდება ტრანზაქციის მონაცემების და წინა ბლოკის ჰეშის საფუძველზე, ამიტომ მისი მნიშვნელობა დამოკიდებულია მთლიან წინა ჯაჭვზე. ეს ფუნქცია არ იძლევა წარსული ტრანზაქციების (მაგალითად, SLA-ების) შეცვლის შესაძლებლობას.

სმარტ-კონტრაქტები: ეს ფუნქცია საშუალებას გვაძლევს მრავალი დაკავშირებული ტრანზაქციისათვის შემუშავებულ იქნას ნებისმიერი პროგრამული უზრუნველყოფის საფუძველზე შექმნილი ალგორითმი, რომელიც ავტომატურად შესრულდება განსაზღვრული პირობების შესაბამისად. სმარტ-კონტრაქტებს შეუძლიათ გამოაჩინონ SDN-ის პოტენციალი 6G-ში, ქსელის უკეთესი მენეჯმენტისა და მომხმარებლებსა და MNO-ებს შორის მოქნილი შეთანხმებების უზრუნველსაყოფად.

6.3.2. ბლოკჩეინის უპირატესობები და პოტენციალური შესაძლებლობები 6G-ში

სპექტრის გადანაწილება: სპექტრის გადანაწილების არსებულ პროცედურებს არ გააჩნიათ ავტომატიზაცია, რადგან მარეგულირებელი

ორგანოები თვალყურს ვერ ადევნებენ სპექტრის გამოყენებას რეალურ დროში და ხელს ვერ უშლიან უსამართლო ქცევას. დამატებითი სირთულე დაკავშირებულია სხვადასხვა სიხშირული დიაპაზონების დიდ რაოდენობასთან, რომლებიც ან არალიცენზირებულია, ან ლიცენზირებულია სხვადასხვა ორგანიზაციების და უსადენო სტანდარტებისთვის; დაბოლოს, ამჟამად არ არსებობს წახალისების მექანიზმი სპექტრის დინამიური გაზიარების მიმართულებით, რეალურ დროში შეთანხმებების მიღწევის და ინტერფერენციების მენეჯმენტის სირთულის გამო. მობილური ქსელის არსებული არქიტექტურის ბლოკჩეინის ტექნოლოგიით შევსებით, ჩვენ შეგვიძლია შევექმნათ სპექტრის ავტომატიზებული სავაჭრო სტრუქტურა, რომელიც საშუალებას მოგვცემს ან ნება დავრთოთ ან შევზღუდოთ MNO-ს მიერ სპექტრის გამოყენება, პროგრამული უზრუნველყოფის დონეზე. ასეთი სტრუქტურა უზრუნველყოფს სმარტ-კონტრაქტების შეთანხმებას მეზობელ MNO-ებს შორის, რომლებიც შეეხება კონკრეტული საბაზო სადგურებისთვის სპექტრის გამოყენებას და გადაცემის სიმძლავრეებს ინტერფერენციების პრობლემების შესამსუბუქებლად.

ინფრასტრუქტურის გაზიარება და ქსელის დანაწევრება: შედარებით მარტივი კონცეფციის მიუხედავად, მრავალ MNO-ს შორის ინფრასტრუქტურის გადანაწილებას აქვს რამდენიმე მნიშვნელოვანი გამოწვევა, რომელთა მოგვარებაც შესაძლებელია ბლოკჩეინის საშუალებით: (ა) – ბლოკჩეინს შეუძლია თვალყური ადევნოს ინფრასტრუქტურის გამოყენებას, თითოეული MNO-ს ან ქსელის სეგმენტის მიერ, და დაადგინოს შესაბამისი გადასახადები MNO-ებს შორის კრიპტოვალუტების გამოყენებით; (ბ) – სმარტ-კონტრაქტების გამოყენებით ჩვენ შეგვიძლია წინასწარ დავარუზერვოთ ინფრასტრუქტურული რესურსები სამომავლო გამოყენებისათვის; (გ) – ჩვენ შეგვიძლია მესამე მხარეების ინტეგრირება ბლოკჩეინში, რათა დამატებითი ხარჯები (რომლებიც დაკავში-

რებულია, მაგალითად, ელექტრონერგიის მოხმარებასთან, ინტერნეტის პროვაიდერთან, უძრავ ქონებასთან და ა.შ.) გაცვით MNO-ებს შორის, თანაბარპროპორციულად მათი ინფრასტრუქტურის გამოყენების შესაბამისად.

შეთანხმებები მომსახურების დონის შესახებ (SLA): ამჟამად, SLA წარმოადგენს ერთ-ერთ ყველაზე მსხვილ ზედნადებ ხარჯებს თანამედროვე მობილურ ქსელებში. MNO-ს და მონაცემთა შესაფერისი გეგმის არჩევა ხშირად მოიცავს ურთიერთშეთანხმებას და კომპრომისის არეალს, ფასს, მომსახურების ხარისხსა და სხვა მრავალ ასპექტს შორის. ბოლო მომხმარებლების უმეტესობა სრულად არ არის კმაყოფილი მათი სატარიფო გეგმებით, რადგან ისინი ან იაფია, მაგრამ ძალიან შეზღუდული, ან ძვირია, მაგრამ სიჭარბის შემცველი. ბლოკჩეინს შეუძლია ამ პრობლემის მოგვარება MNO-ებს და ბოლო მომხმარებლებს შორის მოქნილი SLA სმარტ-კონტრაქტების საშუალებით, რომლებიც თანხმდება და სრულდება კვაზი-რეალურ დროში.

აუტენტიფიკაცია, ავტორიზაცია და აღრიცხვა: არსებული მობილური ქსელები ეყრდნობა მხოლოდ MNO-ების მიერ გაცემულ აბონენტის საიდენტიფიკაციო მოდულის (Subscriber Identity Module, SIM) ბარათებს. ყოველთვის, როდესაც საბოლოო მომხმარებელმა უნდა შეცვალოს MNO, მან უნდა შეცვალოს აქტიური (ფიზიკური ან ელექტრონული) SIM ბარათი. ბლოკჩეინში თითოეულ საბოლოო მომხმარებელს აქვს უნიკალური საფულის (Wallet) ID, რომელიც შეიძლება გამოყენებულ იქნას როგორც იდენტიფიკატორი ყველა MNO-სთვის. ასეთი თვისებები, მობილური ქსელის კონკურენტული გარემოს წყალობით, საშუალებას იძლევიან მოხდეს ურთიერთქმედება მომხმარებლებთან ისე, რომ ის არ იყოს მიმაგრებული კონკრეტულ ოპერატორზე.

უწყვეტი საერთაშორისო როუმინგი: ბლოკჩეინი ძირითადად ეყრდნობა ინტერნეტ კავშირს და არ არის დამოკიდებული ქვეყნებს შორის

რის ადმინისტრაციულ საზღვრებზე. მიუხედავად იმისა, რომ ტრადიციული ფინანსური სისტემა ძალიან ნელი და ძვირია საერთაშორისო ტრანზაქციებისთვის, კრიპტოვალუტების გადატანა უმნიშვნელო გადასახადებით მთელ მსოფლიოში შეიძლება მოხდეს წამებში. ეს თვისება საშუალებას იძლევა აიგოს მიკროქსელი საზღვრებს გარეშე, სადაც არანაირი განსხვავება არ არის შიდა და საგარეო MNO-ებს შორის, ისე, რომ აღმოიფხვრას არსებული, ძალზედ შეზღუდულ საერთაშორისო როუმინგთან დაკავშირებული პრობლემები.

ადგილობრივი მობილური ქსელები: არსებულ ცენტრალიზებულ მოდელს, სადაც რამდენიმე მსხვილი MNO ავითარებს ქვეყნის მასშტაბით არსებულ მობილურ ქსელებს, აქვს უკიდურესად რთული ინფრასტრუქტურა განთავსებისა და მომსახურებისათვის. მეორეს მხრივ, ადგილობრივი მიკრო-MNO-ები ვერ შემოდიან ბაზარზე ქვეყნის მასშტაბით ძვირადღირებული სიხშირული სპექტრის ლიცენზიების გამო, რაც წამგებიანს ხდის ადგილობრივ ოპერაციებს. ბლოკჩეინის სმარტ-კონტრაქტები უზრუნველყოფენ ადგილობრივი სპექტრით ვაჭრობას რეალურ დროში ისე, რომ მიკრო-MNO-მ შეძლოს გამოუყენებელი სპექტრის ნაწილის ყიდვა მსხვილი MNO-სგან, მითითებული დროისა და დაფარვის არეალისთვის.

ინტელექტუალური ქსელი: 5G ქსელები დიდწილად ეყრდნობა ისეთ ტექნოლოგიებს, როგორებიცაა SDN, ვირტუალიზაცია და ქსელის დანაწევრება. უფრო რთული სტრუქტურის მქონე 6G-ს დასჭირდება AI-ის ანუ ხელოვნური ინტელექტის დრმა ინტეგრაცია ყველა დონეზე, რათა უზრუნველყოფილ იქნას თვითსწავლების ადაპტაციური შესაძლებლობები. ბლოკჩეინიდან კარგად სტრუქტურირებული, სრული და გადამოწმებული მონაცემების მოძიებით, AI შეიძლება მომზადდეს მობილური ქსელების კონკრეტული ამოცანების გადასაჭრელად. უფრო მეტიც, სმარტ-კონტრაქტებსა და კონსენსუსის ალგორითმებს შეუძლი-

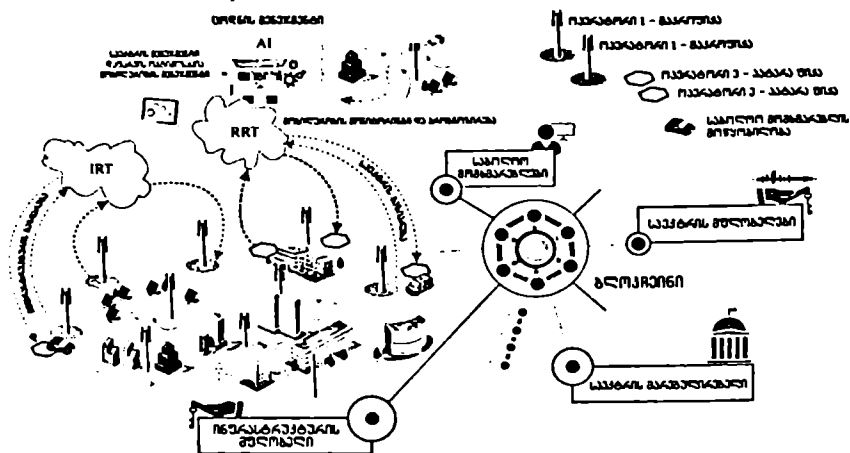
ათ შექმნან სანდო AI გადაწყვეტილებების მიმღები ავტონომიური ინტელექტუალური ქსელები.

კონტროლი იურიდიული პირების მიერ: ბლოკჩეინს შეუძლია გააფართოოს კომუნიკაციების მარეგულირებელი ორგანოების შესაძლებლობები, მაღალი დონის პოლიტიკის ჩართვით და მთელი ქვეყნის მასშტაბით MNO-ების მიერ სპექტრის გამოყენების თვალყურის დევნებისთვის. ეს საშუალებას იძლევა შეიქმნას ჰიბრიდული სპექტრის ბაზარი, სადაც სპექტრის ნაწილები იყიდება MNO-ების მიერ, ხოლო მარეგულირებლებს შესაძლებლობა აქვთ შეზღუდონ სპექტრის გამოყენება ზოგიერთ ადგილებში, რათა თავიდან იქნას აცილებული ინტერფერენციების წარმოქმნა ძირითადი მომხმარებლებისთვის (მაგალითად, სამხედროებისთვის). კიდევ ერთი უპირატესობა არის ის, რომ ბლოკჩეინი საშუალებას აძლევს მთავრობებს, მარტივად განახორციელონ აუდიტის მართვა, რათა თავიდან იქნას აცილებული ეკონომიკურად დამაზიანებელი პრაქტიკა, როგორიცაა კარტელური შეთანხმებები.

6.4. ბლოკჩეინით მხარდაჭერილი 6G მობილური დეცენტრალიზებული ქსელის არქიტექტურა

6.4.1. დეცენტრალიზებული მრავალპერატორიანი 6G მობილური ქსელის ეკონომიკური მოდელი

ჩვენ განვიხილავთ ბლოკჩეინზე დაფუძნებულ სტრუქტურას დეცენტრალიზებული 6G მობილური ქსელისთვის, რომელმაც ხელი უნდა შეუწყოს მრავალპერატორიანი მობილური ქსელის კოოპერატიულ მართვას (ნახ. 6.1). ქვემოთ აღწერილი შემოთავაზებული სტრუქტურა ემყარება ბაზრის ოთხ მთავარ მოთამაშეს.



ნახ. 6.1. ბლოკჩეინზე დაფუძნებული დეცენტრალიზებული მრავალპერატორიანი 6G ქსელის ეკონომიკური მოდელი

სპექტრის მარეგულირებელი არის სამთავრობო ორგანო, რომელსაც გააჩნია შემდეგი პასუხისმგებლობები: სპექტრის რეგულირება ქვეყნის შიგნით, სპექტრის ლიცენზიების გაცემა, სხვადასხვა უსადენო ტექნოლოგიების ჰარმონიზაცია, გადაცემისას სიმძლავრისა და ინტერფერენციის მართვა, სპექტრის გაზიარების და ვაჭრობის მართვა და ა.შ. ზოგადად, სპექტრის მარეგულირებელი ადგენს მაღალი დონის პოლიტიკას და შეზღუდვებს ბლოკჩეინზე დაფუძნებულ სმარტ-კონტრაქტებზე, რომელთა დარღვევა შეუძლებელია.

სპექტრის მფლობელები არიან MNO-ები, რომლებმაც მიიღეს ლიცენზია სპექტრის მარეგულირებლისგან, კონკრეტული სიხშირული დიაპაზონებისათვის ადგილობრივი თუ მთლიანი ქვეყნის მასშტაბით. სპექტრის მფლობელებს შეუძლიათ გამოიყენონ სპექტრის ზოლები ან გაუზიარონ ისინი სხვა MNO-ებს, სმარტ-კონტრაქტების საფუძველზე.

ინფრასტრუქტურის მფლობელები არიან MNO-ები, რომლებიც ფლობენ ქსელის ინფრასტრუქტურას, როგორებიცაა მაკროფიკები,

მცირე ფიჭები და სერვერები. ინფრასტრუქტურის მფლობელებს, სმარტ-კონტრაქტების საფუძველზე, შეუძლიათ თავიანთი დაუსაქმებელი რესურსების სხვა ოპერატორებთან გაზიარება. სურვილისამებრ, საბოლოო მომხმარებლები შეიძლება იყვნენ ინფრასტრუქტურის მფლობელები, მათი სმარტფონების საშუალებით მოწყობილობიდან მოწყობილობაზე (D2D) კომუნიკაციისთვის. ამ მიდგომას შეუძლია წახალისოს ახალი ბიზნეს მოდელები, რომლებშიც დაინტერესებული მხარეები ინვესტიციას ახდენენ ქსელის ინფრასტრუქტურაში და იღებენ სარგებელს, რომლებსაც უნაწილებენ არსებულ MNO-ებს, ბლოკჩეინის პლატფორმის საშუალებით. მაგალითად, სამშენებლო კომპანიას შეუძლია საბაზო სადგურების ახალ შენობაში დამონტაჟება, შემდგომში MNO-ების მიერ შესაძლო დაქირავებისათვის.

საბოლოო მომხმარებლები არიან მომხმარებლების მოწყობილობები (UE) უნიკალური ბლოკჩეინის იდენტიფიკატორებით (Blockchain Identifiers, BIDs), რომლებიც აღიარებულია ყველა MNO-ს მიერ. UE-ებს შეუძლიათ დინამიურად გადაერთონ MNO-ებს შორის, ბლოკჩეინში SLA სმარტ-კონტრაქტების შეთანხმებების შესახებ მოლაპარაკებით. მაგალითად, საბოლოო მომხმარებლებს შეუძლიათ გააკეთონ არჩევანი MNO-ების მრავალი შეთავაზებიდან, გამომდინარე მომსახურების სხვადასხვა ფასებიდან, ხარისხიდან და დაფარვის არეებიდან (მაგალითად, Google Fi სერვისით).

შემოთავაზებული სტრუქტურის ძირითადი ასპექტი არის სპექტრისა და ინფრასტრუქტურის ტოკენიზაცია, რაც იძლევა ბლოკჩეინით ვაჭრობის შესაძლებლობას. სპექტრის, ინფრასტრუქტურისა და მომსახურების ფასისთვის ჩვენ განვიხილავთ ტოკენიზაციის შემდეგ მოდელს.

რადიორესურსის ტოკენი (Radio Resource Token, RRT) არის მინიმალური სავაჭრო რადიორესურსი (1 ჰგ/წმ/მ^2), რომლის გამოყენებაც შე-

იძლება MNO-ებში. სპექტრის მარეგულირებელი ადგენს RTT-ს ფასს ქაღალდის ფულზე დაყრდნობით, განთავსების არეალის, მომხმარებლის მოთხოვნისა და სხვა ეკონომიკური პარამეტრების საფუძველზე.

ინფრასტრუქტურული რესურსის ტოკენი (Infrastructure Resource Token, IRT) არის სტაბილური მონეტა, რომელსაც აქვს სტატიკური ფასი ქაღალდის ფულის ვალუტაში. ინფრასტრუქტურის ელემენტების გაზიარების ფასი (IRT/წმ) წარმოადგენს მოლაპარაკების საგანს სმარტ-კონტრაქტებში, რაც დამოკიდებულია ინფრასტრუქტურის ტიპზე, ადგილმდებარეობაზე, ელექტროენერგიის ღირებულებაზე და ა.შ.

ეროვნული კრიპტოვალუტა (National Cryptocurrency, NC) არის არსებული ციფრული ექვივალენტი ქვეყნის ქაღალდის ფულისა, სადაც ქსელი არის განთავსებული. შესაბამისად, MNO-ს შეუძლია შეიძინოს/გაყიდოს RRT/IRT ეროვნული კრიპტოვალუტზე გაცვლის მეშვეობით, სპეციალურ გაცვლით პლატფორმაში.

6.4.2. დეცენტალიზებულ ბლოკჩეინზე დაფუძნებული მრავალპერატორიანი 6G მობილური ქსელის ტექნიკური მოდელი

არანაირი შეზღუდვა არ არსებობს იმასთან დაკავშირებით, თუ მობილური ქსელის რა სახის ინფორმაცია შეიძლება შენახულ იქნას განაწილებულ ლეჯერში და ეს წარმოადგენს სამომავლო კვლევების საგანს სირთულის, მასშტაბურობის, კონფიდენციალურობის, უსაფრთხოების და მრავალი სხვა ასპექტის მხრივ. ქვემოთ, ჩვენ მივიჩნევთ, რომ კვანძების გონივრული რაოდენობის და მისაღები სირთულის შესანარჩუნებლად, ქსელის შესახებ ინფორმაციის დიდი რაოდენობის დამუშავება ხდება ქვეყნის მასშტაბით შექმნილი კონსორციუმის ბლოკჩეინში, ხოლო UE-ს შესახებ ინფორმაციის მხოლოდ ნაწილი იქნება ხელმისაწ-

ვდომი მსოფლიო საჯარო ბლოკჩეინში, რათა უზრუნველყოფილი იქნას მსოფლიოს მასშტაბით უწყვეტი კავშირი. ჩვენ განვსაზღვრავთ შემოთავაზებული ქსელის მართვის სტრუქტურის მთავარ ლევერებს.

ქვეყნის მასშტაბით კონსორციუმის სპექტრის ლევერი შეიცავს ინფორმაციას თითოეული კონკრეტული ზოლის შესახებ, როგორიცაა სიხშირული დიაპაზონი, ლიცენზირების ზონა, ძირითადი მფლობელი MNO, ამჟამად დანიშნული MNO/MNO-ები, აპლინკ/დაუნლინკის დუპლექსური რეჟიმი და ა.შ.

ქვეყნის მასშტაბით კონსორციუმის ინფრასტრუქტურის ლევერი შეიცავს ინფორმაციას თითოეული gNB (generation Node B) კვანძის შესახებ, როგორიცაა ადგილმდებარეობა, სპექტრის ზოლი, მფლობელი MNO, ამჟამად დანიშნული MNO/MNO-ები, მხარდაჭერილი რადიო-ტექნოლოგიები, გადაცემულ სიმძლავრეზე შეზღუდვები და ა.შ.

ქვეყნის მასშტაბით კონსორციუმის MNO ლევერი შეიცავს ინფორმაციას თითოეული MNO-ს შესახებ, როგორიცაა ოპერაციული არეალი, RTT/IRT/NC ბალანსი და მხარდაჭერილი SLA-ები.

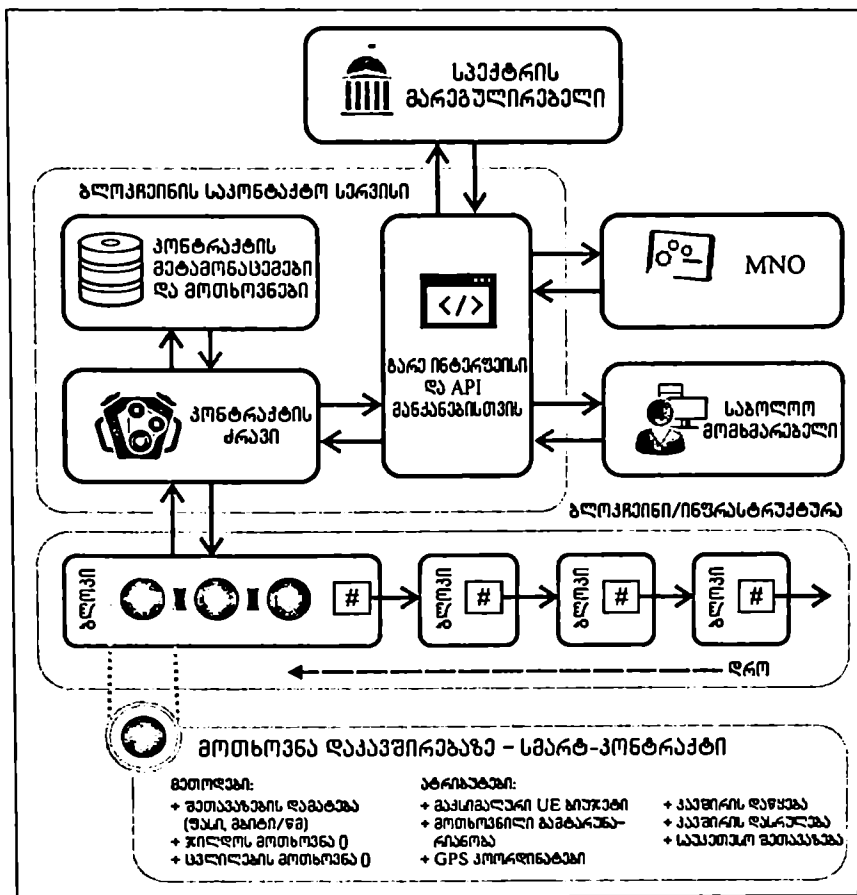
მსოფლიოს მასშტაბით საჯარო UE ლევერი შეიცავს ინფორმაციას თითოეული მომხმარებლის შესახებ, როგორიცაა BID, NC ბალანსი და თვალყურის დევნების არეალი. უნდა გაითვალისწინებულ იქნას ის გარემოება, რომ მომხმარებლის პერსონალური ინფორმაცია შეიძლება ინახოს მხოლოდ შესაბამისი სამთავრობო ორგანოების მიერ და არ უნდა იქნას გამჟღავნებული ფართო საზოგადოებისთვის. MNO-ებს შეუძლიათ მხოლოდ გარკვეულ ინფორმაციაზე წვდომა, რომელიც დასაშვებია უკეთესი ხარისხისა და მომხმარებლებთან უფრო პერსონალიზებული ურთიერთქმედების უზრუნველსაყოფად.

ქვეყნის მასშტაბით კონსორციუმის SLA ლევერი შეიცავს ინფორმაციას UE-ებსა და MNO-ებს შორის წარსულის, ამჟამინდელი და მომავალ-

ლი SLA-ების შესახებ. თითოეული SLA განსაზღვრულია შესრულების განსაზღვრული ვადისთვის და ფასისთვის NC ტოკენებში.

განაწილებულ ლეჯერში ნებისმიერი ჩანაწერის შეცვლას ტრანზაქციას უწოდებენ. ტრანზაქციები იკრიბება სმარტ-კონტრაქტის სერვისების ბლოკებში, რომლებიც შემდეგ გადამოწმებულია ბლოკჩეინში (ნახ. 6.2). საკონტრაქტო მომსახურებას აქვს გარე ინტერფეისი (Front-end) და გამოყენებითი პროგრამირების ინტერფეისი (Application Programming Interface, API), რომლებიც უზრუნველყოფენ ურთიერთქმედებას საბოლოო მომხმარებლებთან, MNO-ებთან და სპექტრის მარეგულირებელ ორგანოსთან. საკონტრაქტო მექანიზმს გადაჰყავს სმარტ-კონტრაქტები ტრანზაქციების ბლოკებში სხვა კვანძების მიერ შემდგომი გადამოწმების მიზნით.

როგორც წესი, მობილურ ქსელებში წამში შეიძლება შესრულდეს ათასობით ტრანზაქცია, რაც დამოკიდებულია ტრაფიკის მოთხოვნაზე, მომხმარებელთა მობილურობასა და სხვა ფაქტორებზე. ამიტომ, შემოთავაზებული სტრუქტურის მაჩვენებელი ძალიან მგრძნობიარე იქნება ბლოკჩეინის ქსელის სიჩქარის (ანუ წამში ტრანზაქციების რაოდენობის) მიმართ. ძირითადი ფაქტორი, რომელიც გავლენას ახდენს ბლოკჩეინის მახასიათებლებზე, არის მის საფუძველში განთავსებული კონსენსუსის ალგორითმი. კონსენსუსის მრავალფეროვანი ალგორითმებისათვის ყოველთვის არსებობს ბალანსი სამ მიზანს შორის: უსაფრთხოება, გამტარუნარიანობა და მასშტაბურობა. სიმარტივისათვის, ჩვენ გამოვტოვებთ ტექნიკურ დეტალებს და შევადარებთ დადგენილ და ახალ პერსპექტიულ კონსენსუსის ალგორითმებს მობილური ქსელებისთვის, მათი ვარგისიანობის თვალსაზრისით.



ნახ. 6.2. ბლოკჩეინზე დაფუძნებული დეცენტრალიზებული მრავალპერსონალური 6G ქსელის ტექნიკური მოდელი

არსებული კონსენსუსის ალგორითმების ანალიზი (ცხრილი 6.1) აჩვენებს, რომ PoW და PoS ვერ ასრულებენ გამტარუნარიანობის მოთხოვნებს დეცენტრალიზებულ მობილურ ქსელში ოპერაციების გასაზრდელად. ამასთან, მათი მნიშვნელოვანი უპირატესობა ბევრად უკეთესი უსაფრთხოებაა. უნდა აღინიშნოს, რომ PoW არ არის მთლად შესაფერისი, რადგან ის ძალიან ბევრ ენერგიას ხარჯავს, ხოლო PoS კი

ჯერჯერობით მაინც გამოიყენება სპექტრის მარეგულირებლებსა და MNO-ებს შორის ნაკლებად ხშირი, მაგრამ უფრო მნიშვნელოვანი ოპერაციების დროს.

კონსენსუსის ალგორითმი/ალკორინაჲი	ტრანზაქციების რისხჲი წაჲჲი	დაღასტარაჲის ჲაჲჲონაჲა	მასხარათაჲლანი
PoW / ბიტკოინი, ეთერიუმი	ათაჲლანი	6-60 წთ	მაღალი უსაჲრთხოჲაა დაბალი გამტარუნარიანოჲა დაბალი მასშტაბაროჲა
PoS / PPC	ათაჲლანი	10-60 წთ	მაღალი უსაჲრთხოჲაა დაბალი გამტარუნარიანოჲა დაბალი მასშტაბაროჲა
BFT / აიპარლაჲარი	ათასაჲლანი	1-60 წმ	მაღალი უსაჲრთხოჲაა მაღალი გამტარუნარიანოჲა მაღალი მასშტაბაროჲა
DPOS / EOS	ათასაჲლანი	< 1 წმ	მაღალი უსაჲრთხოჲაა მაღალი გამტარუნარიანოჲა მაღალი მასშტაბაროჲა
PoF / FLETA	> 10000	< 1 წმ	მაღალი უსაჲრთხოჲაა მაღალი გამტარუნარიანოჲა მაღალი მასშტაბაროჲა

ცხრილი 6.1. სხვადასხვა კონსენსუსის ალგორითმების შედარება. გამოყენებულია შემდეგი აღნიშვნები: PoW (Proof-of-Work) – მუშაობის მტკიცებულება; PoS (Proof-of-Stake) – ფსონის მტკიცებულება; PPC (Peer-to-Peer Coin) – პირინგული მონეტა; BFT (Byzantine Fault Tolerance) – ბიზანტიური მტყუნებების მიმართ მდგრადობა; DPOS (Delegated Proof-of-Stake) – დელეგირებული ფსონის მტკიცებულება; PoF (Proof-of-Formulation) – ფორმულირების მტკიცებულება; EOS კრიპტოვალუტა და FLETA ბლოკჩეინის პლატფორმაა

მეორეს მხრივ, BFT და DPOS სწრაფი და მასშტაბურია და შეუძლიათ წაჲჲი 1000-ზე მეტი ტრანზაქციის მხარდაჭერა. ამასთან, ასეთი მაჩვენებელი მიიღწევა ნაწილობრივი ცენტრალიზებით და კონსენსუსის მექანიზმის უსაფრთხოების იგნორირებით. ამიტომ, ის შეიძლება იყოს შესაფერისი სპექტრის გაზიარებისა და SLA შეთანხმებებისთვის, მაგრამ მაინც დაუცველი რჩება ზოგიერთი MNO-ს დამაზიანებელი ქცევის

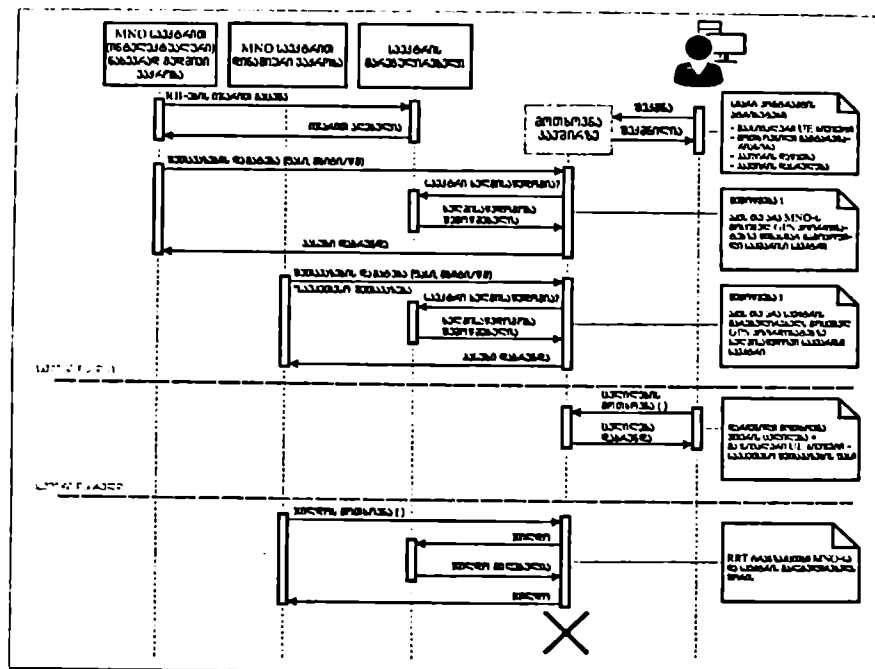
შემთხვევაში. დაბოლოს, ბლოკჩეინში PoF-ის კონსენსუსის ახალ ალგორითმს FLETA-ს წამში 10 000-ზე მეტი ტრანზაქციის შესრულება შეუძლია და ის მაღალ უსაფრთხოებასაც უზრუნველყოფს. მეორეს მხრივ, FLETA ბლოკჩეინი არ არის ბოლომდე გააზრებული და მან ჯერ კიდევ არ გამოავლინა რეალური პოტენციალი. ამის მიუხედავად, ამ სფეროში დინამიური განვითარების გათვალისწინებით, საკმაოდ გონივრულია მოლოდინი, რომ ახლო მომავალში შეიქმნას ბლოკჩეინის კონსენსუსის ახალი პროტოკოლები, განსაკუთრებით მობილური ქსელის მენეჯმენტისთვის.

6.5. ბლოკჩეინზე დაფუძნებული სმარტ-კონტრაქტების სამუშაო პროცესის შემოთავაზებული სცენარები მრავალპერატორიანი ქსელებისათვის

6.5.1. ბლოკჩეინზე დაფუძნებული სმარტ-კონტრაქტის განზოგადებული სამუშაო პროცესი მომსახურების უზრუნველსაყოფად

MNO-ს, საბოლოო მომხმარებელსა და სპექტრის რეგულატორს შორის სმარტ-კონტრაქტის პროტოკოლური სქემა გამოსახულია ნახ. 6.3-ზე. თავდაპირველად, UE უკავშირდება ნებისმიერ gNB კვანძს ან Wi-Fi-ის წვდომის წერტილს და დარეგისტრირდება ბლოკჩეინში თავისი უნიკალური BID-ით. შემდეგ UE ათანხმებს SLA-ებს MNO-ებთან, მომსახურების მოთხოვნის, აგრეთვე, ხილული gNB-ების რეფერენსული სიგნალის მიღებული სიმძლავრის (Reference Signal Received Power, RSRP) მნიშვნელობის წარდგენით სმარტ-კონტრაქტის სერვისის API-სთვის. შესაბამისად, MNO-ები სთავაზობენ UE-ებს თავიანთ სმარტ-კონტრაქტებს შესაბამისი გამტარუნარიანობითა და ფა-

სით. ჩვენ განვსაზღვრავთ გამტარუნარიანობას, როგორც ორი არგუმენტის, ლინკის სპექტრული ეფექტურობის და სიხშირის გატარების ზოლის ფუნქციას.



ნახ. 6.3. ბლოკდიაგრამა დაფუძნებული სპექტრით ვაჭრობის სამუშაო ნაკადების პროტოკოლური დიაგრამა

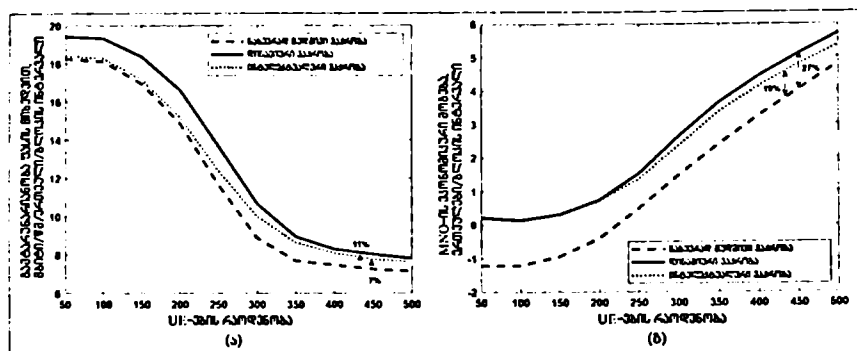
საკომუნიკაციო ლინკის სპექტრული ეფექტურობა დამოკიდებულია შესაბამის მოდულაციაზე და კოდირების სქემაზე და განისაზღვრება RSRP მნიშვნელობის საფუძველზე. ლინკის სპექტრული ეფექტურობიდან გამომდინარე, MNO იღებს საჭირო სიხშირის გატარების ზოლს თითოეული UE-სთვის. შესაბამისად, SLA-ს ფასი დამოკიდებულია MNO-ს სიხშირის გატარების ზოლზე და რენტაბელურობაზე. დაბოლოს, UE აფასებს სარგებლიანობის ფუნქციას და ირჩევს ყველაზე

იაფ სმარტ-კონტრაქტს, ყველა შესაძლო შეთავაზებას შორის. SLA ხელშეკრულება ავტომატურად სრულდება შებრუნებული აუქციონის შესაბამისად ერთჯერადი წინადადებით; ეს არის ის, რომ MNO-ს არ შეუძლია შეცვალოს თავისი საწყისი შეთავაზება. სმარტ-კონტრაქტის დადების შემთხვევაში, MNO უზრუნველყოფს UE-ს მომსახურებას შეთანხმებულ SLA-თი, 3GPP Release 15-ით განსაზღვრული დაგეგმვის პროცედურის შესაბამისად, და შემდეგ UE გადაურიცხავს NC-ს შესაბამის MNO-ს. ქვემოთ, ჩვენ განვიხილავთ ბლოკჩეინზე დაფუძნებული სმარტ-კონტრაქტის მახასიათებლების მოკლე ანალიზს, რომელიც მოიცავს ორ MNO-ს შორის სპექტრით ვაჭრობის სხვადასხვა სცენარს.

6.5.2. ბლოკჩეინზე დაფუძნებული სმარტ-კონტრაქტების კომპიუტერული სიმულაცია და მახასიათებლების ანალიზი

პირველ რიგში, ჩვენ შევისწავლით სპექტრის ნახევრად მყარ სავაჭრო სტრატეგიას, რომელიც შეზღუდული დაკვირვების დროის შემთხვევაში, ჰგავს სპექტრის ჩვეულებრივ ლიცენზირებას. თითოეული MNO ყიდულობს დროებით ლიცენზიას, კონკრეტული სიხშირული დიაპაზონისა და დაფარვის ზონისთვის. ეს პროცესი მოიცავს სპექტრის ლეჯერის და MNO ლეჯერის მოდიფიცირების მიზნით განხორციელებულ ორ ბლოკჩეინ ტრანზაქციას. ეს ტრანზაქციები იწახება განწილებულ ლეჯერში და დამოწმებულია ბლოკჩეინის ყველა კვანძის მიერ. ამრიგად, სხვა MNO-ებს არ შეეძლებათ გამოიყენონ ეს კონკრეტული სიხშირული ზოლი, სანამ ის არ აღინიშნება, როგორც ხელმისაწვდომი სპექტრის ლეჯერში. ამ პროცედურის უპირატესობა არის ის, რომ MNO-ები სპექტრს ყიდულობენ დროის დიდი პერიოდების განმავლობაში, რაც ამცირებს ბლოკჩეინში საჭირო ოპერაციების რაოდენობას. თუმცა, ამ შემთხვევაში MNO იძულებულია გამოყოს ჭარბი სიხ-

შირის გატარების ზოლი პიკის საათებში ტრაფიკის მოთხოვნის დასაკმაყოფილებლად და გაზარდოს ფასი საბოლოო მომხმარებლებისთვის იგივე გამტარუნარიანობის უზრუნველსაყოფად (ნახ. 6.4ა). მომსახურების უფრო მაღალი ფასი MNO-ს ნაკლებად კონკურენტუნარიანს ხდის, რასაც მივყავართ ძალიან მცირე ან თუნდაც უარყოფით ნამატთან (ნახ. 6.4ბ).



ნახ. 6.4. კომპიუტერული სიმულაციით მიღებული ძირითადი მახასიათებლების ინდიკატორების დამოკიდებულება UE-ების რაოდენობაზე: (ა) – გამტარუნარიანობა ფასის ერთეულზე; (ბ) – MNO-ს მოგება

სპექტრით დინამიური ვაჭრობის სტრატეგიაში, თითოეული MNO რაოდენობრივად აფასებს მთლიანი სიხშირის გატარების ზოლს, რომელიც საჭიროა UE-ის ყველა მოთხოვნის დასაკმაყოფილებლად. შემდეგ თითოეული MNO ამოწმებს სიხშირის გატარების ზოლის ხელმისაწვდომობას და ფასს სპექტრის ლეჯერში და UE-ებს სთავაზობს შესაბამის SLA-ებს. მას შემდეგ, რაც UE აირჩევს საუკეთესო ვარიანტს, სმარტ-კონტრაქტი ავტომატურად ხორციელდება UE-ს, MNO-ს და სპექტრის მარეგულირებელს შორის სპექტრის, MNO-ს, UE-ს და SLA-ს ლეჯერებში შესაბამისი ცვლილებების შეტანით. NC-ს შესაბამისი ოდენობა მიიღება UE-ს საფულედან და გადაეცემა მომსახურე MNO-ს. შემდეგ მომ-

სახურე MNO შესაბამის გადასახადს გადასცემს სპექტრის მარეგულირებელს. ეს სტრატეგია უზრუნველყოფს სიხშირის გატარების ზოლის ეფექტურად გამოყენებას, რადგან MNO არ იკავებს იმ მომენტისათვის თავისუფალ სპექტრს. ანალიზი გვიჩვენებს, რომ დინამიური სტრატეგია უზრუნველყოფს იმავე ფასად 11 პროცენტიან ზრდას გამტარუნარიანობის მიხედვით, მაღალი გაჯერებულობის ქსელის სცენარში ნახევრად მუდმივ სპექტრის ვაჭრობასთან შედარებით (ნახ. 6.4ა). შესაბამისად, MNO-ს მოგება 27 პროცენტით მეტია, ვიდრე იგივე რაოდენობის მომხმარებლების ნახევრად მუდმივი სავაჭრო სცენარისთვის (ნახ. 6.4ბ). თუმცა ასეთი სტრატეგია ბლოკჩეინში ქმნის ბევრად უფრო მაღალ ზედნადებ ხარჯებს, რადგან სპექტრის ლეჯერის მოდიფიცირებისთვის ტრანზაქციების რაოდენობა ექსპონენციალურად გაიზრდება მომხმარებლის მოთხოვნილების ზრდასთან ერთად.

გარკვეული კომპრომისის დასადგენად, ჩვენ განვიხილავთ შესაძლებლობას – გამოყენებულ იქნას AI-ის პოტენციური სპექტრით ვაჭრობისთვის. ბლოკჩეინი ინახავს ყველა ჩანაწერს სპექტრის განაწილების შესახებ თითოეული gNB-სთვის და საერთო ქსელის მახასიათებლებს, და ეს ყოველივე შეიძლება გამოყენებულ იქნას AI-ის ძვრიას მოსაზრადებლად. ლიტერატურიდან მიღებული შედეგები მიუთითებს, რომ AI-ის შეუძლია ტრაფიკის მოთხოვნების პროგნოზირება 90 პროცენტიანი სიზუსტით, მობილურობის მორგებული მოდელისთვის. ჩვენ გამოვიყენეთ ლიტერატურიდან ცნობილი AI ძვრია და გამოვიყენეთ მობილურობის კონკრეტულ მოდელი, რათა MNO-ს საშუალებით შესაძლებელი ყოფილიყო ინტელექტუალური სპექტრით ვაჭრობა მოცემული პერიოდის ტრაფიკზე პროგნოზირებული მოთხოვნილების გათვალისწინებით. ამგვარი მიდგომა ითვალისწინებს კომპრომისს ორივე ზემოაღნიშნული სავაჭრო ნაკადის დადებით და უარყოფით მხარეებს შორის. დიდი რაოდენობის UE-ებისთვის, ინტელექტუალური ვაჭრობა, ნახევრად მუდმივ ვაჭრობას აღემატება 7 პროცენტით მიღწეული

გამტარუნარიანობისთვის (ფასის მიხედვით) (ნახ. 6.4ა), ხოლო დინამიურ ვაჭრობასთან შედარებით აგებს 4 პროცენტს. MNO-ს სარგებლიანობის თვალსაზრისით, ინტელექტუალური სპექტრით ვაჭრობა უზრუნველყოფს 19 პროცენტით მეტ მოგებას, ვიდრე ნახევრად მუდმივი სპექტრით ვაჭრობა და 8 პროცენტით ნაკლებს, ვიდრე დინამიური ვაჭრობა. ბლოკჩეინის ზედნადები ხარჯების თვალსაზრისით, შემოთავაზებულ ინტელექტუალურ მიდგომას შეუძლია შეამციროს ოპერაციების რაოდენობა, ხოლო სპექტრის გამოყენების მაღალი ეფექტურობა შენარჩუნდეს. ამ ეფექტის მისაღწევად შესაძლებელია სპექტრის სავაჭრო სტრატეგიის ადაპტირება ტრაფიკის მოთხოვნაზე ცვლილებებთან მიმართებაში.

6.5.3. დისკუსია და შემდგომი კვლევის პერსპექტივები

ცხადია, რომ ბლოკჩეინის ინტეგრაციას 6G-ში აშკარად დიდი პოტენციალი აქვს. მიუხედავად იმისა, რომ თავდაპირველად ის ფოკუსირებული იყო ფინანსურ ბაზრებზე, ბლოკჩეინი იცვლის თავის პარადიგმას, მომავალი დეცენტრალიზებული და ციფრული ეკონომიკისკენ. ამ თავში განხილული კონცეფცია რეალიზებადია, მაგრამ ვფიქრობთ, რომ მოითხოვს მეტ ყურადღებას, სხვადასხვა ეკონომიკური ასპექტისა და ტექნიკური დეტალების შესასწავლად. ტოკენიზაციის შემოთავაზებული მოდელი ითვალისწინებს როგორც სპექტრის გამოყენების არეალს, ასევე დროის ფაქტორს, რაც საშუალებას იძლევა, რომ იგი გამოყენებულ იქნას მრავალი ადგილობრივი მიკრო-MNO-ების სცენარისთვის. ამის მიუხედავად, საჭიროა დამატებითი კვლევების ჩატარება მცირე მოთხოვნილებების მქონე სოფლის რაიონებთან დაკავშირებით, რათა პასუხი გაეცეს შემდეგ კითხვას: შეძლებენ კი MNO-ები შეინარჩუნონ მათი მოგების ზღვარი განთავსების არეალის მიუხედავად? კიდევ ერთი ასპექტი, ეს არის სპექტრის შესაბამისი ფასწარმოქ-

მნის შემუშავება იმის უზრუნველსაყოფად, რომ MNO-ების მოგება ძირითადად დამოკიდებული იყოს გაწეული მომსახურების ოდენობაზე და ნაკლებად იყოს დამოკიდებული სპექტრის საიჯარო შემოსავალზე. შესაბამისად, არსებობს ბლოკჩეინის რეალიზაციის მრავალი სხვა ასპექტი, რომელებიც დეტალურად უნდა იქნას შესწავლილი მომავალში, მაგალითად, უფრო შესაფერისი კონსენსუსის ალგორითმების და სმარტ-კონტრაქტების შემუშავება, რომლებიც გაითვალისწინებენ მობილური ქსელების თავისებურებებს.

6.6. მეექვსე თავის დასკვნები

ჩვენ შევისწავლეთ ბლოკჩეინის ინტეგრაციის უპირატესობები სამომავლო 6G ქსელებში, როგორებიცაა სპექტრისა და ინფრასტრუქტურის გაუმჯობესებული გაზიარება, მოქნილი SLA-ები, ინტელექტუალური პროგრამული უზრუნველყოფით განსაზღვრული ქსელის მენეჯმენტი, ოპერატორზე დამოუკიდებელი მომხმარებლის ინტერფეისი და უწყვეტი როუმინგი. ჩვენ განვიხილეთ ბლოკჩეინით მხარდაჭერილი ახალი სტრუქტურა 6G ქსელის დეცენტრალიზებული მენეჯმენტისთვის, მრავალ MNO-ებს შორის სპექტრისა და ინფრასტრუქტურის ვაჭრობის სპეციფიკური ტოკენიზაციის მოდელით. გარდა ამისა, განვიხილეთ იქნა მობილური ქსელების განაწილებული ლეჯერის სტრუქტურა და განისაზღვრა შესაბამისი ტრანზაქციები საჯარო ბლოკჩეინებში და ბლოკჩეინების კონსორციუმებში. შესწავლილ იქნა სხვადასხვა კონსენსუსის ალგორითმები 6G მობილური ქსელისთვის, მათი ვარგისიანობის გასაანალიზებლად. ბოლოს კი, UE-ებისთვის მომსახურების მიწოდების მიზნით, ჩვენ განვსაზღვრეთ და შევისწავლეთ სამი განსხვავებული სმარტ-კონტრაქტი, ნახევრად მუდმივი, დინამიური და ინტელექტუალური სპექტრის ვაჭრობის სტრატეგიებით. კომპიუტერული სიმულაციის შედეგები აჩვენებს, რომ ინტელექტუალური

სტრატეგია საბოლოო მომხმარებლისთვის აღწევს 7 პროცენტით უფრო მაღალ გამტარუნარიანობას, ვიდრე ნახევრად მუდმივი სტრატეგია და 4 პროცენტით ნაკლებს, ვიდრე იდეალიზებული სავაჭრო სტრატეგია. MNO-ს მოგების თვალსაზრისით, ინტელექტუალური სტრატეგია ნახევრად მუდმივ სტრატეგიას აღემატება 19 პროცენტით, ხოლო დინამიურ სავაჭრო სტრატეგიას ჩამორჩება 8 პროცენტით. ინტელექტუალური სტრატეგია ასევე უზრუნველყოფს ბლოკჩეინის გონივრულ ზედნადებ ხარჯებს, რომელიც ოდნავ უფრო მაღალია, ვიდრე ნახევრად მუდმივი სტრატეგიისთვის, მაგრამ გაცილებით დაბალია, ვიდრე დინამიური სტრატეგიისთვის.

მეექვსე თავში გამოყენებული ლიტერატურა

- P. Ahokangas *et al.*, "Business Models for Local 5G Micro Operators", *IEEE Trans. Cognitive Commun. and Net.*, vol. 5, no. 3, 2019, pp. 730-40.
- G. Bugar *et al.*, "Techno-Economic Framework for Dynamic Operator Selection in a Multi-Tier Heterogeneous Network", *Ad Hoc Networks*, vol. 97, 2020, pp. 102-07.
- Y. Dai *et al.*, "Blockchain and Deep Reinforcement Learning Empowered Intelligent 5G Beyond", *IEEE Network*, vol. 33, no. 3, May/June 2019, pp. 10-17.
- T. T. A. Dinh *et al.*, "Untangling Blockchain: A Data Processing View of Blockchain Systems", *IEEE Trans. Knowledge and Data Engineering*, vol. 30, no. 7, July 2018, pp. 1366-85.
- T. Hewa *et al.*, "The Role of Blockchain in 6G: Challenges, Opportunities and Research Directions", *2020 2nd 6G Wireless Summit*, Levi, Finland, 2020, pp. 1-5.

- T. Maksymyuk *et al.*, "Intelligent Framework for Radio Access Network Design", *Wireless Networks*, vol. 26, 2020, pp. 759-74.
- T. Maksymyuk *et al.*, "Blockchain-Empowered Framework for Decentralized Network Management in 6G", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 9, Sep. 2020, pp. 86-92.
- D. C. Nguyen *et al.*, "Blockchain for 5G and Beyond Networks: A State of the Art Survey", *J. Network and Computer Applications*, vol. 166, 2020, article 102693.
- B. Nour *et al.*, "A Blockchain-Based Network Slice Broker for 5G Services", *IEEE Networking Letters*, vol. 1, no. 3, 2019, pp. 99-102.
- J. Qiu *et al.*, "Blockchain-Based Secure Spectrum Trading for Unmanned-Aerial-Vehicle-Assisted Cellular Networks: An Operator's Perspective", *IEEE Internet of Things J.*, vol. 7, no. 1, Jan. 2020, pp. 451-66.
- D. B. Rawat, "Fusion of Software Defined Networking, Edge Computing, and Blockchain Technology for Wireless Network Virtualization", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 10, Oct. 2019, pp. 50-55.
- A. Refaey *et al.*, "A Blockchain Policy and Charging Control Framework for Roaming in Cellular Networks", *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, May/June 2020, pp. 170-77.
- Y. Xiao *et al.*, "A Survey of Distributed Consensus Protocols for Blockchain Networks", *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 2, 2020, pp. 1432-65.
- N. Zhang *et al.*, "Software Defined Networking Enabled Wireless Network Virtualization: Challenges and Solutions", *IEEE Network*, vol. 31, no. 5, Sept./Oct. 2017, pp. 42-49.

Z. Zhang *et al.*, "6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies", *IEEE Vehic. Tech. Mag.*, vol. 14, no. 3, 2019, pp. 28-41.

თავი 7. ხელოვნურ ინტელექტზე დაფუძნებული საეთერო ინტერფეისი და ქსელის მართვის მეთოდები 6G-სთვის

7.1. შესავალი

მას შემდეგ, რაც 2020 წელს 3GPP-მ დაასრულა Release 16-ის სპეციფიკაციების შემუშავება და, შესაბამისად, მთელს მსოფლიოში დაჩქარდა 5G-ს კომერციალიზაცია, 6G-ს მიმართ გლობალურმა ინტერესმა იწყოს სწრაფი ზრდა. იზადება საინტერესო და მნიშვნელოვანი კითხვა: საგრძნობლად შეამსუბუქებს თუ არა AI-ის, ანუ ხელოვნური ინტელექტის მიმართულებით სწრაფი პროგრესი, იმ უზარმაზარ ძალისხმევას, რომელიც საჭიროა 6G-სა და შემდგომი თაობების სტანდარტიზაციისთვის? ამ თავში გამოკვლეულია AI-ის პოტენციური ზემოქმედება საეთერო ინტერფეისის დიზაინზე. თავდაპირველად განხილულია AI-ით მხარდაჭერილი ქსელის არქიტექტურა. შემდგომ წარმოდგენილია ძალადი ფენის, ფიზიკური ფენის და ფენათა შორისი დიზაინი, რომლებიც გაძლიერებულია AI შესაძლებლობებით. ამ დიზაინის საფუძველზე, სავარაუდოდ, მომავალი 6G თაობა და მის შემდგომი თაობები შევლენ AI-ის ეპოქაში. პოტენციურად, ახალი გამოყენების შემთხვევებისა და უფრო რთული მოთხოვნებისათვის, ქსელს შეუძლია ავტომატურად განაახლოს საეთერო ინტერფეისის პროტოკოლები, რამაც შეიძლება მნიშვნელოვნად შეამციროს სტანდარტიზაციაზე მიმართული ძალისხმევა და უსადენო საკომუნიკაციო ქსელების ხარჯები. ასევე მოსალოდნელია, რომ AI-ით მხარდაჭერილი მობილური პერიფერიული გამოთვლების, ინტელექტუალური მობილურობის, ჰენდოვერის და

სიხშირული სპექტრის ჰკვიანურად მართვის მეთოდები ხელს შეუწყობენ 6G ქსელების ეფექტურ ფუნქციონირებას.

7.2. ხელოვნური ინტელექტის როლი მომავალ 6G ქსელებში

პირველი თაობიდან, ამჟამინდელ მეხუთე თაობამდე (1G-დან 5G-მდე), უსადენო საკომუნიკაციო ქსელების განვითარების ერთ-ერთი მთავარი მამოძრავებელ ძალა იყო მობილური ტრაფიკის მუდმივად მზარდი მოთხოვნების დაკმაყოფილება. 3GPP-ს მიერ ახლაბან შემუშავებული და გამოქვეყნებული 5G ახალი რადიოს (5G NR) სპეციფიკაციების თანახმად, შესწავლილი ან უკვე მიღებულია ახალი კონცეფციები და გადაწყვეტილებები, რომლებიც მოიცავენ, მაგალითად, მომსახურებაზე დაფუძნებულ ქსელის არქიტექტურას, ორფენიანი ცენტრალიზებული ბლოკის (Centralized Unit, CU) და გამანაწილებელი ბლოკის (Distributed Unit, DU) შემცველი რადიოწვდომის ქსელის (RAN) არქიტექტურას და სასიგნალო ინტერფეისს და ა.შ.

საკომუნიკაციო სფეროში მოღვაწე მრავალი მკვლევარისა და ინჟინრისათვის ბუნებრივი და მნიშვნელოვანი კითხვაა: შესაძლებელია თუ არა, რომ 6G შემოვიდეს დაახლოებით 2030 წლისთვის და რა იქნება მისი განსაკუთრებული თვისებები?

1G-დან 5G-მდე განვითარების ისტორიული ტენდენციის გათვალისწინებით, ძალიან მაღალი მოთხოვნები იქნება წაყენებული 6G ქსელის მიმართ, როგორებიცაა, მაგალითად, ტბიტ/წმ მონაცემთა გადაცემის პიკური სიჩქარე, 5G-სთან შედარებით 2-3-ჯერ გაზრდილი სპექტრული ეფექტურობა, მომხმარებლის გამოცდილებაზე დაფუძნებული მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე 10-100 გბიტ/წმ, 0.1 მლწმ-ზე ნაკლები შეყოვნება მომხმარებლის სიბრტყისათვის და მობილურობის

მხარდაჭერა 1000 კმ/სთ-ზე მეტი სიჩქარის პირობებში. ამასთან ერთად, 6G სავარაუდოდ იქნება ყოვლისმომცველი საყოველთაო უსადენო ინტერნეტის ზღვრულზე, რომელსაც შეეძლება მობილური ტრაფიკის მხარდაჭერა მრავალფეროვანი სცენარებით, შერეული ძირითადი მახასიათებლების ინდიკატორებით. სტანდარტიზაციის განვითარების ამჟამინდელი ტენდენციის გათვალისწინებით, ერთი აუცილებლად გასათვალისწინებელი ფაქტორი იქნება ის, რომ უსადენო ფიჭური კომუნიკაციების თითოეული თაობისთვის RAN-ისა და ძირითადი ქსელის (CN) აპარატურული და პროგრამული უზრუნველყოფის ახალი ვერსიებით ჩანაცვლების საერთო ღირებულება მნიშვნელოვნად გაიზრდება, რაც მძიმე ტვირთად დააწევა ოპერატორებს.

მოსალოდნელია, რომ AI გადამწყვეტ როლს შეასრულებს მომავალ 6G ქსელებში. „ყოვლისმომცველი ინტელექტი“ შემოთავაზებულია, როგორც 6G ქსელის ერთ-ერთი საბოლოო მიზანი, რაც ხელს უწყობს ავტომატურად გენერირებული და ავტომატურად კონფიგურირებული ქსელის პარადიგმის ჩამოყალიბებას. სამეცნიერო ლიტერატურაში 6G წარმოდგენილია საყოველთაო AI სერვისებით, დაწყებული CN-დან, ბოლო მოწყობილობებამდე. სამომავლო კვლევების კუთხით უკვე გამოიკვეთა რამდენიმე მთავარი გამოწვევა AI-ის გამოყენებაზე 6G-ში. ინდუსტრიამ ასევე დაიწყო AI ტექნიკის უსადენო ქსელებში გამოყენების შესწავლა. 3GPP-მ წარმოადგინა მასალები, რომლებიც ეხებათ ქსელის მონაცემთა ანალიზის ფუნქციის სასწავლო მიმართულებებს და დიდ მონაცემთა ბაზაზე დაფუძნებული ქსელის არქიტექტურას 5G-სთვის, რათა განისაზღვროს პერსონალიზებული და გაუმჯობესებული მომსახურების მიწოდება, ტრაფიკის მახასიათებლის იდენტიფიკაციის საშუალებით. მეორეს მხრივ, უნდა აღინიშნოს ის გარემოება, რომ AI-ით მხარდაჭერილი საეთერო ინტერფეისის დიზაინი არ შედის 3GPP-ს დღევანდელი მოქმედების სფეროში, რადგან AI-ის ფიზიკური ფენის დიზაინის შესწავლა ჯერ კიდევ განვითარების ადრე-

ულ ეტაპზე, ხოლო 5G ქსელის არქიტექტურის ჩარჩოზე, პროტოკოლის ფენებზე და ფიზიკურ ფენაზე მუშაობა უკვე პრაქტიკულად დასრულებულია. ამიტომ, მიუხედავად იმისა, რომ AI შეიძლება გამოყენებულ იქნას გარკვეულწილად 5G-შიც, ეს არის 6G, რომელიც უფრო მეტად გილს დაუთმობს AI-ის მისი პოტენციალის გამოსამჟღავნებლად.

ამ თავში, ჩვენ ძირითადად გავიხილავთ AI ტექნოლოგიების გავლენას უსადენო RAN-ზე. მიუხედავად რამდენიმე საინტერესო სამეცნიერო სტატიისა, რომლებიც შეისწავლიან, თუ როგორ უნდა იქნას გამოყენებული AI RAN-ის ფუნქციონირებისას, ცოტა კვლევაა ჩატარებული იმ მიმართულებით, თუ როგორ იმოქმედებენ AI-ის გამოყენების ეს მეთოდები საეთერო ინტერფეისის დიზაინზე და სტანდარტიზაციაზე. ჩნდება კითხვა: მომავალი უსადენო კომუნიკაციებისათვის, შესაძლებელია თუ არა, რომ მზარდმა AI ტექნოლოგიებმა არსებითად ხელი შეუწყონ სტანდარტიზაციის ევოლუციას, რათა მოხდეს უსადენო საკომუნიკაციო სისტემების ავტომატური განახლება? არსებობს მოლოდინი, რომ პოტენციური ახალი გამოყენების შემთხვევებისა და უფრო რთული მოთხოვნებისათვის, ქსელი ავტომატურად მოახდენს დამუშავების ალგორითმების, სიგნალისა და პროტოკოლის პროცედურების კონფიგურირებას, რამაც შეიძლება მნიშვნელოვნად შეამსუბუქოს სტანდარტიზაციაზე ძალისხმევა და შეამციროს ხარჯები, ახალი ქსელის ინფრასტრუქტურის განთავსებისათვის.

ამ თავის ძირითადი შედეგები და სტრუქტურა მოცემულია შემდეგნაირად: პირველ რიგში, წარმოდგენილია AI-ით მზარდაჭერილი ქსელის არქიტექტურა, რომელსაც შეუძლია მოახდინოს RAN-ის ფუნქციების კონფიგურირება და დროის რეალურ მასშტაბში ინტელექტუალური დაგეგმვა, რათა უზრუნველყოფილი იქნას რესურსების მოქნილი, ელასტიური, მორგებული და მოთხოვნადი მენეჯმენტი. ამის შემდეგ, შესწავლილია AI-ის საშუალებით ფიზიკური (PHY) ფენის დამუშავება. წარმოდგენილი მაგალითის და აგრეთვე სხვა ლიტერატური-

დან ცნობილი სანდო კვლევების საფუძველზე, რომლებიც შეეხება AI-ის საშუალებით PHY-ს შემუშავებას, ჩვენ წარმოვადგენთ სტრუქტურას – „ხელოვნურ ინტელექტს პლუს ადამიანის ინტელექტი (AI + HI)“, მომავალი საეთერო ინტერფეისის დიზაინისთვის. ამის შემდეგ, შემოთავაზებულია AI-ზე დაფუძნებული შრეებს შორისი ოპტიმიზაცია, სადაც ხდება საეთერო ინტერფეისის სტატუსის შესახებ ინფორმაციისა და გამოყენების მახასიათებლების ანალიზი, ერთობლივი ოპტიმიზაციის გასაადვილებლად. დაბოლოს, ჩვენ განვიხილავთ AI ტექნიკის მისადაგებას 6G ქსელებისადმი და ვაჩვენებთ, თუ როგორ უნდა გამოვიყენოთ AI-ით მხარდაჭერილი კონკრეტული მეთოდები, საკომუნიკაციო ქსელების მუშაობის ეფექტური ოპტიმიზაციისთვის.

7.3. AI-ით მხარდაჭერილი ქსელის არქიტექტურა და მაღალი ფენის დიზაინი

7.3.1. მოტივაცია

მანქანური სწავლება (ML) არის AI-ის ქვესივრცე, რომლის დროსაც საქმე ეხება საინფორმაციო ტექნოლოგიების სისტემების შესაძლებლობას, მონაცემთა ბაზაში არსებულ ნიმუშებზე დაყრდნობით დამოუკიდებლად მოძებნოს პრობლემის გადაწყვეტის გზები. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, მანქანური სწავლება საშუალებას აძლევს საინფორმაციო ტექნოლოგიების სისტემებს, შეიმუშაონ ნიმუშები არსებული ალგორითმებისა და მონაცემთა ბაზების საფუძველზე და განსაზღვრონ პრობლემის ადეკვატური გადაწყვეტის კონცეფციები. ამგვარად, მანქანურ სწავლებაში ცოდნა გამომუშავებულია გამოცდილების საფუძველზე.

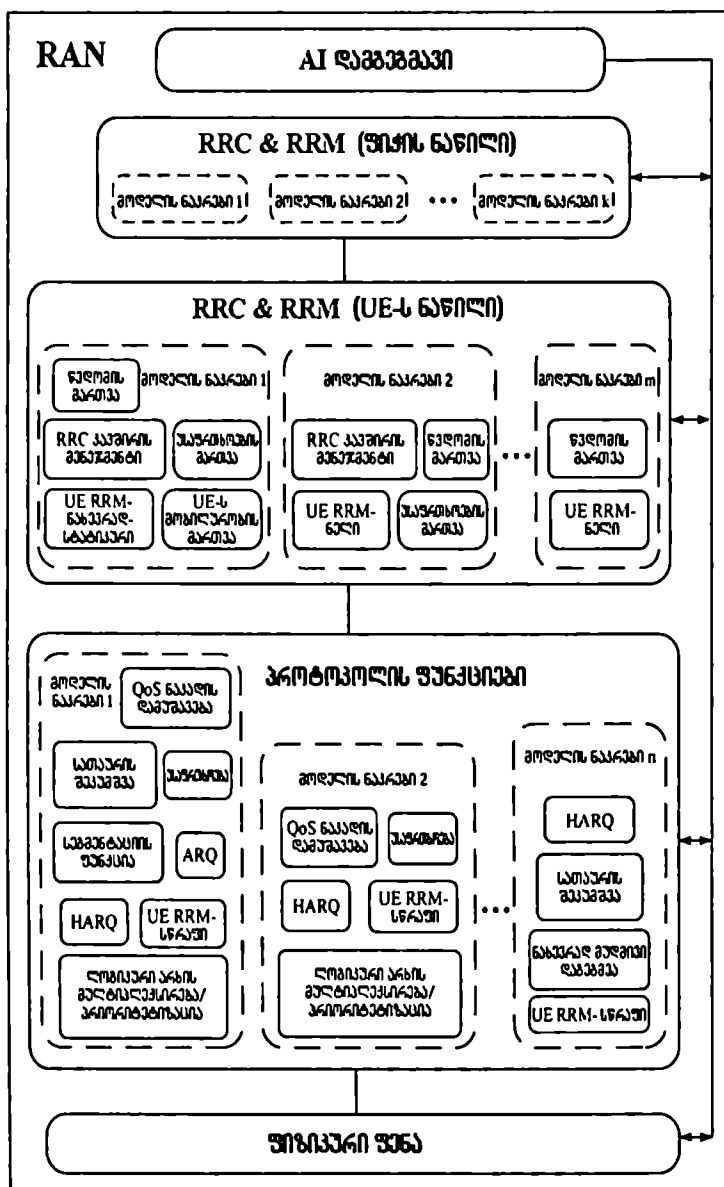
დღეისათვის, მრავალი კვლევაა ჩატარებული იმასთან დაკავშირებით, თუ როგორ უნდა გამოვიყენოთ AI ტექნოლოგიები (განსაკუთრებით, მანქანური სწავლების თანამედროვე მეთოდები) RAN დიზაინში. მანქანურმა სწავლებამ შეიძლება მნიშვნელოვანი როლი ითამაშოს რადიორესურსების მენეჯმენტში/მართვაში (Radio Resource Management /Control, RRM/RRC), მობილურობის მართვისას, ქსელის შემუშავებისას და ა.შ. თუ მაგალითისთვის ავიღებთ სიმძლავრის მართვის საკითხს რადიოსიხშირული სპექტრის გაზიარების სისტემებში, მინიმუმ სამი ტიპის მიდგომებია ხელმისაწვდომი: RL-ზე დაფუძნებული მიდგომები, მეთვალყურეობით სწავლებაზე დაფუძნებული მიდგომები და ტრანსფერულ სწავლებაზე დაფუძნებული მიდგომები. RL-ზე დაფუძნებული მიდგომები უშუალოდ შეისწავლიან სიმძლავრის მართვის პოლიტიკას სისტემის გარემოსთან ურთიერთქმედების საშუალებით, სადაც Q-სწავლება ყველაზე ფართოდ გამოყენებული ინსტრუმენტია. ამის საპირისპიროდ, მეთვალყურეობით სწავლებაზე დაფუძნებული მიდგომები მიზნად ისახავენ ნეირონული ქსელის განთავსების მეთოდების გამოყენებით რთული არაამოწონილი ფუნქციის მიმართ ოპტიმიზაციის პრობლემის ეფექტურად გადაჭრას. ტრანსფერულ სწავლებაზე დაფუძნებული მიდგომები გარკვეულწილად ჰგავს RL-ზე დაფუძნებულ მიდგომებს, მაგრამ უფრო მეტი ყურადღება ექცევა ნასწავლი მოდელების ხელმეორედ გამოყენებას მსგავსი პარამეტრების მქონე სხვა ფიჭებში.

ამასთან, ტრივიალური არ არის ზემოხსენებული კვლევების პრაქტიკულ ქსელებში განხორციელება. არსებული RAN-ის არქიტექტურა და მასთან დაკავშირებული ინტერფეისის დიზაინი არ იძლეოდა დიზაინის საკმარის მოქნილობას, AI მიდგომების გამოყენებით ქსელის მომავალი პოტენციური გაუმჯობესებისთვის. მაგალითად, ოპერატორებს გაუჭირდათ დაგეგმვის მექანიზმების გაუმჯობესება მომხმარებლის იმ ცოდნის გამოყენებით, რომელიც მიიღეს დიდ მონაცემთა ანა-

ლიზის საშუალებით, ვინაიდან მათი ქსელის RRM და MAC დაგეგმვის ალგორითმები განხორციელდა ვენდორების მიერ და არ არსებობს ღია ინტერფეისი, ხელმისაწვდომი პოტენციური გაუმჯობესებისთვის. გარდა ამისა, ახლად შექმნილმა სერვისებმა შეიძლება მოითხოვონ არა მხოლოდ მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარე და ულტრა მაღალი საიმედოობა, არამედ პოზიციონირების მაღალი მგრძნობელობა და მომხმარებლებთან ხშირი ურთიერთქმედება. შესაბამისად, საჭიროა გამოშვებების ხშირი განახლება, რომ ჩვეულებრივი, ვერტიკალურად იერარქიული პროტოკოლის სტეკის არქიტექტურა გაუმკლავდეს ამ ახლად შექმნილ სერვისებს, რაც გაცილებით მეტ ძალისხმევას ითვალისწინებს სტანდარტიზაციის პროცესში. ამიტომ, აცილებელია შემუშავდეს ახალი RAN არქიტექტურა, რათა მოხდეს AI ტექნიკის მიერ მიღებული პოტენციური მიღწევების გააქტიურება, როგორც ეს განხილულია შემდეგ ქვეპარაგრაფში.

7.3.2. AI-ით მხარდაჭერილი RAN-ის არქიტექტურა

სტანდარტიზაციასთან დაკავშირებული პრობლემების გაიოლებისა და AI-ით მხარდაჭერილი ქსელის ოპტიმიზაციისას, პოტენციური მოგების მაქსიმალურად გაზრდის მიზნით, ჩვენ განვიხილავთ AI-ით მხარდაჭერილი კონკრეტული RAN-ის არქიტექტურას. როგორც ნაჩვენებია ნახ. 7.1-ზე, RAN-ის ფუნქციებს მართავს ერთი AI დამგეგმავი, რომელიც განსაზღვრავს ყველა საჭირო RRC, RRM და პროტოკოლის ფუნქციის ელემენტების (Protocol Function Elements, PFEs) კონფიგურაციას და MAC ფენის დაგეგმვას. ტრადიციულ RRC, RRM და MAC დაგეგმვასთან შედარებით, ამ AI დამგეგმავს აქვს უფრო ინტელექტუალური ალგორითმები:



ნახ. 7.1. AI-ით მხარდაჭერილი RAN-ის არქიტექტურა

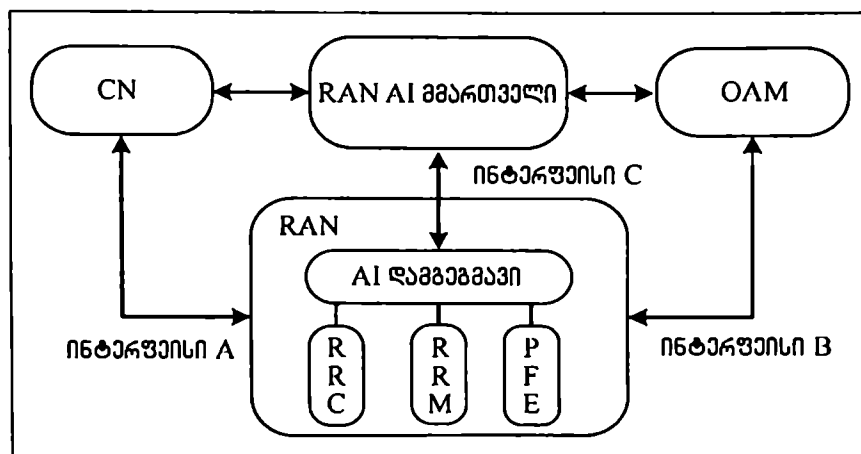
- სერვისების ინტელექტუალური იდენტიფიკაცია: სერვისების მახასიათებლების შესწავლა შესაძლებელია AI-ის სხვადასხვა ტექნიკით, მათ შორისაა ღრმა სწავლება, RL, Q-სწავლება და ა.შ. ეს ინფორმაცია საშუალებას მისცემს MAC დამგეგმავს გამოიყენოს უფრო ინტელექტუალური პოლიტიკა და ალგორითმები;
- პროტოკოლის ფუნქციების ინტელექტუალური შერჩევა;
- MAC-ის მძლავრი დაგეგმვა: დამგეგმავი უნდა იყოს უფრო ეფექტური და ინტელექტუალური, შემუშავებული არხების პოტენციური პროგნოზირების, მონაცემთა ტრაფიკის, მომსახურების ხარისხის/გამოცდილების ხარისხის (Quality of Service/Quality of Experience, QoS/QoE) ინდიკატორის და ა.შ. საფუძველზე და ეს უნდა განხორციელდეს ან AI მმართველით ან AI დამგეგმავით;

ფიზიკური ფენის ინტელექტუალური ფუნქციები, მაგალითად, AI-ის მხარდაჭერით არხის კოდირება და უფრო თანამედროვე მიმღებების კონსტრუირება შესაძლებელია AI-ის შესაძლებლობების გამოყენებით.

ამ გზით შემოთავაზებულ არქიტექტურას შეუძლია გარდაქმნას არსებული იერარქიული პროტოკოლის სტეკი მოდულარიზებულ PFE-ს გარკვეულ ნაკრებში, რითაც უზრუნველყოფს მოქნილ, ელასტიურ, მორგებულ და მოთხოვნილ რესურსების მენეჯმენტს, დივერსიფიცირებული სერვისების მოთხოვნების შესაბამისად.

AI-ით მხარდაჭერილი ქსელის მაღალი დონის არქიტექტურა ასახულია ნახ. 7.2-ზე. RAN-ის AI მმართველი პასუხისმგებელია დროის არარეალურ მასშტაბში AI დამუშავებაზე და აქვს ლოგიკური ინტერფეისები CN-თან, ქსელის ოპერაციების, ადმინისტრირებისა და ტექნიკური მომსახურების (Operation, Administration and Maintenance, OAM) პლატფორმასთან და საბაზო სადგურთან (BS). დიდ მონაცემთა ანალიზის საშუალებით, AI მმართველს შეუძლია წინასწარ განსაზღვროს მომხმარებლის მობილურობა, ტრაფიკის ქცევა, ქსელის დატვირთვის

რყევები და ა.შ. ეს მონაცემები შემდგომ გადაეცემა BS-ს, რათა მოხდეს AI დამგეგმავის დახმარება, რომელიც ახორციელებს RRC, RRM, PFE ორკესტრირებას და დროის რეალურ მასშტაბში MAC-ის დაგეგმვას. PFE შეიძლება შეიცავდეს ყველა საჭირო ფუნქციას, რომლებიც მითითებულია 4G და 5G პროტოკოლის სტეკებში და როგორებიცაა, მაგალითად, ჰიბრიდული ავტომატური რეტრანსლაციის მოთხოვნა (Hybrid Automatic Retransmission Request, HARQ), სათაურის შეკუმშვა და სეგმენტაცია. ასევე, შეიძლება ჩართული იქნას პოტენციური ფუნქციები, რომლებიც საჭირო იქნება მომავალში. გასათვალისწინებელია, რომ AI მართვა და AI დაგეგმვა ლოგიკური ერთეულები ან ფუნქციებია და მათი ფიზიკური განხორციელება შესაძლებელია იმავე ობიექტში, როგორიც არის CU. გარდა ამისა, AI მმართველი ასევე შეიძლება განთავსდეს OAM პლატფორმაში, რომ ჰქონდეს გლობალური ინტელექტუალური შესაძლებლობები და ურთიერთქმედების უნარი BS-ში AI დამგეგმავთან.



ნახ. 7.2. AI-ით მხარდაჭერილი უსადენო ქსელის არქიტექტურა

AI დამგეგმავი არის შემოთავაზებული RAN-ის არქიტექტურის საფუძველი, რომელსაც შეუძლია დინამიურად მოირგოს და აოპტიმიზოს RAN, ამ უკანასკნელის სხვა ფუნქციებთან ურთიერთქმედებით. განვიხილოთ ურთიერთქმედების ორი ძირითადი ტიპი, რომლებიც არსებობს AI დამგეგმავსა და RAN-ის სხვა ფუნქციებს შორის.

ურთიერთქმედება RRC და RRM მექანიზმებთან: AI მმართველს და AI დამგეგმავს შეუძლიათ გამოიყენონ ღრმა სწავლების ტექნიკა, რომელიც დაფუძნებულია ისტორიულ მონაცემებსა და ახალ მონაცემებზე, რათა დადგინდეს ინდივიდუალური RRC და RRM ფუნქციების ერთობლიობა, მოცემული UE-სთვის სპეციფიკურ სცენარში. მაგალითად, RRC ფუნქციის მე-2 მოდელში და RRM UE ნაწილისთვის ნახ. 7.1-ზე, თუ AI მმართველი აღმოაჩენს, რომ ზოგიერთი UE-ები ძირითადად სტატიკურია გარკვეული პერიოდის განმავლობაში, დიდ მონაცემთა ანალიზის გამოყენებით მას შეუძლია (ხელახლა) დაატრენინგოს RRC და RRM ფუნქციების მოდელები, RRM გაზომვის ანგარიშების და მობილურობის მართვის ფუნქციების შესუსტების ან გაუქმების მიზნით, UE-ს მობილურობის მართვის პროცესის გასამარტივებლად. უფრო მეტიც, თუ AI მმართველი დაადგენს, რომ ზოგიერთი UE-ს სერვისი ყოველთვის მოითხოვს ძალიან მცირე შეყოვნებას, UE-ს ტრაფიკის სტრუქტურა ძნელად პროგნოზირდება, ხოლო მონაცემთა მოცულობა არ არის ძალიან მაღალი, AI დამგეგმავი გადაიყვანს UE-ებს RRC არააქტიურ რეჟიმში, ნაცვლად იმისა, რომ ისინი იმყოფებოდნენ RRC ლოდინის რეჟიმში ან RRC დაკავშირების რეჟიმში. ამავდროულად, AI მმართველს შეუძლია პირდაპირ მიმართოს UE-ების ტრაფიკი ლოკალურ კონტენტში და არა ღრუბლოვან კონტენტში, რათა შემცირდეს შეყოვნება.

ურთიერთქმედება პროტოკოლის ფუნქციის სხვა ელემენტებთან: ზემოთ მოცემული RRC და RRM სქემების გარდა, AI დამგეგმავი ასევე

პასუხისმგებელია PFE-ს კონფიგურაციებზე კონკრეტული სერვისისთვის. ყველა ხელმისაწვდომი PFE-ებიდან, დამგეგმავი შეარჩევს PFE-ების კომპლექტს ყველა საჭირო ინფორმაციის გათვალისწინებით, როგორებიცაა, მაგალითად, დროის არარეალურ მასშტაბში გამოყენებითი ფენის ტრაფიკის მახასიათებლები და მოთხოვნები, თითქმის დროის რეალურ მასშტაბში მომხმარებლის ქსელის მხრიდან გადაცემის ინდიკატორის ინფორმაცია, დროის რეალური მასშტაბში ფიზიკური სატრანსპორტო ბლოკის (Transport Block, TB) შესახებ რესურსების ინფორმაცია და ა.შ. ზემოხსენებული ინფორმაციის ეფექტურად მოპოვება შესაძლებელია გამოყენების ფენისაგან, სატრანსპორტო ფენისაგან ან MAC და PHY ფენებისაგან, ტრაფიკის ნაკადებთან მიმართებაში მანქანური სწავლების პოპულარული მიდგომების გამოყენებით. მაგალითად, UE-ების ტრაფიკის სტრუქტურის საფუძველზე, რომელიც მიღებულია გამოყენების ფენის მონაცემებიდან, ქსელს შეუძლია პირდაპირ გამოყოს დარეზერვებული ნახევრად სტატიკური რესურსი, როგორიცაა ნახევრად მუდმივი დაგეგმვა (Semi-Persistent Scheduling, SPS) და კონფიგურებული გრანტის (Configured Grant, CG) კონფიგურაციები UE-სთვის, რეგულარული დინამიური დაგეგმვის ნაცვლად, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 7.1-ზე პროტოკოლის ფუნქციების მოდელში. ანალოგიურად, შეიძლება დაფიქსირდეს სამსახურის კონკრეტული მოთხოვნა საიმედოობასა და სიგოცხლისუნარიანობის ხანგრძლივობაზე, რაც ეხმარება დამგეგმავს UE-ებისთვის ჩართოს დუბლირების მექანიზმი ან გამეორებითი გადაცემა.

7.3.3. პოტენციური გავლენა სტანდარტიზაციაზე და მომავალი გამოწვევები

შემოთავაზებული AI-ით მხარდაჭერილი RAN-ის არქიტექტურისთვის, ნაწილები, რომელთა სტანდარტიზაციაც უნდა მოხდეს, შეიძლე-

ბა მნიშვნელოვნად შემცირდეს, LTE და 5G NR სისტემებთან შედარებით. სავალდებულო მახასიათებლები (რომლებიც კარგად არის განსაზღვრული ამჟამინდელ სტანდარტებში), ინტერფეისები სავალდებულო მახასიათებლებსა და AI დამგეგმავს შორის, ანუ A ინტერფეისი AI მმართველსა და CN-ს შორის, B ინტერფეისი AI მმართველსა და OAM-ს შორის და C ინტერფეისი AI მმართველს (დროის არარეალურ მასშტაბში) და AI დამგეგმავს (დროის რეალურ ან თითქმის რეალურ მასშტაბში) შორის, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 7.2-ზე, სტანდარტიზებული უნდა იყოს. ამის საპირისპიროდ, არასავალდებულო ფუნქციები, რომლებიც მუშავდება AI დამგეგმავის მიერ, არ არის საჭირო იყოს სტანდარტიზებული. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, ვინაიდან მრავალი სამომავლო ფუნქციის/მახასიათებლის განხორციელება შესაძლებელია ადამიანის ჩაურევლად ან მისი ძალზე შემცირებული ძალისხმევით.

მას შემდეგ, რაც უფრო და უფრო მეტი კვლევა ადასტურებს RAN-ის დიზაინში AI ტექნიკის გამოყენების სარგებელს, გაცილებით მეტი ძალისხმევა იქნება საჭირო რეალურ ქსელებში AI-ის მხარდაჭერით მიღებული გადაწყვეტილებების განხორციელების საკითხის მოგვარებისთვის. კლასიკურ და მნიშვნელოვან საკითხებზე სამეცნიერო კვლევების გაგრძელების გარდა, როგორიცაა მონაცემთა შეგროვება უსადენო ქსელებში, საჭიროა კიდევ ვიფიქროთ იმაზე, თუ უკეთ როგორ დავუჭიროთ მხარი AI-ზე დაფუძნებულ RAN გადაწყვეტილებებს, ინტერფეისის დიზაინსა და ქსელის არქიტექტურის თვალსაზრისით და დავტოვოთ საკმარისი თავისუფლება მომავალი განვითარებისთვის. მხოლოდ ამ პრაქტიკული საკითხების გადაჭრის შემდეგ შევძლებთ ჭეშმარიტად დავადასტუროთ AI ტექნიკის უპირატესობები უსადენო ქსელებში. დღეისათვის, ინდუსტრიამ დიდი ინტერესი გამოავლინა ზემოაღნიშნული საკითხების მიმართ და ჩაატარა რამდენიმე პირველადი გამოკვლევა, მაგალითად, რადიოინტელექტუალური მმარ-

თველის (Radio Intelligence Controller, RIC) ფუნქციონირების კუთხით ღია RAN-თან (Open-RAN) ალიანსში. ამასთან, წინასწარი შედეგები კვლავ წინააღმდეგობრივია. მომავალში, ასეთი პრობლემების გადასაჭრელად, საჭირო იქნება ინდუსტრიისა და აკადემიური წრეების ერთობლივი ძალისხმევა.

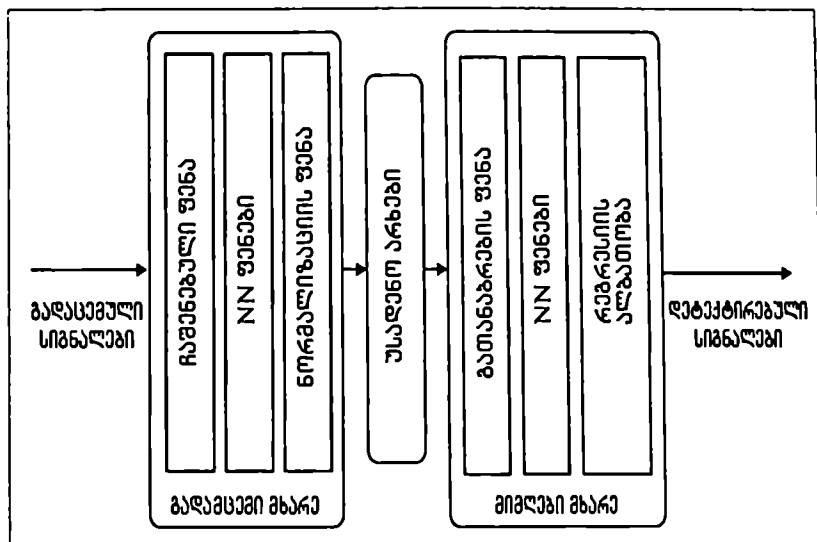
7.4. AI-ით მხარდაჭერილი ფიზიკური ფენის დიზაინი

7.4.1. AI-ით მხარდაჭერილი ტრანსივერის შემუშავება

ფიზიკური ფენის ტრანსივერის დიზაინმა, საკომუნიკაციო ქსელის საწყისი კომერციალიზაციის შემდეგ, მიიღო თანმიმდევრული მოდულიდან მოდულამდე რეალიზაციის ფორმა. ამასთან, საჭიროა რთული და ძნელად კონსტრუირებადი შიდა ინტერფეისი და მმართველი სასიგნალო სისტემა, რათა მონაცემთა სიგნალები თავისუფლად გადაადგილდებოდნენ ამ მოდულებს შორის, რაც ფიზიკური კომუნიკაციების განვითარების პროცესში იწვევს PHY ფენის დიზაინის საკმაოდ გაბერბობას. მიუხედავად იმისა, რომ განხილული იქნა მრავალი მოდულის ერთობლივი დიზაინი და ოპტიმიზაცია, ამგვარი სქემების სირთულე, როგორც წესი, მნიშვნელოვნად მაღალია.

AI-ის მხარდაჭერით PHY ფენის დიზაინის შემუშავება, პერსპექტიული მიდგომაა ზემოთ მოცემული საკითხის მოსაგვარებლად. როგორც შესწავლილია ლიტერატურაში, ღრმა სწავლების პროცესში, მოწინავე ხელოვნური ნეირონული ქსელები (Neural Networks, NNs) შეიძლება გამოყენებულ იქნას ფიზიკური ფენის მთელი რიგი მოდულების ერთობლივი ოპტიმიზაციისთვის. მაგალითად, ნახ. 7.3 წარმოგვიდგენს მარტივ სისტემას, რომელიც ახორციელებს კომუნიკაციას ადიტიური თეთრი გაუსის ხმაურის (Additive White Gaussian Noise, AWGN)

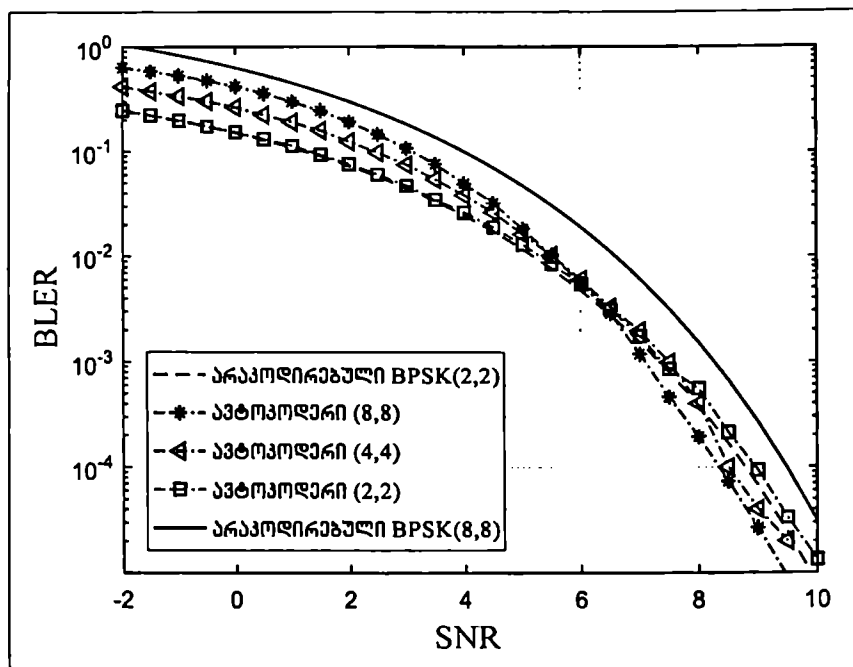
შემდეგელ არხში, რომელიც რეალიზდება NN სტრუქტურის ავტოკოდერის საშუალებით.



ნახ. 7.3. NN-ის ბაზაზე აგებული ტრანსივერის ბლოკ-სქემა

ნახ. 7.4-ზე წარმოდგენილია ტრანსივერების მახასიათებლები, რომლებიც რეალიზებულია NN-ში, მისი მიზანშეწონილობის საილუსტრაციოდ, სადაც ორივე ტრანსივერი იმპლემენტირებულია ორი ფენის მიმდევრობითი სრულად დაკავშირებული NN-ების საშუალებით. მოცემულია ბლოკზე შეცდომის ალბათობის (Block Error Rate, BLER) დამოკიდებულება SNR-ზე. არაკოდირებული ორობითი PSK სიგნალები-საგან (BPSK) შედგენილი სიტყვები სიგრძით 2 და 8, ე.ი. (2,2) და (8,8), შედარებულია ავტოკოდერებს, რომლებიც ასევე არ შეიცავენ სიჭარბეს (ანუ შესწავლილია ავტოკოდერები პარამეტრებით (2,2), (4,4) და (8,8)). ვინაიდან განიხილება მარტივად დიფერენცირებადი AWGN არხი, ღრმა სწავლების პროცესში შეიძლება ადაპტირებული იქნას კლასიკური ტრენინგის ალგორითმები, რათა გამჭოლად (ერთი ბოლოდან მეო-

რე ბოლომდე) მოხდეს NN-ის შესწავლა. ჩვენს ექსპერიმენტში გამოიყენება ადამის ოპტიმიზატორი, როდესაც გარემოში SNR ტოლია 7 დბ-ის, რათა მოხდეს შეცდომების საერთო რაოდენობის მინიმიზაცია, მიმღებში შეტყობინებების აღდგენისას.



ნახ. 7.4. ტრანსიეკრის ორი რეალიზაციის მახასიათებლების შედარება

ტრენინგის ეტაპზე გამოიყენება სიმულაციის შედეგად გენერირებული 10^6 რაოდენობის ტრენინგის მონაცემების ამონარჩევები, რომელთაგან თითოეული შედგება გადაცემული სიმბოლოს, მიღებული სიმბოლოს და AWGN არხის რეალიზაციისაგან. გასათვალისწინებელია ის გარემოება, რომ ვინაიდან ჩვენს მაგალითში არ განვიხილავთ ონლაინ ადაპტაციას, მოდელის განმეორებითი ტრენინგი არ არის საჭირო. ამასთან, ონლაინ ადაპტაცია მნიშვნელოვან როლს ასრულებს

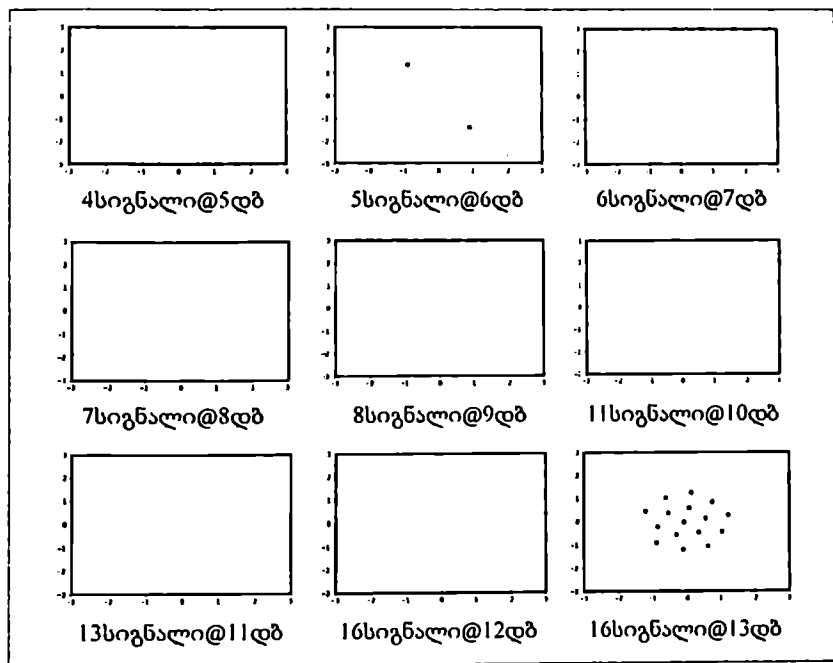
AI-ით მხარდაჭერილი PHY ფენის გადაწყვეტილებების პრაქტიკულ სისტემებში განთავსებისას, სადაც დროის რეალურ მასშტაბში ონლაინ მონაცემების მიხედვით მოდელის განმეორებითი ტრენინგი ჩვეულებრივი მიდგომაა.

ნახ. 7.4-დან ვხედავთ, რომ ოპტიმიზებულ NN-ებს შეუძლიათ აწარმოონ შეტყობინებების გადაცემა AWGN არხში თითქმის იგივე მახასიათებლებით, როგორითაც ფუნქციონირებენ ჩვეულებრივი მოდულაციები. უფრო მეტიც, სისტემის განზომილების ზრდასთან ერთად, NN-ში რეალიზებული სისტემა აჭარბებს კვადრატული ამპლიტუდური მოდულაციის (QAM) სისტემას, რადგან ტრენინგის დროს უკვე შესწავლილ იქნა გადაცემულ სიმბოლოებს შორის კორელაცია. სინამდვილეში, NN-ის მიერ შესწავლილი გამომავალ სიმბოლოებს შორის კორელაცია მსგავსია არხის კოდირებისა, რომლის დროსაც გამოიყენება სიტყვები პატარა სიგრძეებით.

ნახ. 7.3-ზე ნაჩვენები გადამცემი არქიტექტურის საფუძველზე, სპეციფიკური SNR-ებისთვის, ჩვენ შეგვიძლია მოვახდინოთ სასიგნალო კონსტელაციების ზომებისა და ნიმუშების ერთობლივი ოპტიმიზაცია, რაც ხელს შეუწყობს ლინკის ადაპტაციისას შეცდომის ალბათობასა და სპექტრულ ეფექტურობას შორის უკეთესი კომპრომისის მიღწევას. კერძოდ, სპეციფიკური SNR-ის გათვალისწინებით, ჩვენ შეგვიძლია ტრენინგი ჩავუტაროთ ტრანსივერებს, სხვადასხვა ზომების სიგნალური კონსტელაციების შემუშავებასთან დაკავშირებით (მაგალითად, შემავალი შეტყობინების ტიპებით), რის შედეგადაც მივიღებთ ოპტიმიზებული სიგნალური კონსტელაციების ნიმუშებს. გასათვალისწინებელია, რომ NN-ში რეალიზებადი ტრანსივერის სიგნალური კონსტელაციის განზომილება შეიძლება იყოს ნებისმიერი მთელი რიცხვი და ის არ არის შეზღუდული ორის ხარისხით. ამის შემდეგ კანდიდატებს შორის შეიძლება შეირჩეს შესაფერისი ზომა და შესაბამისი ნიმუში, რათა

მაქსიმალურად გაიზარდოს მიზნობრივი ფუნქციები, შეცდომის ალბათობაზე შეზღუდვის დაკმაყოფილებისას.

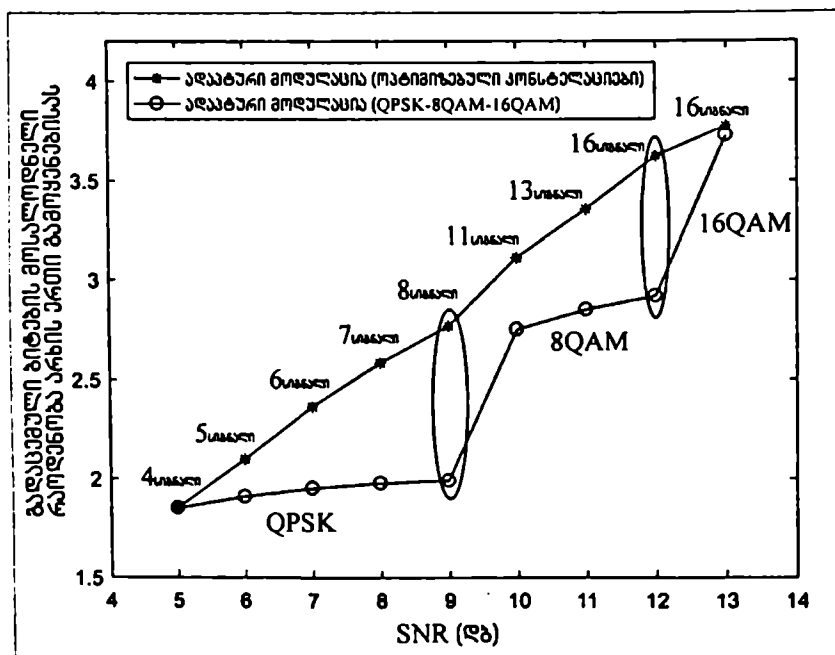
ნახ. 7.5 გვიჩვენებს სიგნალური კონსტელაციის ზომებისა და ნიმუშების ერთობლივი ოპტიმიზაციის მაგალითს. ამ შემთხვევაში, არჩეულია საუკეთესო კონსტელაცია გადაცემული ბიტების მოსალოდნელი რაოდენობის მაქსიმალურად გასაზრდელად, როდესაც შეცდომის ალბათობა ზღვრულის 10^{-1} კვემოთაა, ხოლო სიგნალების კონსტელაციის მაქსიმალური ზომა უდრის 16-ს. გადაცემული ბიტების მოსალოდნელი რაოდენობა განისაზღვრება, როგორც მოცემული SNR-სთვის შეცდომის ალბათობის ნამრავლი გადაცემული ბიტების რაოდენობაზე (მაგალითად, $\log_2 M$ -ზე), სადაც M კონსტელაციის ზომა ანუ სიგნალების რაოდენობაა. საბაზისო სქემაში გამოყენებულია ადაპტური მოდულაცია, მათ შორის QPSK, 8QAM და 16QAM. ნახ. 7.6-დან ჩანს, რომ AI მიდგომებით ოპტიმიზებული კონსტელაციებისათვის ადაპტური მოდულაციის სისტემა ზოგადად ჯობნის ჩვეულებრივ სისტემას, რადგან კონსტელაციის ზომების მეტი არჩევანია მხარდაჭერილი. რაც უფრო მნიშვნელოვანია, ჩვენ ვხვდებით, რომ 8 (16) სიგნალის შემცველი AI-ით ოპტიმიზებული კონსტელაცია მიღებულია 9 (12) დეციბელ SNR-ზე, როგორც ეს ჩანს ნახ. 7.6-დან, ხოლო, ამის საპირისპიროდ, QPSK (8QAM) ჯერ კიდევ არჩეულია კავშირის ლინკის იგივე მახასიათებლით. ეს მოვლენა მიაჩნია, რომ AI მეთოდებით შემუშავებულ კონსტელაციებს უკეთესი შეცდომის ალბათობის მაჩვენებლის მიღწევა შეუძლიათ, ვიდრე ჩვეულებრივ, იგივე ზომების, QAM კონსტელაციებს, განსაკუთრებით მათი შედარებით დიდი ზომების რეგიონებში (მაგალითად, 8 ან 16 სიგნალი).



ნახ. 7.5. სიგნალური კონსტელაციების ოპტიმიზებული ნიმუშები

აღსანიშნავია, რომ ღრმა სწავლების ტექნიკა ასევე შეიძლება გამოყენებულ იქნას PHY ფენის სხვა ფუნქციების გასაუმჯობესებლად. მაგალითად, შესწავლილი იქნა ღრმა სწავლების ტექნიკის გამოყენება არხების კოდირების დიზაინში, სადაც NN შემუშავდა კლასიკური ტურბო კოდების „ტურბოს პრინციპის“ საფუძველზე. დადგინდა, რომ ტურბო ავტოკოდირება, სხვადასხვა ტიპის საკომუნიკაციო არხებში აღწევს გამტარუნარიანობას მცირე სიგრძის კოდური სიტყვების გამოყენების შემთხვევაში და, შესაბამისად, გვაძლევს კოდების კლასს ისეთი არხებისათვის, რომელთა წარმოდგენაც ჩაკეტილი ფორმით არ არსებობს. ამგვარად, ტურბო ავტოკოდერი ხსნის კვლევის საინტერესო მიმართულებას არხების კოდირების ალგორითმების შესაქმნელად, კოდირებისა და დეკოდერის თანაპროექტირების გზით. გარდა ამისა, ღრმა სწავ-

ლებამ აჩვენა მნიშვნელოვანი პოტენციალი MIMO სიგნალის დამუშავების პროცესში. ლიტერატურაში შემოთავაზებულია კონვოლუციური ნეირონული ქსელების (Convolutional Neural Networks, CNNs) გამოყენება, რათა შესწავლილ იქნას არხების კორელაციები სივრცით, დროით და სიხშირის დომენებში, შეფასების სიზუსტის გასაუმჯობესებლად და ზედმეტი ზედნადები სასიგნალო ხარჯების შემცირების მიზნით. უნდა აღინიშნოს, რომ განსხვავებით ავტოკოდირებაზე დაფუძნებული ტრანსივერების შემუშავებასთან დაკავშირებული საკითხებისაგან, ამ პარაგრაფში წარმოდგენილი კვლევები ძირითადად კონცენტრირებულია სპეციფიკური საეთერო ინტერფეისის ფუნქციის გაუმჯობესებაზე, რომელიც უფრო თავსებადია ტრადიციულ მოდული-მოდულის-შემდგომ (Module-by-Module) სტრუქტურასთან.



ნახ. 7.6. არხის გამოყენებისას გადაცემული ბიტების მოსალოდნელი რაოდენობების შედარება

ზემოხსენებულ მსჯელობებში ჩვენი პირველი საზრუნავი ის არის, შეუძლია თუ არა AI-ით მხარდაჭერილ PHY ფენის გადაწყვეტილებას გააუმჯობესოს გადაცემის მახასიათებელი (ანუ ბლოკზე შეცდომის ალბათობა). იმავდროულად, აუცილებელია, ასევე ყურადღება მივაქციოთ მახასიათებლების სხვა ინდიკატორებს, როგორიცაა მაგალითად, დამუშავებისას შეფერხება, რომელიც გადამწყვეტ როლს ასრულებს ულტრა საიმედო და დაბალი შეყოვნების კომუნიკაციის (URLLC) სცენარებში. ვინაიდან NN სტრუქტურა ბუნებრივად შესაფერისია პარალელური გამოთვლებისათვის, არსებობს შრომები, რომლებიც განიხილავენ მის პოტენციურ უპირატესობას დაბალი შეყოვნების კომუნიკაციაში. ამისდა მიუხედავად, დამატებული დასკვნები ამ საკითხზე უნდა გაკეთდეს სავსე კვლევების შედეგების საფუძველზე. ამ ღია კითხვებზე პასუხის გასაცემად საჭიროა მეტი სამომავლო ძალისხმევა როგორც აკადემიური წრეების, ასევე ინდუსტრიის მხრიდან.

7.4.2. გავლენა სტანდარტიზაციაზე

მოსალოდნელია, რომ ახალი ფუნქციები, რომლებიც შემოაქვს AI-ით მხარდაჭერილ PHY ფენის დიზაინს, მნიშვნელოვან გავლენას მოახდენენ სამომავლო სტანდარტიზაციაზე. უპირველეს ყოვლისა, ვინაიდან მრავალი ფუნქციური მოდულის შერწყმა შესაძლებელია AI-ის საშუალებით, რთული შიდა ინტერფეისები მნიშვნელოვნად გამარტივდება. მეორეს მხრივ, ვინაიდან PHY ფენის ძირითადი ფუნქციების განხორციელება შესაძლებელია AI მიდგომებით და ოპტიმიზებულია თვითსწავლების მეთოდით, ადამიანის მიერ გაწეული ძალისხმევა ძირითადად ფოკუსირდება ზოგადი სტრუქტურების დიზაინზე. გარდა ამისა, AI-ის საშუალებით PHY ფენის დიზაინი მკაცრად განაპირობებს საერთო ტექნიკური აღჭურვილობის გამოყენებას, რომელსაც შეუძლია განახორციელოს სხვადასხვა ფუნქციები/ალგორითმები მსგავსი არქი-

ტექტურის მოწყობილობებით. ზოგადი ტექნიკის გამოყენება უზრუნველყოფს დიდ კომფორტს უსადენო ქსელის განახლებაში, რაც ხელს უწყობს ქსელის განთავსების და ტექნიკური ხარჯების შემცირებას. გასათვალისწინებელია ის გარემოებაც, რომ მსგავს ტენდენციებს აქვთ ადგილი დღეისათვის რეალიზაციის პროცესში მყოფ 5G ქსელებში, სადაც ქსელის ფუნქციების ვირტუალიზაცია (Network Function Virtualization, NFV) დაინერგა ქსელის ძირითადი ფუნქციების და აპარატურული უზრუნველყოფის გაყოფისათვის, ქსელის განახლებისა და ტექნიკური მომსახურების ხარჯების დაზოგვის მიზნით.

ამასთან, მხოლოდ AI-ზე დაფუძნებული კომუნიკაციებისათვის რთულია ოპერირება პრაქტიკულ უსადენო გარემოში. მაგალითად, AI-სთვის რთულია ისწავლოს კომუნიკაცია არხებში მრავალგზიანი გავრცელებით, რაც უსადენო კომუნიკაციებისთვის ფართოდ გავრცელებული პრობლემაა. ბოლო რამდენიმე ათწლეულის განმავლობაში, საექსპერტო ჯგუფებმა კარგად შეისწავლეს ეს საკითხები. ამიტომ, PHY ფენის დიზაინისთვის შეიძლება საჭირო გახდეს ადამიანის ინტელექტის (HI) და AI-ის ინტეგრაცია. მაგალითად, ფრეიმის ძირითადი სტრუქტურა, აპლინკისა და დაუნლინკის სიგნალები, რეფერენსული სიგნალები, გაზომვის ანგარიშის მექანიზმი, ფიზიკური ფენის პროცედურები და ა.შ., საჭიროა სწორად იქნას შემუშავებული HI-ს მიერ. ამიტომ, მიუხედავად იმისა, რომ ჩვენ მიგვაჩნია, რომ AI უზარმაზარ ან თუნდაც გადამწყვეტ გავლენას მოახდენს PHY ფენის სტანდარტიზაციაზე, უნდა შევეგუოთ იმ გარემოებას, რომ ცვლილებები მოხდება თანდათანობით. ამ პროგრესის საწყის ეტაპზე AI იფუნქციონირებს, როგორც დამხმარე ინსტრუმენტი ან ოპტიმიზატორი, PHY ფენის გარკვეული ფუნქციების გასაუმჯობესებლად. ფიზიკური ფენის სტანდარტიზაციის დროს AI-ის ინსტრუმენტების გამოყენება შეიძლება თავდაპირველად მოხდეს ფიზიკური ფენის რესურსების მენეჯმენტში, მაგალითად, სიმძლავრის მართვისას ან სხივის მართვისას.

7.5. AI-ით მხარდაჭერილი ფენათა შორისი ოპტიმიზაცია

AI ხელს შეუწყობს ტრაფიკის ერთობლივ ოპტიმიზაციას ოპერატორებსა და ყველაზე მაღალი იერარქიის (Over-the-Top, OTT) მოთამაშეებს შორის. ამან შეიძლება არამარტო გააუმჯობესოს მომხმარებლის გამოცდილება, არამედ შექმნას ახალი ეკონომიკური ზრდა. ტრადიციული ფენათა შორისი ოპტიმიზაციისგან განსხვავებით, რომელიც უზრუნველყოფს მარტივ და ღია შესაძლებლობებს უსადენო ქსელიდან აპლიკაციებამდე, AI-ზე დაფუძნებული უფრო მაღალი ფენა გახსნის მეტ შესაძლებლობებს სადენიანი და უსადენო სამყაროებისთვის, BS-ებს და გამოყენების ფენა/სატრანსპორტო ფენას შორის ორმხრივი ურთიერთქმედების მექანიზმის საშუალებით.

ზოგადად, არსებობს ორი რეჟიმი, რომლებიც BS-ებს შეუძლიათ შეარჩიონ გამოყენებითი/სატრანსპორტო ფენისთვის სტატუსის შესახებ ინფორმაციის მიწოდებისათვის: პერიოდული რეჟიმი (მაგალითად, ყოველი 100 მლწმ) და მოვლენების ჩამრთველი რეჟიმი. მოულოდნელი მოვლენებით გამოწვეული ქსელის რყევები მნიშვნელოვან გავლენას მოახდენს მომხმარებლთან ურთიერთობაზე. მაგალითად, 5G-ს განვითარების საწყის ეტაპზე 4G და 5G ქსელები უნდა თანაარსებობდნენ. როდესაც UE 5G-დან 4G-ზე გადადის, რადიორესურსები შესაძლოა მოულოდნელად შემცირდეს 4G-ს შეზღუდული შესაძლებლობის გამო. იმის გამო, რომ გამოყენებები დროულად არ რეაგირებენ ამ ცვლილებაზე, სერვერი ან მომხმარებელი ვერ შეძლებს დროულად შესწორებების შეტანას და მომხმარებლთან ურთიერთქმედება გაუარესდება. ვინაიდან სხვადასხვა გამოყენებებს სჭირდებათ სხვადასხვა სტატუსის ინფორმაცია (მაგალითად, სიხშირის გატარების ზოლი, მიღება-გადაცემის დრო და პაკეტის დაკარგვის ალბათობა), ტრადიციულ ფენათა შორისი ოპტიმიზაციას შეუძლია მხოლოდ მარტივ და უნი-

ვერსალურ შესაძლებლობებზე წვდომა, რომლებიც არ არის მორგებული ტრაფიკის სპეციფიკურ ტიპებზე. თუ ერთდროულად ბრმად გაიხსნება რიგი უსადენო შესაძლებლობები, ეს გაზრდის BS-ს დატვირთვას, რაც გამოიწვევს რესურსების გაფლანგვას ან გამოყენების ფენის დონეზე გარკვეულ დაბნეულობას. AI ფუნქციაზე დაყრდნობით, BS-ს შეუძლია გახსნას სხვადასხვა შესაძლებლობები მოთხოვნის მიხედვით და დროის მიხედვით, სატრანსპორტო ფენის სხვადასხვა რეალიზაციისათვის, რომელსაც შეუძლია პირდაპირ ამ ინფორმაციის საფუძველზე შეასრულოს ტრაფიკისა და სიჩქარის რეგულირება.

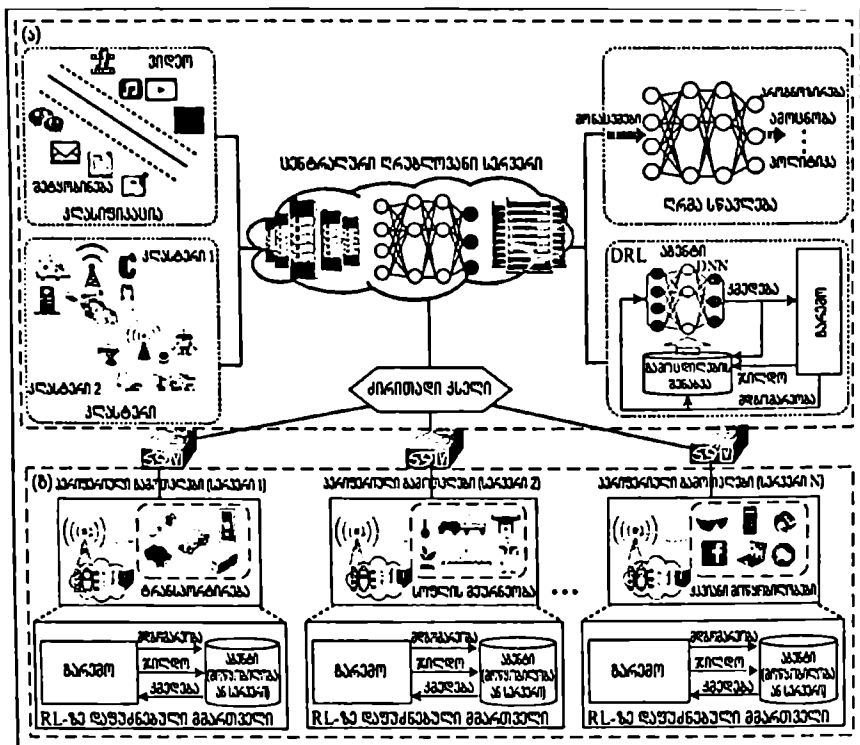
გამოყენების ფენას შეუძლია ტრაფიკის მახასიათებლების შესახებ ინფორმაციის მიწოდება BS-ებისთვის. შემდეგ, RAN-ის AI მოდულს შეუძლია შეგროვებული მონაცემების გამოყენება ტრაფიკის მოდელირების (მაგალითად, უსადენო QoE მოდელირების) ჩასატარებლად. QoE მოდელი პირდაპირ იმოქმედებს უფრო მაღალი ბრტყელი ფენის ოპციურ მახასიათებლებზე, რაც საშუალებას მოგვცემს განვახორციელოთ ოპციური მახასიათებლების და პროტოკოლის სტეკის შესაბამისი ოპერაციების სხვადასხვა კომბინაციები. საეთერო ინტერფეისის ოპტიმიზაცია შესაძლებელია AI მოდულის მიერ მიღებული გამოყენების ფენის ინფორმაციის დროის რეალურ მასშტაბში შეყვანით QoE მოდელში. AI მოდულმა სრულად უნდა დაადგინოს, არსებობს თუ არა რესურსი გამოყენებების მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად და შესაფერისია თუ არა ის მისი დაგეგმვის პრიორიტეტის შესაცვლელად. ამავე დროს, AI მოდულს შეუძლია გამოიყენოს მრავალმომხმარებელიანი QoE მოდელი, რათა დადგინდეს, საჭიროა თუ არა ქსელის გაფართოება და დატვირთვის დაბალანსების მონიტორინგი.

7.6. ხელოვნური ინტელექტის მეთოდები 6G ქსელებისათვის

ამ პარაგრაფში ჩვენ დეტალურად განვიხილავთ, თუ როგორ უზრუნველყოფენ AI ტექნოლოგიები 6G ქსელებს AI-ით მხარდაჭერილი მობილური პერიფერიული გამოთვლების, ინტელექტუალური მობილურობის და ჰენდოვერის მართვის და, ასევე, სიხშირული სპექტრის ჰკვიანურად მართვის შესაძლებლობებით.

7.6.1. AI-ით მხარდაჭერილი მობილური პერიფერიული გამოთვლები

მობილური პერიფერიული გამოთვლები (Mobile Edge Computing, MEC), მნიშვნელოვანი ტექნოლოგია იქნება განვითარებადი 6G ქსელისთვის, სადაც MEC-ს შეუძლია უზრუნველყოს კომპიუტერული, მენეჯმენტისა და ანალიტიკური საშუალებები RAN-ის ან SDN-ის შიგნით სხვადასხვა მოწყობილობებთან უშუალო სიახლოვეში. MEC ქსელებში გადაწყვეტილების მიღების ოპტიმიზაცია, ცოდნის აღმოჩენა და ნიმუშის სწავლება დახვეწილია მრავალგანზომილებიანი, შემთხვევით წარმომოხილი გაურკვევლობის და დინამიური მახასიათებლების გამო. ამრიგად, ტრადიციულ ალგორითმებს (მაგალითად, ლაგრანჟის ორადობას) შეიძლება ჰქონდეთ შეზღუდვა ასეთ რთულ ქსელებში. AI ტექნიკას შეუძლია შეგროვილი მონაცემებიდან ამოიღოს ღირებული ინფორმაცია, შეისწავლოს და მხარი დაუჭიროს სხვადასხვა ფუნქციებს MEC-ში ოპტიმიზაციის, პროგნოზირების და გადაწყვეტილების მისაღებად. ნახ. 7.7 გვიჩვენებს AI-ით მხარდაჭერილ მობილური პერიფერიული გამოთვლების სტრუქტურულ სქემას, რომელიც შედგება ცენტრალური ღრუბლოვანი და პერიფერიული გამოთვლებისგან.



ნახ. 7.7. AI-ით მხარდაჭერილი MEC-ის სტრუქტურა

პერიფერიულ გამოთვლელ სერვერებში, შეზღუდული შესაძლებლობის გამო, შემსუბუქებული AI ალგორითმები შეიძლება გამოყენებულ იქნას პერიფერიული სცენარების ჭკვიანი პროგრამებისთვის (მაგალითად, ტრანსპორტირება და სოფლის მეურნეობა), როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 7.7ბ-ზე. მაგალითად, RL-ზე დაფუძნებული MEC რესურსების მენეჯმენტი არის მოდელისგან თავისუფალი სქემა, რომელსაც არ სჭირდება ისტორიული ცოდნა და ის შეიძლება გამოყენებულ იქნას გარემოს დინამიკის შესასწავლად და დროის რეალურ მასშტაბში, შესაბამისი მმართველი გადაწყვეტილებების მისაღებად. RL სტრუქტურაში, თითოეულ ეტაპზე, მდგომარეობის შესახებ ინფორმაციის მოპოვე-

ბის შემდეგ (მაგალითად, მოწყობილობის მობილურობა, მოთხოვნების დინამიკა და რესურსების მდგომარეობა), გარემოში ურთიერთქმედების შედეგად, რესურსების მართვის შესაძლო გადაწყვეტილებები (მაგალითად, ენერგიის მართვა, რესურსების განაწილება და ამოცანების დაგეგმვა), განთავსებულია შესაძლო მოქმედებათა ნაკრებში. თითოეული RL აგენტი (მაგალითად, მოწყობილობა ან სერვისცენტრი) ირჩევს საუკეთესო მოქმედებას, შესაძლო მოქმედებათა ნაკრებიდან ან ირჩევს ერთ მოქმედებას შემთხვევით საკუთარი ჯილდოს მაქსიმალურად გაზრდის მიზნით, სადაც ჯილდო შეიძლება განისაზღვროს მონაცემთა გადაცემის სიჩქარით, შეყოვნებით, საიმედოობით და ა.შ.

ცენტრალურ ღრუბლოვან სერვერში, რადგან მას აქვს გამოთვლის მძლავრი შესაძლებლობა, შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას კომპლექსური ცენტრალიზებული მასშტაბური AI ალგორითმები, სწავლების სხვადასხვა ფუნქციების უზრუნველსაყოფად, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 7.7ა-ზე. მაგალითად, რადგან MEC ქსელებში სერვისული პროგრამები მრავალფეროვანი და დინამიურია, AI-ზე დაფუძნებული კლასიფიკაცია შეიძლება გამოყენებულ იქნას, რათა ეფექტურად შემუშავდეს ტრაფიკის ნაკადის შესახებ გადაწყვეტილება სხვადასხვა მომსახურების მახასიათებლებისთვის. გარდა ამისა, MEC სერვერების ასოციაცია შეიძლება მიღებულ იქნას AI-ზე დაფუძნებული კლასტერით, რაც უფრო ეფექტური იქნება ფუნქციონირების კუთხით. ცენტრალურმა ღრუბლოვანმა სერვერმა შეიძლება მიიღოს მასიური მონაცემები პერიფერიული გამოთვლითი სერვერებიდან და აუცილებელია ამ მონაცემთა ტრენინგი ფუნქციების ავტომატური ამოღებისა და ცოდნის აღმოჩენის მიზნით. ამ შემთხვევაში შეიძლება გამოყენებული იქნას ღრმა სწავლება, რათა განხორციელდეს გამოთვლითი მოდელების ტრენინგი, რომ მივაღწიოთ სერვისის ამოცნობას, ტრაფიკისა და ქცევის პროგნოზირებას, უსაფრთხოების გამოვლენას და ა.შ. უფრო მეტიც, რთულ და დინამიურ MEC ქსელებში რესურსების მართვის გადაწყვეტილუ-

ბებსა და ფიზიკურ გარემოზე ზემოქმედებას შორის ასახვა ადვილი არ არის განსაზღვრულ იქნას ანალიზურად. ღრმა და განმტკიცებული სწავლება (Deep and Reinforcement Learning, DRL) აერთიანებს ორ სწავლებას, რათა სწავლება მოხდეს საკუთარი გამოცდილების მიხედვით. ის შეიძლება გამოყენებულ იქნას რესურსების მართვის ოპტიმალური პოლიტიკის მოსაძიებლად მაღალგანზომილებიანი სივრცითი დავიზების პირობებში. გამოცდილების აღქმა ასევე რეალიზებულია DRL-ში, რათა გამოყენებული იქნას ისტორიული ცოდნა სწავლების ეფექტურობისა და სიზუსტის გასაუმჯობესებლად, რაც თავის მხრივ საშუალებას აძლევს MEC-ს მხარი დაუჭიროს მაღალხარისხიან მომსახურებას პერიფერიული მოწყობილობებისთვის.

7.6.2. ინტელექტუალური მობილურობა და ჰენდოვერის მართვა

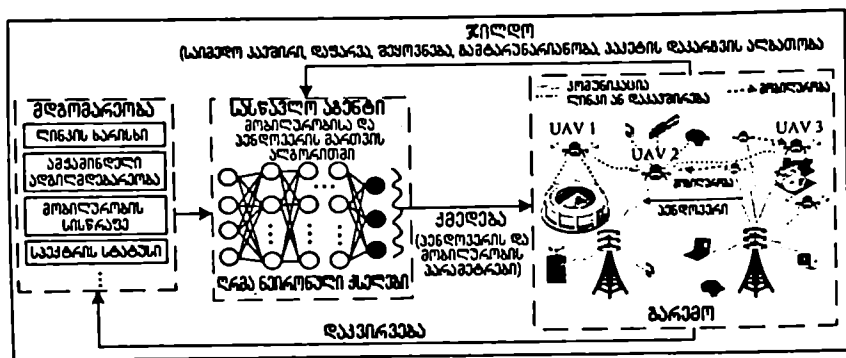
მობილურობა და ჰენდოვერის მართვა, ალბათ, 6G ქსელის ორი ყველაზე რთულად გადასაჭრელი საკითხია, რადგან 6G ქსელი იქნება მაღალდინამიური, მრავალშრიანი და მრავალგანზომილებიანი, რასაც მივყავართ ხშირ ჰენდოვერებამდე. AI მეთოდები შეიძლება გამოყენებულ იქნას მობილურობის ინტელექტუალური პროგნოზირების მისაღწევად და ოპტიმალური ჰენდოვერის გადაწყვეტილებების მისაღწევად, რაც უზრუნველყოფს ეფექტურ კომუნიკაციას.

მაგალითად, უპილოტო საფრენი აპარატების (Unmanned Aerial Vehicles, UAVs) კომუნიკაციები ინტეგრირდება 6G ქსელში, ხოლო UAV-ების მაღალსიჩქარიანმა მობილურობამ შეიძლება გამოიწვიოს ჰენდოვერის ხშირი გამოყენება. გარდა ამისა, მომსახურების მრავალფეროვანი მოთხოვნები მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარის, მაღალი საიმედოობისა და დაბალი შეყოვნების თვალსაზრისით, ზრდის სირთულეს ჰენდოვერის ეფექტურად გამოყენების პროცესში. ამავე

დროს, მოწყობილობებისა და UAV-ების მაღალი მობილურობა იწვევს გაურკვევლობას მათი ადგილმდებარეობის შესახებ. DRL-ს შეუძლია გადაჭრას გადაწყვეტილების მიღების რთული ამოცანები, რომლებიც შეისწავლიან დროის რეალურ მასშტაბში ჰენდოვერის სტრატეგიების ოპტიმიზაციას, მოწყობილობების ან UAV-ების დინამიური, დროზე დამოკიდებული მობილურობის ქცევების დემონსტრირებით ონლაინ რეჟიმში და, ამავე დროს, იგი ახდენს გადაცემის შეყოვნების მინიმიზირებას და იძლევა საიმედო უსადენო კავშირის გარანტიას. ნახ. 7.8 გვიჩვენებს მობილურობისა და ჰენდოვერის ინტელექტუალური მართვის კონტექსტს, რომელიც დაფუძნებულია DRL-ზე UAV-ით მხარდაჭერილი ქსელებისთვის, სადაც თითოეული UAV შეიძლება ჩაითვალოს სასწავლო აგენტად, რათა ისწავლოს მართვის პოლიტიკა მის გარემოსთან ურთიერთქმედების გზით. თითოეული აგენტი განსაზღვრავს გარემოს მდგომარეობას (მაგალითად, ლინკის ხარისხს, ამჟამინდელ ადგილმდებარეობას და სიჩქარეს) და აღმოაჩენს ყველაზე შესაფერის ქმედებებს (მაგალითად, წარმოადგენს მობილურობისა და ჰენდოვერის პარამეტრებს) უდიდესი ჯილდოს მისაღებად, სადაც ჯილდოს განსაზღვრავს კომუნიკაციის ხარისხი, შეყოვნება, გამტარუნარიანობა და ა.შ. DRL ჩარჩოში UAV-ს შეუძლია ისწავლოს, თუ როგორ გადაადგილდეს და განახორციელოს ჰენდოვერი ავტომატურად და საიმედოდ, როგორ შეამციროს შეყოვნება და ჰენდოვერის მტყუნების ალბათობა, დაბოლოს, როგორ უზრუნველყოს უკეთესი მომსახურებები მიწისზედა მოწყობილობებისთვის.

6G ქსელებმა უნდა დააკმაყოფილონ ფართომასშტაბიან სატრანსპორტო ქსელებში სატრანსპორტო საშუალებებზე მაღალსიჩქარიანი მობილურობისა და შეფერხებისადმი მგრძნობიარე მოთხოვნები, ამიტომ, მობილურობის ეფექტური მენეჯმენტი წარმოადგენს საკვანძო შეფასებას საკომუნიკაციო კომუნიკაციების საიმედოობის, უწყვეტობისა და დაბალი შეყოვნების მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად. ღირმა

სწავლების მეთოდებზე დაფუძნებული მობილურობის პროგნოზირების მენეჯმენტით და Q-სწავლების გამოყენებით ჰენდოვერის პარამეტრების ოპტიმიზაციით შესაძლებელია შესწავლილ იქნას მაღალსიჩქარიანი სატრანსპორტო საშუალებების მომხმარებლების მობილურობის ნიმუშები, რამაც შეიძლება ეფექტურად აგვაცილოს თავიდან ხშირი ჰენდოვერები, ჰენდოვერების ჩავარდნა ან მტყუნება დაკავშირების დროს. გარდა ამისა, ღრმა სწავლების კონკრეტული ალგორითმები ასევე არიან ძლიერი AI ინსტრუმენტები ჰენდოვერის პრობლემების გადასაჭრელად, რადგან ისინი იყენებენ სატრანსპორტო საშუალებების როგორც წინა, ასევე სამომავლო მობილურობის კონტექსტს, დროზე დამოკიდებული მოძრაობის მომავალი მდგომარეობების თანმიმდევრობის შესასწავლად და პროგნოზირებენ სატრანსპორტო საშუალებების ტრაექტორიებს. ეს შესაძლებლობას იძლევა მოვახდინოთ ჰენდოვერის პარამეტრების ოპტიმიზაცია, რათა თავიდან იქნას აცილებული ხშირი ჰენდოვერები.



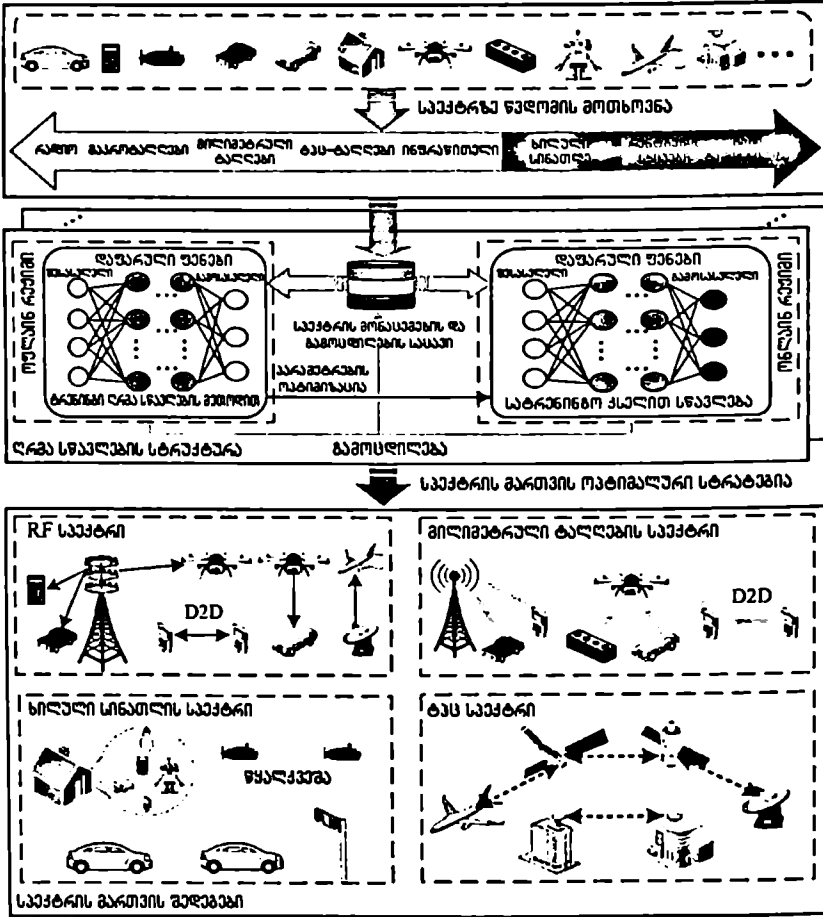
ნახ. 7.8. DRL - მობილურობისა და ჰენდოვერის მართვის კონტექსტში. შენიშვნა: მობილურობის და ჰენდოვერის პარამეტრები მოიცავენ BS-ების გაერთიანებას, სპექტრზე წვდომას და ტრაექტორიას

7.6.3. სპექტრის ინტელექტუალური მართვა

6G ქსელები იყენებენ სიხშირული სპექტრის სხვადასხვა ზოლებს (მაგალითად, დაბალი დიაპაზონის რადიოსიხშირეებს, მილიმეტრული ტალღების დიაპაზონს, ტერაჰერცულ სიხშირულ დიაპაზონს და ხილულ სინათლის სპექტრს) მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარეების უზრუნველსაყოფად, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 7.9-ზე. როდესაც 6G ქსელში ჩართულია უამრავი მოწყობილობა, რომლებიც ითხოვენ სპექტრის მინიჭებას, AI-ის დახმარებით სპექტრის მართვას შეუძლია ინტელექტუალურად მხარი დაუჭიროს მასიურ კავშირებს და მრავალფეროვან სერვისებს. AI-ით მხარდაჭერილი სწავლების სტრუქტურა ზღუდავს და იყენებს სამი ტიპის ფენას: შესასვლელ ფენას, დაფარულ ანუ ტრენინგის ფენას და გამოსასვლელ ფენას. სტრუქტურის პირველ მოდულებს შეჰყავთ სპექტრის მონაცემთა მასიური ნაკრებები სხვადასხვა რადიოკონტექსტში. შემდეგ ეს სტრუქტურა ასწავლის დაფარულ ფენებს, სპექტრის მიმდინარე ან წინა გამოყენების ინფორმაციის მახასიათებლების სრულყოფილად გაანალიზებით, და აღმოაჩენს სპექტრის გამოყენების მნიშვნელოვან მახასიათებლებს. დაბოლოს, სპექტრის მართვის ყველაზე შესაფერისი სტრატეგიები მოცემულია გამომავალ ფენაში დროის რეალურ მასშტაბში, რათა ხელი შეუწყოს მოწყობილობების მასიურ დაკავშირებას.

სასწავლო სტრუქტურა ასევე ზღუდავს ავტონომიური სწავლების მოდელს, რომ უკვე ნასწავლმა მოდელებმა (რომლებმაც გაიარეს შესაბამისი ტრენინგი) წარსული გამოცდილება და შემუშავებული წესები შეინახონ ონლაინ რეჟიმში, სპექტრის მართვის გადაწყვეტილებების შეუფერხებლად განხორციელების მიზნით. AI ტექნიკის დახმარებით, სპექტრის სხვადასხვა ზოლები შეიძლება ჰკვიანურად იქნას გამოყენებული სხვადასხვა ტიპის ტრაფიკის გადასაცემად მრავალფეროვანი მომსახურების მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად; მაგალითად, ხი-

ლული სინათლის სპექტრისა და ტერაჰერცული სიხშირული ზოლები გამოყენება შესაძლებელია მაღალი გამტარუნარიანობის უზრუნველსაყოფად, ფართო სიხშირის გატარების ზოლით, ხოლო შედარებით დაბალი სიხშირული ზოლები შეიძლება გამოყენებულ იქნას მოკლე შეტყობინებების გადასაცემად თანამგზავრიდან დედამიწაზე.



ნახ. 7.9. ღრმა სწავლებაზე დაფუძნებული სპექტრის მართვის მოქნილი სტრუქტურა

7.7. მეშვიდე თავის დასკვნები

მოსალოდნელია, რომ მობილური კომუნიკაციის მუდმივად მზარდი მოთხოვნების ეკონომიკური კუთხით დასაკმაყოფილებლად, უსადენო ქსელის ინფრასტრუქტურის ზოგადი დანიშნულების აპარატურა AI-ით მხარდაჭერილი საკომუნიკაციო პროტოკოლით, სიგნალიზაციით და მონაცემთა დამუშავებით, საბოლოო ჯამში მიგვიყვანს საეთერო ინტერფეისის სტანდარტიზაციის პარადიგმის ცვლილებამდე. ფიზიკური და უფრო მაღალი ფენის სტანდარტიზაციის მიმართ ტრადიციული ინტენსიური ძალისხმევა შეიძლება მნიშვნელოვნად შემსუბუქდეს და კომუნიკაციური საზოგადოება შეიძლება 6G-დან პირდაპირ მოხვდეს AI-ის ეპოქაში. მეშვიდე თავის ბოლოს, ჩვენ წარმოვადგინეთ, 6G ქსელების განთავსებისა და მართვის სხვადასხვა ასპექტებთან დაკავშირებული, AI-ით მხარდაჭერილი, ჩვენის აზრით მნიშვნელოვანი მეთოდები, რომლებიც მოიცავენ მობილურ პერიფერიულ გამოთვლებს, ინტელექტუალურ მობილურობასა და ჰენდოვერის მართვას და სპექტრის ჰიერარქიულ მენეჯმენტს.

მეშვიდე თავში გამოყენებული ლიტერატურა

- J. Andrews *et al.*, "What Will 5G Be?" *IEEE JSAC*, vol. 32, no. 6, June 2014, pp. 1065-82.
- S. Cammerer *et al.*, "Trainable Communication Systems: Concepts and Prototype," arXiv, preprint arXiv:1911.13055, 2020.
- B. Cao *et al.*, "Intelligent Offloading in Multi-Access Edge Computing: A State-of-the-Art Review and Framework", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 3, Mar. 2019, pp. 56-62.

- U. Challita *et al.*, "Proactive Resource Management for LTE in Unlicensed Spectrum: A Deep Learning Perspective", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 7, Jul. 2018, pp. 4674-89.
- K.-C. Chen *et al.*, "Communication Theoretic Data Analytics", *IEEE JSAC*, vol. 33, no. 4, Apr. 2015, pp. 663-75.
- P. Dong *et al.*, "Deep CNN-Based Channel Estimation for mmWave Massive MIMO Systems", *IEEE J. Sel. Topics Signal Processing*, vol. 13, no. 5, Sept. 2019, pp. 989-1000.
- S. Dorner *et al.*, "Deep Learning Based Communication Over the Air", *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 12, no. 1, Feb. 2018, pp. 132-43.
- S. Han *et al.*, "Artificial-Intelligence-Enabled Air Interface for 6G: Solutions, Challenges, and Standardization Impacts", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 10, Oct. 2020, pp. 73-79.
- C. Jiang *et al.*, "Machine Learning Paradigms for Next-Generation Wireless Networks", *IEEE Wireless Commun.*, vol. 24, no. 2, Apr. 2017, pp. 98-105.
- Y. Jiang *et al.*, "Turbo Autoencoder: Deep Learning Based Channel Codes for Point-to-Point Communication Channels", arXiv preprint arXiv:1911.03038, 2019.
- N. Kato *et al.*, "Optimizing Space-Air-Ground Integrated Networks by Artificial Intelligence", *IEEE Wireless Commun.*, vol. 26, no. 4, Aug. 2019, pp. 140-47.
- K. B. Letaief *et al.*, "The Roadmap to 6G: AI Empowered Wireless Networks", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 57, no. 8, Aug. 2019, pp. 84-90.

- C. H. Liu *et al.*, "Energy-Efficient UAV Control for Effective and Fair Communication Coverage: A Deep Reinforcement Learning Approach", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 36, no. 9, Sep. 2018, pp. 2059-70.
- G. Liu *et al.*, "Vision, Requirements and Network Architecture of 6G Mobile Network Beyond 2030", *IEEE/CIC China Commun.*, *IEEE/CIC China Commun.*, vol. 17, no. 9, Sept. 2020, pp. 92-104.
- X. Lin *et al.*, "A Tutorial on Cross-Layer Optimization in Wireless Networks", *IEEE JSAC*, vol. 24, no. 8, Aug. 2006, pp. 1452-63.
- A. Nassar *et al.*, "Reinforcement Learning for Adaptive Resource Allocation in Fog RAN for IoT With Heterogeneous Latency Requirements", *IEEE Access*, vol. 7, 2019, pp. 128014-25.
- T. O'Shea *et al.*, "An Introduction to Deep Learning for the Physical Layer", *IEEE Trans. Cog. Commun. Net.*, vol. 3, no. 4, Dec. 2017, pp. 563-75.
- R. Shafin *et al.*, "Artificial Intelligence-Enabled Cellular Networks: A Critical Path to Beyond-5G and 6G", *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 2, Apr. 2020, pp. 212-17.
- Y. Sun *et al.*, "Application of Machine Learning in Wireless Networks: Key Techniques and Open Issues", *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 4, 4th qtr. 2019, pp. 3072-108.
- H. Yang *et al.*, "Intelligent Resource Management Based on Reinforcement Learning for Ultra-Reliable and Low-Latency IoV Communication Networks", *IEEE Trans. Vehic. Teh.*, vol. 68, no. 5, May 2019, pp. 4157-69.
- H. Yang *et al.*, "Artificial Intelligence-Enabled Intelligent 6G Networks", *IEEE Network*, vol. 34, no. 6, Nov./Dec. 2020, pp. 272-80.

A. Zappone *et al.*, "Wireless Networks Design in the Era of Deep Learning: Model-Based, AI-Based, or Both?" *IEEE Trans. Commun.*, vol. 67, no. 5, Oct. 2019, pp. 7331-76.

3GPP TS38.401, "Architecture Description", 3GPP NG-RAN Release 16, 2020; <http://www.3gpp.org>.

ბოლოთქმა

1926 წელს მეცნიერმა და შორსმჭვრეტელმა ნიკოლა ტესლამ თქვა: „როდესაც უსადენო კომუნიკაცია სრულყოფილად იქნება გამოყენებული, მთელი დედამიწა უზარმაზარ ტვინად გადაიქცევა ...“. 2030 წლისთვის, როგორც ინდივიდუალური, ასევე საზოგადოებრივი ფუნდამენტური მოთხოვნილებების გათვალისწინებით და ინფორმაციული და საკომუნიკაციო ტექნოლოგიების მოსალოდნელ მიღწევებზე დაყრდნობით, ტესლას წინასწარმეტყველება შეიძლება განხორციელდეს და 6G მნიშვნელოვან როლს შეასრულებს ამ წინსვლაში: ის შექმნის საკომუნიკაციო ინფრასტრუქტურას, რომელიც საშუალებას მისცემს საბოლოო მომხმარებლებს აღიქვან საკუთარი თავი, როგორც გარშემორტყმული „უზარმაზარი ხელოვნური ტვინით“ და უზრუნველყოფილი ვირტუალური ნულოვანი შეყოვნების სერვისებით, ინფორმაციის გადაცემისა და შენახვის შეუზღუდავი შესაძლებლობებით და უზარმაზარი შემეცნებითი პოტენციალით.

წინამდებარე წიგნში მოცემულია 6G-ს მიმოხილვა, რომელიც გაკეთებულია უახლეს პუბლიკაციებზე და სამეცნიერო მიღწევებზე დაყრდნობით. წარმოდგენილია მისი ახალი ფუნქციები და ტექნოლოგიები. დადასტურებულია, რომ 6G მნიშვნელოვნად გააუმჯობესებს საკომუნიკაციო ქსელების მუშაობას, უზრუნველყოფს მასში სხვადასხვა ტექნოლოგიების ინტეგრირებას და მომსახურების ხარისხის გაზრდას. ამასთან ერთად, გვინდა აღვნიშნოთ, რომ 6G-ს გამოყენების უამრავი შესაძლებლობის მიუხედავად, დღეისათვის ასევე არსებობს მრავალი გამოწვევა, დაკავშირებული ელექტრონულ კომპონენტებთან, გამოყენებულ მასალებთან, ახალი არქიტექტურის დიზაინთან და საკომუნიკაციო პროტოკოლებთან. მიგვაჩნია, რომ ამ პრობლემების გადასაჭრელად, აუცილებელია, როგორც აკადემიური მკვლევარების, ასევე ინ-

დუსტრიული საზოგადოების აქტიური საერთაშორისო თანამშრომლობა.

ჩვენ არაფერს ვიტყვით წიგნის შესაძლო ღირსებებზე, ეს არცაა ჩვენი გასაკეთებელი; აქ მხოლოდ მის ნაკლს აღვნიშნავთ, რასაც გვერდივერ ავუარეთ – ეს იყო უამრავი გადაუჭრელი ტერმინოლოგიური პრობლემა, რისი დაძლევაც ჩვენს ძალებს აღემატებოდა და ამასთან დაკავშირებით მკითხველს დიდი ბოდიში გვინდა მოვუხადოთ.

შეუძლებელია მაღლიერებით არ მოვიხსენიოთ კავკასიის უნივერსიტეტის უანგარო მხარდაჭერა. ასევე მაღლობა გვინდა გადავუხადოთ შოთა რუსთაველის ეროვნული სამეცნიერო ფონდის ხელმძღვანელობასა და თანამშრომლებს, მათი პროფესიონალიზმისა და კეთილმოსურნეობისათვის, რაც ჩვენ მნიშვნელოვნად წაგვადგა. გვინდა, ასევე მაღლობა ვუთხრათ აკადემიურ დოქტორს მამუკა ჩხაიძეს, წიგნის მომზადების პროცესში გაწეული დახმარებისათვის.

სერგო შავგულიძე, ნოდარ უღრელიძე

თბილისი, თებერვალი, 2021 წელი

აკრონიმები

AA	ყველა ანტენა
AI	ხელოვნური ინტელექტი
API	გამოყენებითი პროგრამირების ინტერფეისი
APSK	ამპლიტუდურ-ფაზური მოდულაცია
AR	გაზრდილი რეალობა
AWGN	ადიტიური თეთრი გაუსის ხმაური
BBU	საბაზისო სიხშირული ზოლის მოწყობილობა
BER	შეცდომის ალბათობა ბიტზე
BFT	მდგრადობა ბიზანტიური მტყუნებების მიმართ
BID	ბლოკჩეინის იდენტიფიკატორი
BLER	ბლოკზე შეცდომის ალბათობა
BPSK	ორობითი ფაზური მოდულაცია
BS	საბაზო სადგური
CG	კონფიგურებული გრანტი
CHNL_ID	არხის იდენტიფიკატორი
CMOS	კომპლიმენტარული მეტალოქსიდური ნახევარგამტარი
CN	ძირითადი ქსელი
CNN	კონვოლუციური ნეირონული ქსელები
CPE	საერთო ფაზური შეცდომა
CPU	ცენტრალური პროცესორის ბლოკი
CRC	სიჭარბის ციკლური შემოწმება
CSI	ინფორმაცია არხის მდგომარეობის შესახებ
CSIR	მიმღებ მხარეს ინფორმაცია არხის მდგომარეობის შესახებ

CSIT	გადამცემ მხარეს ინფორმაცია არხის მდგომარეობის შესახებ
CU	ცენტრალიზებული ბლოკი
CWND	დაგროვების ფანჯარა
DAS	სისტემები განაწილებული ანტენებით
DFT	ფურიეს დისკრეტული გარდაქმნა
DL	დაუნლინკი (ქვემოთ მიმართული არხი)
DPoS	დელეგირებული ფსონის მტკიცებულება
DRL	ღრმა და განმტკიცებული სწავლება
DSP	სიგნალების ციფრული დამუშავება
DU	გამანაწილებელი ბლოკი
D2D	მოწყობილობებს შორის (კომუნიკაცია)
EESS	დედამიწის საძიებო-თანამგზავრული მომსახურება
EH	გაფართოებული ჰემინგის (კოდი)
EIRP	ეფექტური იზოტროპულად გასხივებული სიმძლავრე
EMC	ელექტრომაგნიტური თავსებადობა
EOS	ბლოკჩეინის კრიპტოვალუტა
FDD	დუბლექსი არხების სიხშირული დაყოფით
FEC	შეცდომების პირდაპირი გასწორება
FLETA	ბლოკჩეინის პლატფორმა
GaAs	გალიუმის არსენიდი
GaN	გალიუმის ნიტრიდი
gNB	(შემდგომი) თაობის კვანძი B
HARQ	ჰიბრიდული ავტომატური რეტრანსლაციის მოთხოვნა
HBT	ჰეტეროფუნქციური ბიპოლარული ტრანზისტორი
HCS	სათაურის შემოწმებული თანმიმდევრობა
HI	ადამიანის ინტელექტი
LAB	ინტეგრირებული წვდომა და ბექჰოლი
IEEE	ელექტრო და ელექტრონიკის ინჟინრების ინსტიტუტი

IC	ინტეგრირებული წრედები
ICI	გადამტანებს შორის ინტერფერენცია
ID	იდენტიფიკატორი
IGthz	ტერაჰერცული ინტერესების ჯგუფი
InP	ინდიუმის ფოსფიდი
IoT	საგანთა ინტერნეტი
IoS	გრძნობების ინტერნეტი
IP	ინტერნეტ პროტოკოლი
IRS	ინტელექტუალური ამრეკლავი ზედაპირები
IRT	ინფრასტრუქტურული რესურსის ტოკენი
ITU	ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო კავშირი
KPI	ძირითადი მახასიათებლების ინდიკატორები
LDPC	დაბალი სიმკვრივის ლუწობაზე შემმოწმებელი (კოდი)
LED	სინათლის გამსხივებელი დიოდი
LNA	დაბალხმაურიანი გამაძლიერებელი
LoS	პირდაპირი ხედვა
LTE	გრძელვადიანი ევოლუცია
MAC	მედიუმთან წვდომის მართვა
MCS	მოდულაციისა და კოდირების სქემა
MEC	მობილური პერიფერიული გამოთვლები
MIMO	მრავალშესასვლელიანი და მრავალგამოსასვლელიანი (სისტემა)
ML	მანქანური სწავლება
MNO	მობილური ქსელის ოპერატორი
MPSK	M-ობითი ფაზური მოდულაცია
MQAM	M-ობითი კვადრატული ამპლიტუდურ-ფაზური მოდულაცია
NC	ეროვნული კრიპტოვალუტა
NF	ხმაურის კოეფიციენტი

NFV	ქსელის ფუნქციების ვირტუალიზაცია
NLoS	არაპირდაპირი ხედვა
NN	ნეირონული ქსელები
NR	ახალი რადიო
NS	ქსელის სიმულატორი
OAM	ადმინისტრირებისა და ტექნიკური მომსახურების (პლატფორმა)
OBEX	ობიექტების გაცვლის ფაილების გადაცემა
OFDM	მულტიპლექსირება ორთოგონალური სიხშირული დაყოფით
OOK	ჩართვა-გამორთვის რეჟიმი
OTT	ყველაზე მაღალი იერარქია
PA	სიმძლავრის გამამლიერებელი
PAP	წყვილოვან ქსელთან დაკავშირების პერიოდი
PB	სიმძლავრის შუქურა
PFE	პროტოკოლის ფუნქციის ელემენტი
PHY	ფიზიკური (ფენა)
PLL	ფაზური დეტექტორის ჩაკეტილი მარყუქი
PoF	ფორმულირების მტკიცებულება
PoS	ფსონის მტკიცებულება
PoW	მუშაობის მტკიცებულება
PPC	პირინგული კრიპტოვალუტა
PPRE	საპილოტე სიტყვის პრეამბულა
PRC	წყვილოვანი ქსელის კოორდინატორი
PRDEV	წყვილოვანი ქსელის მოწყობილობა
PSP	წყვილოვანი ქსელის აწყობის პერიოდი
QAM	კვადრატული ამპლიტუდურ-ფაზური მოდულაცია
QoS	გამოცდილების ხარისხის (ინდიკატორი)
QoS	მომსახურების ხარისხის (ინდიკატორი)

QPSK	კვადრატული ფაზური მოდულაცია
RAM	ოპერატიული მეხსიერება შემთხვევითი წვდომით
RAN	რადიოწვდომის ქსელი
RAS	რადიოასტრონომიული სამსახური
RF	რადიოსიხშირე
RIC	რადიოინტელექტუალური მმართველი
RRC	რადიორესურსების მართვა
RL	განმტკიცებელი სწავლება
RRH	დაშორებული რადიოსათავო მოწყობილობა
RRM	რადიორესურსების მენეჯმენტი
RRT	რადიორესურსის ტოკენი
RSRP	რეფერენსული სიგნალის მიღებული სიმძლავრე
RTD	რეზონანსული გვირაბული დიოდი
Rx	მიმღები მხარე
SA	გადართვადი ანტენა
SC	ერთი გადამტანი
SDN	პროგრამული უზრუნველყოფით განსაზღვრული ქსელი
SNR	სიგნალისა და ხმაურის თანაფარდობა
SiGe	სილიციუმის გერმანიუმი
SIFS	ფრეიმებს შორის მოკლე სივრცე
SIM	აბონენტის საიდენტიფიკაციო მოდული
SINR	სიგნალისა და ინტერფერენცია-პლუს-ხმაურის თანაფარდობა
SLA	შეთანხმება მომსახურების დონის შესახებ
SOI	სილიციუმი იზოლატორზე
SPS	ნახევრად მუდმივი დაგეგმვა
TB	სატრანსპორტო ბლოკი
TCP	გადაცემის მართვის პროტოკოლი

TDD	დუპლექსი არხების დროითი დაყოფით
TG	სამუშაო ჯგუფი
Tx	გადამცემი მხარე
UAV	უპილოტო საფრენი აპარატი
UDP	მომხმარებლის დატაგრამის პროტოკოლი
UE	მომხმარებლის მოწყობილობა
UL	აპლინკი (ზემოთ მიმართული არხი)
ULA	ერთგვაროვანი წრფივი მესერი
URLLC	ულტრა საიმედო და დაბალი შეყოვნების კომუნიკაცია
VLC	ხილული სინათლის კომუნიკაცია
VR	ვირტუალური რეალობა
WET	ენერგიის უსადენო გადაცემა
WLAN	უსადენო ლოკალური ქსელი
WRC	მსოფლიო რადიოკონფერენცია
ZE	ნულოვანი ენერგია
3GPP	მესამე თაობის პარტნიორობის პროექტი