

კომუნიკაცია დედამის დაბალი ორბიტის თანამგზავრებით

სერგო შავგულიძე

ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი,
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ნოდარ უღრელიძე

ტექნიკურ მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი,
საქართველოს უნივერსიტეტი

მამუკა ჩხაიძე

აკადემიური დოქტორი, ასოცირებული პროფესორი,
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი



საქართველოს უნივერსიტეტის
ბ ა მ ო მ ც ე მ ლ ო ბ ა

თბილისი – 2023

სერგო შავგულიძე, ნოდარ უგრელიძე, მამუკა ჩხაიძე
კომუნიკაცია დედამიწის დაბალი ორბიტის თანამგზავრებით

Sergo Shavgulidze, Nodar Ugrelidze, Mamuka Chkhaidze
COMMUNICATION WITH SATELLITES IN LOW EARTH ORBIT

წინამდებარე წიგნი წარმოგიდგენს ახალ ტექნოლოგიებს და კვლევის პერსპექტივებს LEO თანამგზავრულ საკომუნიკაციო სისტემებში, ასევე ძირითად ტექნიკურ გამოწვევებს, დაკავშირებულს LEO თანამგზავრების გლობალურ უსადენო საკომუნიკაციო პლატფორმაში ინტეგრირებასთან, რომელიც გაკეთებულია უახლეს პუბლიკაციებზე და სამეცნიერო მიღწევებზე დაყრდნობით. კერძოდ, განხილულია მომდევნო თაობის მეგათანამგზავრული ქსელების ეფექტიანი გამოყენების შესაძლებლობები თანასწორი წვდომისთვის და ამ კუთხით არსებული გამოწვევები; შესწავლილია მოდელირების ახალი ტექნიკა LEO თანამგზავრებზე დაფუძნებული ულტრა მკვრივი საკომუნიკაციო სისტემებისთვის; განხილულია ორბიტული პერიოდის განვლიდან შესაძლებლობა LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედებზე გამოთვლითი კუთხით თანასწორი წვდომისთვის; წარმოდგენილია წრიულგზიანი ქსელები, რომლებიც ახორციელებენ წვდომას ყველასათვის და რომელთა დანერგვაც შესაძლებელია შეყვანებისადმი ტოლერანტული ქსელური პროტოკოლებით და იაფფასიანი ნანო-თანამგზავრებით; განხილულია LEO თანამგზავრული წვდომის ქსელებთან დაკავშირებული LEO-SAN პერსპექტიული ტექნოლოგია, რომელიც შეაგებს ტერესტრიალურ ფიჭურ ქსელებს მომავალი 6G უსადენო ქსელებისთვის, გამტარუნარიანობისა და დაფარვის მნიშვნელოვნად გაზრდით; წარმოდგენილია მიწისქვეშა-თანამგზავრული კავშირის სისტემის არქიტექტურა და შეფასებულია მისი ტექნიკური შესაძლებლობები რეალური მეურნეობის სცენარის ვრცელი კომპიუტერული სიმულაციის მეშვეობით; წარმოდგენილია LEO თანამგზავრებზე დაფუძნებული პოზიციონირება მომავალი თანასწორი წვდომის ლოკალიზაციისთვის და ამ საკითხის ტექნიკურ-ეკონომიკური შესწავლა LEO თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედების არსებული უპირატესობებისა და გამოწვევების განხილვით; შესწავლილია კოსმოსურ-საჰაერო-სახმელეთო FSO ქსელები მაღალი გამტარუნარიანობის მქონე თანამგზავრული კომუნიკაციებისთვის; განხილულია თანამგზავრული ქსელების ფენებად დაყოფა, რომელიც ერთ-ერთი მთავარი მეთოდია ტერესტრიალურ 5G/6G ქსელებში და პრაქტიკულად არ არის შესწავლილი თანამგზავრულ სისტემებში. წიგნი წარმოგიდგენს ამ მიმართულებებით ბოლოდროინდელი მიღწევების სისტემურ განხილვას, შესაძლო გამოწვევებსა და კვლევით მიმართულებებს, რომლებიც ხელს შეუწყობს დაბალი ორბიტის თანამგზავრებით კომუნიკაციის პრობლემების გადაჭრას.

ვფიქრობთ, რომ მასალა სასარგებლო იქნება და დახმარებას გაუწევს საინფორმაციო ტექნოლოგიებისა და კომუნიკაციების დარგში მომუშავე სპეციალისტებს და აკადემიურ პერსონალს, ბაკალავრიატის მაღალი კურსის სტუდენტებს, მაგისტრანტებსა და დოქტორანტებს.

რედაქტორი — მარინა ჟღენტე

დიზაინი და დაკაბადონება — მაია ფეიქრიშვილი

© სერგო შავგულიძე, ნოდარ უგრელიძე, მამუკა ჩხაიძე, 2023.

ნაშრომი შესრულებულია საქართველოს უნივერსიტეტის მხარდაჭერითა და დაფინანსებით.

ყველა უფლება დაცულია.

დაუშვებელია ამ გამოცემის მთლიანი ან ნაწილობრივი რეპროდუცირება გამომცემლის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ISBN 978-9941-9844-8-8

სარჩევი

წინასიტყვაობა	5
თავი 1. მომდევნო თაობის მეგათანამგზავრული ქსელები თანასწორი წვდომისთვის:	
შესაძლებლობები, გამოწვევები და ეფექტიანობა	9
1.1. შესავალი	9
1.2. მეგათანავარსკვლავედების შესაძლებლობები	10
1.3. მეგათანავარსკვლავედებთან დაკავშირებული გამოწვევები	13
1.4. მეგათანავარსკვლავედების მახასიათებლები	17
1.5. კომპიუტერულ სიმულაციაზე დაფუძნებული მიდგომები	20
1.6. პირველი თავის დასკვნა	21
თავი 2. LEO თანამგზავრებზე დაფუძნებული ულტრა მკვრივი საკომუნიკაციო სისტემები:	
მოდელირების ახალი ტექნიკა	22
2.1. შესავალი	22
2.2. LEO თანამგზავრული სისტემის უპირატესობები და გამოწვევები	22
2.3. SG-ზე დაფუძნებული ანალიზური ჩარჩო	24
2.4. არხის მოდელი	25
2.5. SG-ზე დაფუძნებული კომპიუტერული სიმულაციის დაყენება	29
2.6. გამოწვევები და მომავლის სცენარები	32
2.7. მეორე თავის დასკვნა	33
თავი 3. ორბიტული პერიფერიის განტვირთვა LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედებზე	
გამოთვლითი კუთხით თანასწორი წვდომისთვის	34
3.1. შესავალი	34
3.2. პერიფერია-ღრუბელი პროცესების უწყვეტობა და ორბიტული პერიფერიული გამოთვლების შესაძლებლობები	35
3.3. საცნობარო სცენარი	36
3.4. განტვირთვის სტრატეგია და მახასიათებლების შეფასება	38
3.5. მესამე თავის დასკვნა და არსებული გამოწვევები	41
თავი 4. წრიულგზიანი ქსელები: წვდომა ყველასათვის	42
4.1. შესავალი	42
4.2. CubSat-ები LEO-ში და შეყვანების მიმართ ტოლერანტული ქსელები	42
4.3. წრიულგზიანი ქსელები	43
4.4. მახასიათებლების შეფასება	46
4.5. დანერგვა და ორბიტაზე მუშაობის შემოწმება	47
4.6. მომავლის პერსპექტივები და მეოთხე თავის დასკვნა	50
თავი 5. LEO თანამგზავრული წვდომის ქსელები და გზა 6G-ის მიმართულებით:	
გამოწვევები და მიდგომები	51
5.1. შესავალი	51
5.2. შემთხვევითი წვდომა LEO-SAN-ისთვის	53
5.3. სხივების მართვა LEO-SAN-ში	55
5.4. დოპლერის ეფექტის მიმართ მდგრადი გადაცემის ტექნოლოგია	59
5.5. მომავალი კვლევების პერსპექტივა 6G-ის მიმართულებით	62
5.6. მეხუთე თავის დასკვნა	63

თავი 6. მიწისქვეშა-თანამგზავრული კავშირის სისტემის არქიტექტურა და ტექნიკური შესაძლებლობები	64
6.1. შესავალი	64
6.2. ტექნიკური საფუძვლები და უახლესი განვითარება	66
6.3. UTS ქსელის არქიტექტურები	68
6.4. U-DTS LoRaWAN-ის ბაზაზე: დისტანციური მეურნეობის კონცეფციის დადასტურება	69
6.5. გამოწვევები და კვლევის შემდგომი მიმართულებები	75
6.6. მეექვსე თავის დასკვნა	76
თავი 7. LEO თანამგზავრებზე დაფუძნებული პოზიციონირება მომავალი თანასწორი წვდომის ლოკალიზაციისთვის	77
7.1. შესავალი	77
7.2. LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედები და მათი შესაძლებლობები პოზიციონირების კუთხით	78
7.3. სცენარების მაგალითი და დიზაინთან დაკავშირებული მოსაზრებები	80
7.4. თანასწორი წვდომის უწყვეტ PNT სერვისებთან დაკავშირებული შესაძლებლობები, გამოწვევები და გადაწყვეტები	84
7.5. შემავალბელი დისკუსიები და მეშვიდე თავის დასკვნა	88
თავი 8. კოსმოსურ-საჰაერო-სახმელეთო FSO ქსელები მაღალი გამტარუნარიანობის მქონე თანამგზავრული კომუნიკაციებისთვის	89
8.1. შესავალი	89
8.2. კოსმოსურ-საჰაერო-სახმელეთო FSO ქსელები	90
8.3. გაუმჯობესებული SAG-FSO ქსელი	91
8.4. ინტეგრირებული SAG-FSO ქსელი თანამგზავრული კომუნიკაციების სისტემებისთვის	94
8.5. მერვე თავის დასკვნა	97
თავი 9. თანამგზავრული ქსელების ფენებად დაყოფა: არქიტექტურა, მახასიათებლების ანალიზი და გამოწვევები	98
9.1. შესავალი	98
9.2. 6G თანამგზავრული ქსელი	99
9.3. შესაძლო თანამგზავრული VNE მეთოდები	100
9.4. ჰენდოვერის სტრატეგიები	103
9.5. მახასიათებლების ანალიზი	103
9.6. მეცხრე თავის დასკვნა	108
ბოლოთქმა	110
ლიტერატურა	111
აბრევიატურები და აკრონიმები	117

წინასიტყვაობა

ინტერნეტზე წვდომა არის ცალკეული პირებისა და ორგანიზაციების შესაძლებლობა, დაუბრკოლებლად დაუკავშირდნენ ინტერნეტს კომპიუტერებისა და სხვა მოწყობილობების გამოყენებით და, ასევე, განახორციელონ წვდომა ისეთ სერვისებზე, როგორიცაა ელექტრონული ფოსტა და მსოფლიო ქსელი (World Wide Web). კაცობრიობა იზიარებს და სრულად მხარს უჭერს ინტერნეტთან წვდომის საჭიროებას და აუცილებლობას. თუმცა, ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო კავშირის (ITU) შეფასებით, 2022 წლისთვის მსოფლიო მოსახლეობის მხოლოდ 66 პროცენტი იყო ინტერნეტით დაკავშირებული. თანამგზავრებს აქვთ გამორჩეული შესაძლებლობა დაფარონ დიდი გეოგრაფიული ტერიტორიები მინიმალური სახმელეთო ინფრასტრუქტურით, რაც მათ მიმზიდველ გადაწყვეტად აქცევს მზარდი აპლიკაციებისა და სერვისებისთვის, როგორც დამოუკიდებელი სისტემის, ან როგორც ინტეგრირებული თანამგზავრულ-სახმელეთო სისტემის სახით. გეოსტაციონარულ ორბიტაზე (GEO) მყოფი თანამგზავრები მოძრაობენ წრიულ ორბიტაზე ეკვატორულ სიბრტყეში 35 678 კმ სიმაღლეზე თითქმის ნულოვანი დახრილობის კუთხით. GEO-ს დიდი დაფარვის მიუხედავად, ეს თანამგზავრები ვერ დაფარავენ მაღალი გეოგრაფიული განედების მქონე რეგიონებს. გარდა ამისა, გეოსტაციონარული ორბიტის თანამგზავრებსა და მიწისპირა სადგურებს შორის საკომუნიკაციო ლინკები დაუცველია გავრცელების მაღალი დანაკარგების მიმართ და, შესაბამისად, საჭიროა დიდი ანტენები გადაცემის მაღალი სიმძლავრით. უფრო მეტიც, GEO თანამგზავრებისთვის გავრცელების შეყოვნება მაღალია ხანგრძლივი გავრცელების გზის გამო, რაც მათ არახელსაყრელს ხდის შეყოვნებისადმი მგრძნობიარე სერვისებისთვის. მეორე მხრივ, არაგეოსტაციონალური ორბიტის თანამგზავრები, რომლებიც მოიცავენ დედამიწის დაბალი ორბიტის (LEO), დედამიწის საშუალო ორბიტის (MEO) და მაღალი ელიფსური ორბიტის (HEO) თანამგზავრებს, მუდმივად გადაადგილდებიან წრიულ ორბიტაზე უფრო დაბალ სიმაღლეებზე, ვიდრე GEO თანამგზავრები და, შესაბამისად, მათთვის საკომუნიკაციო ლინკების დანაკარგები და სიგნალის გავრცელების გამო წარმოქმნილი შეყოვნება უფრო დაბალია. ვინაიდან ეს ქვედა ორბიტის თანამგზავრები ემსახურებიან უფრო მცირე დაფარვის ზონებს, ვიდრე GEO თანამგზავრები, საჭიროა არაგეოსტაციონალური ორბიტის თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედების შექმნა დედამიწის სრული დაფარვის მისაღწევად, მაღალი გეოგრაფიული განედების რეგიონების ჩათვლით.

LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედების ქსელებს, რომლებიც უახლოეს მომავალში ათასობით თანამგზავრისგან იქნება დაკომპლექტებული, მათი საყოველთაოდ გავრცელებიდან გამომდინარე, აქვთ გლობალური მასშტაბით დაკავშირების პოტენციალი და დღეისათვის არსებული „ციფრული განხეთქილების“ გადალახვის შესაძლებლობა. მხარდაჭერილი უფრო ეკონომიკური გზავების სისტემებითა და რეკონფიგურირებადი პროგრამული არქიტექტურით, ახალი LEO თანამგზავრების შესაძლებლობები მნიშვნელოვნად აღემატება ტრადიციული თანამგზავრების შესაძლებლობებს. უფრო მეტიც, ამ მეგათანავარსკვლავედებს შეუძლიათ მომსახურება გაუწიონ არა მხოლოდ მეჩხრად დასახლებულ ტერიტორიებს, არამედ მჭიდროდ დასახლებულ ურბანულ ცენტრებსაც, რათა უზრუნველყონ და შეინარჩუნონ მათი ეკონომიკური მდგრადობა. თუმცა, წვდომის თანასწორობის უზრუნველყოფა მაინც მოითხოვს არქიტექტურულ, მენეჯმენტულ და საოპერაციო ცვლილებებს.

წინამდებარე წიგნში, რომელიც მიმოხილვითი ხასიათისაა, განხილულია LEO თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედების საკომუნიკაციო ქსელების თემატიკასთან დაკავშირებული კვლევის შედეგები, რაც უახლეს პუბლიკაციებსა და სამეცნიერო მიღწევებზე დაყრდნობითაა მომზადებული. საქმე ისაა, რომ ბოლო პერიოდში აღნიშნული მიმართულებით ძალიან ბევრი საინტერესო და სერიოზული საჭურნალო პუბლიკაცია გახდა ხელმისაწვდომი. გადაწყვეტით, ჩვენი აზრით საუკეთესო ნაშრომები შეგვეკრიბა (ყველა მათგანი მოცემულია წიგნის ბოლოს მითითებულ ლიტერატურაში), მოგვეხდინა მათი სისტემატიზაცია და ერთიან სტრუქტურაში გაერთიანება, ქართულ ენაზე წარმოგვედგინა ამ ნაშრომებში მოყვანილი ძირითადი შედეგები და დაგვეწერა ეს წიგნი. შეზღუდული ფორმატის გამო, ავარიჩით მხოლოდ რამდენიმე პერსპექტიული მიმართულება, რომლებიც მოიცავს LEO თანამგზავრული კომუნიკაციების სხვადასხვა ასპექტს და, რომლებიც თავების მიხედვით შეჯამებულია შემდეგნაირად:

ციფრული კავშირი გახდა კეთილდღეობის საფუძველი და არსებული საზოგადოების აუცილებელი საჭიროება. მიუხედავად ამ დამოკიდებულებისა, ინტერნეტზე შეზღუდული წვდომა კვლავ გავრცელებულ პრობლემად რჩება, რაც დიდწილად დამოკიდებულია სოციალურ-ეკონომიკურ და გეოგრაფიულ ფაქტორებზე. პერსპექტიული გადაწყვეტა გლობალური წვდომის თანასწორობის მისაღწევად ეფუძნება ინტეგრირებულ თანამგზავრულ-სახმელეთო

ქსელებს, რომლებიც ეყრდნობა LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედებს. მიუხედავად იმისა, რომ LEO თანავარსკვლავედების სარგებელი ავსებს ტერესტრიალური ქსელების ნაკლოვანებებს, მათი ინკორპორაცია გავლენას ახდენს ქსელის დიზაინზე, მათებს სირთულეს და წარმოიშობა ახალი გამოწვევები. **პირველი თავი** წარმოგიდგენს შემდეგი თაობის LEO მეგათანავარსკვლავედების სისტემურ ანალიზს, ასახავს შესაძლებლობებს იმ მრავალი სარგებლის გამო, რომელიც ამ თანავარსკვლავედებს შეუძლიათ მოიტანონ და ხაზს უსვამს მთავარ გამოწვევებს. იგი ასევე გვთავაზობს ანალიზური მოდელების მოკლე მიმოხილვას და ხაზს უსვამს კომპიუტერული სიმულაციის თანამედროვე მიდგომებს შემდეგი თაობის თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედებისთვის. შესაბამისად, ეს თავი მკითხველთა ფართო აუდიტორიას, მათ შორის ქსელის დიზაინერებს აწვდის არსებით ინფორმაციას თანამგზავრული ქსელის მუშაობის შესახებ.

LEO თანამგზავრები შეუცვლელ როლს ასრულებენ თანასწორი წვდომის ქსელში მისი დაბალი შეყოვნების, დიდი გამტარუნარიანობისა და უწყვეტი გლობალური დაფარვის გამო. ასეთი უპრეცედენტოდ უზარმაზარი არარეგულარული სისტემისთვის, სტოქასტური გეომეტრია (SG) კვლევის შესაფერისი მეთოდია. SG მოდელს შეუძლია არა მხოლოდ გაუვლავდეს ქსელის მზარდ მასშტაბებს, არამედ ზუსტად გააანალიზოს და შეაფასოს ქსელის მუშაობა.

მეორე თავში განხილულია რამდენიმე სტანდარტული თანამგზავრული განაწილების მოდელი და თანამგზავრულ-სახმელეთო არხის მოდელები. სისტემური დონის მეტრიკები, როგორიცაა დაფარვის ალბათობა და სხვა შუალედური მნიშვნელობები წარმოდგენილია არატექნიკური აღწერის მეშვეობით. შემდეგ შესწავლილია კარიბჭეების სიმკვრივის, თანამგზავრების რაოდენობის და მათი ზღვის დონიდან სიმაღლის გავლენა შეყოვნებაზე და დაფარვის ალბათობაზე. დაბოლოს, ამ თავში წარმოდგენილია შესაძლო გამოწვევები და შესაბამისი გადაწყვეტილებები SG-ზე დაფუძნებული LEO თანამგზავრული სისტემების ანალიზისთვის.

LEO თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედი ხდება კონკრეტული რეალობა. ისეთი კომპანიების მიერ, როგორიცაა SpaceX და OneWeb უკვე დაწყებულია ასობით LEO თანამგზავრის გაშვება და ამუშავებულია კონკრეტული სერვისები. მაშინაც კი, თუ ასეთი LEO თანამგზავრული თანავარსკვლავედების დანიშნულება დღესდღეობით მხოლოდ ინტერნეტთან თანასწორი წვდომის უზრუნველყოფაა მთელ მსოფლიოში, მათი განთავსება ადასტურებს მათი არსებობის მიზანშეწონილობას და ვარაუდობს სარგებელიანობას მომავალი მიზნებისთვის.

მესამე თავში ჩვენ გარკვეულ ნათელს მოვფენთ ქსელური გამოთვლითი პარადიგმის შესაძლო ინტეგრაციას LEO თანამგზავრულ მეგათანავარსკვლავედებში. ტერესტრიალურ და/ან არატერესტრიალურ კვანძებს შეუძლიათ ისარგებლონ გამოთვლების გადატვირთვით ორბიტულ პერიფერიულ (OE) პლატფორმაზე, რომელიც ხელმისაწვდომია თანამგზავრული თანავარსკვლავედების მეშვეობით, მისი სწრაფი და განაწილებული გამოთვლითი შესაძლებლობების გამოყენებით. ამ კონტექსტში, წინასწარი ანალიზი უჩვენებს, რომ ამოცანების გადატვირთვის სტრატეგიებმა შეიძლება გამოიწვიოს ტექნიკური მახასიათებლების გაუმჯობესება, რაც ხსნის ახალ გამოწვევებს OE პლატფორმების დიზაინსა და დარეგულირების პროცესში.

რამდენიმე მილიარდ ადამიანს ამჟამად არ აქვს სანდო წვდომა ინტერნეტზე და, შესაბამისად, ცოდნის უზარმაზარ წყაროზე. **მეოთხე თავში** ჩვენ აღვწერთ სავსელ პირობებში ტესტირებულ საკომუნიკაციო მიდგომას, რომელიც აერთიანებს პატარა ყუთის ფორმის მქონე თანამგზავრულ (CubeSat) პლატფორმებს და შეყოვნებისადმი ტოლერანტული ქსელის (DTN) გადაწყვეტილებებს, რათა უზრუნველყოს ასინქრონული კავშირი მოსახლეობასთან და რეგიონებთან, რომლებსაც ინტერნეტი არ ემსახურება. შედეგად მიღებული ქსელების კლასი ცნობილია როგორც წრიულგზიანი ქსელები (RRN), და ეს არის ქსელური მიდგომა, რომელიც აგებულია მზის სისტემის ინტერნეტის მშენებლობისთვის შემუშავებულ ტექნოლოგიაზე. DTN კვანძების აუცილებელი თვითკმარობა საშუალებას იძლევა დაბალი ღირებულებით და ეტაპობრივად განხორციელდეს ქსელში წვდომა, რათა მოხდეს ისეთი მოსახლეობის მხარდაჭერა, რომელიც მოკლებულია LEO თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედების იაფფასიან ინტერნეტმოსახურებას. ჩვენ წარმოვადგენთ RRN არქიტექტურას და კომპიუტერული სიმულაციის საშუალებით ვაფასებთ სისტემის ტექნიკურ მახასიათებლებს. ამ უკანასკნელზე დაყრდნობით, ჩვენ განვიხილეთ ღია კოდის DTN პროტოკოლის იმპლემენტაცია, სახელად μ D3TN, რომელიც დაინერგა და შეფასდა RRN კონცეფციის პირველ ორბიტულ ექსპერიმენტში, ევროპის კოსმოსური სააგენტოს (ESA) OPS-SAT თანამგზავრის გამოყენებით. ეს თავი წარმოგიდგენს ექსპერიმენტის შედეგებს, სადაც აღწერილი RRN მიდგომა გამოცდილია კონკრეტული გამოყენების შემთხვევებისთვის. მიღებული შედეგები განაპირობებს აპლიკაციების ახალი სფეროს შექმნას.

თანამგზავრული საკომუნიკაციო ტექნოლოგიების სწრაფი განვითარებით, კოსმოსური წვდომის ქსელი განიხილება, როგორც მომავალი მეექვსე თაობის (6G) ტერესტრიალური ქსელის პერსპექტიული დამატება.

გარდა მიწისპირა საბაზო სადგურებისა, თანამგზავრული კვანძები, განსაკუთრებით კი LEO თანამგზავრები, ასევე შეიძლება გამოყენებულ იქნეს, როგორც საბაზო სადგურები ინტერნეტით წვდომისთვის და შეადგინონ ახალი ტიპის კონფიგურაცია – LEO თანამგზავრებზე დაფუძნებული წვდომის ქსელი (LEO-SAN). მოსალოდნელია, რომ LEO-SAN უზრუნველყოფს უწყვეტ მასობრივ წვდომას და გაფართოებულ დაფარვას სიგნალის მაღალი ხარისხით. თუმცა, მისი პრაქტიკული განხორციელება ჯერ კიდევ აწყდება მნიშვნელოვან ტექნიკურ გამოწვევებს, როგორებიცაა, მაგალითად, მაღალი მობილურობა და შეზღუდული ბიუჯეტი LEO თანამგზავრული კვანძების სასარგებლო საკომუნიკაციო დატვირთვისთვის. **მეხუთე თავი** მიზნად ისახავს გამოავლინოს ის ძირითადი ტექნიკური პრობლემები, რომლებიც სრულად არ არის გადაწყვეტილი არსებულ LEO-SAN-ის დიზაინში, კერძოდ, შესწავლილია შემთხვევითი წვდომის, სხივის მართვისა და დოპლერის ეფექტის მიმართ მდგრადი გადაცემის ტექნოლოგიები. უფრო კონკრეტულად, LEO-SAN-ში შემთხვევითი წვდომის კრიტიკული საკითხები განიხილება დაბალ მოქნილობასთან, გადაცემის ხანგრძლივ შეყოვნებასთან და არაეფექტიან „ხელის ჩამორთმევასთან“ დაკავშირებით. შემდეგ LEO SAN-ის სხივის მართვა გამოკვლეულია გავრცელების რთულ გარემოში მაღალი მობილურობისა და სასარგებლო დატვირთვის შეზღუდული ბიუჯეტის პირობებში. გარდა ამისა, შესწავლილია დოპლერის წანაცვლებების გავლენა LEO-SAN-ზე. ასევე განიხილება პერსპექტიული ტექნოლოგიები ამ გამოწვევების გადასაჭრელად. დაბოლოს, წარმოდგენილია სამომავლო კვლევის მიმართულებები.

უსადენო მიწისქვეშა სენსორული ქსელები (WUSN) გვპირდება მნიშვნელოვან სოციალურ და ეკონომიკურ სარგებელს სხვადასხვა ვერტიკალებში. თუმცა, ბევრი შესაბამისი გამოყენების სცენარი განლაგებულია შორეულ ადგილებში, სადაც არ არის ხელმისაწვდომი დამხმარე ინფრასტრუქტურა. ამ პრობლემის გადასაჭრელად, **მეექვსე თავში** ჩვენ ვახდენთ მიწისქვეშა პოზიციიდან თანამგზავრთან პირდაპირი კავშირის (U-DtS) მიდგომის კონცეპტუალიზაციას, რაც გულისხმობს მიწისქვეშა მასობრივი მანქანური ტიპის კომუნიკაციის (mMTC) სენსორების მიერ გაგზავნილი სიგნალების მიღებას კარიბჭეებით, რომლებიც ოპერირებენ LEO თანამგზავრებზე. თავდაპირველად, ჩვენ განვიხილავთ ორ ალტერნატიულ არქიტექტურას ასეთი ქსელების გასააქტიურებლად და გამოვყოფთ მათ მახასიათებლებსა და შეზღუდვებს. შემდეგ, ჩვენ ვიყენებთ კომპიუტერულ სიმულაციებს სოფლის „ჭკვიანი“ მეურნეობის აპლიკაციის სცენარის მოდელირებისათვის დაბალი სიმძლავრის ფართო არეალის ქსელურ (LoRaWAN) ტექნოლოგიაზე დაფუძნებული U-DtS mMTC-ის მიზანშეწონილობისა და მახასიათებლების შესასწავლად. კვლევა ფოკუსირებულია სხვადასხვა პარამეტრის ზემოქმედებაზე, რომელთა შორისაა კვანძების მიწაში ჩამარხვის სიღრმე, ნიადაგის მახასიათებლები და კომუნიკაციის პარამეტრები. შედეგები აჩვენებს, რომ ჩვეულებრივ LoRa მოდულაციას დიდი პრობლემები ექმნება მიწისქვეშა გავრცელების დანაკარგებისა და პაკეტების შეჯახების მაღალი სიხშირის გამო. თუმცა, LoRa, რომელიც დაფუძნებულია მოქმედების დიდი რადიუსისთვის სპექტრის განვრცობის ტექნოლოგიაზე გადამტან სიხშირეებზე გადახტომებით (LR-FHSS), პერსპექტიულია U-DtS ქსელებისთვის და მან შეიძლება უზრუნველყოს რამდენიმე ათეული სანტიმეტრის სიღრმეზე მდებარე მიწისქვეშა კვანძების დაკავშირება. დაბოლოს, ჩვენ განვსაზღვრავთ პოტენციურ გამოწვევებსა და მიმართულებებს მომავალი U-DtS კვლევისთვის.

კაპიტალური დახარჯები და შენობებს შიგნით არსებული საკომუნიკაციო გამოწვევები არის ორი მთავარი დაბრკოლება თანაბარი წვდომის პოზიციონირების სერვისებისთვის მთელ მსოფლიოში. გლობალური სანავიგაციო თანამგზავრული სისტემები (GNSS) კარგად არ ფუნქციონირებს შენობებში და შენობებს გარეთა ზოგიერთ რთულ გარემოში, როგორიცაა ხშირი ტყეები ან მცენარეული საფარით მდიდარი მთიანი რელიეფები, მაგალითად, სიგნალების მრავალგზიანი გავრცელების და სიგნალისა და ხმაურის დაბალი თანაფარდობის გამო. დღესდღეობით ტერესტრიალური გადაწყვეტილებები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს GNSS-ის დასაბამებლად, მაგრამ ისინი, როგორც წესი, ძვირი ჯდება მაღალი დაფარვის პირობებში და არ გვთავაზობენ თანასწორ წვდომას, მაგალითად დაბალშემოსავლიან ქვეყანებში, ან სახმელეთო ინფრასტრუქტურისთვის რთულად მისადგომ ადგილებში, როგორიცაა ღრმა ჯუნგლები, ქვიშიანი უდაბნო ტერიტორიები და ღრმა ხეობები/კანიონები. რამდენადაც LEO თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედები მნიშვნელოვნად უფრო ახლოს არიან დედამიწასთან, ვიდრე GNSS თანამგზავრები, LEO-ზე დაფუძნებულმა გადაწყვეტილებებმა შეიძლება შეავსოს GNSS. ჩვენი ვარაუდით, მომავალი უსადენო მიმღებები მხარს დაუჭერენ ტერესტრიალური და თანამგზავრული ინფრასტრუქტურის ინტეგრაციას და, ამრიგად, LEO-ზე დაფუძნებული პოზიციონირების ამოცანები ძირითადად შეიძლება განხორციელდეს როგორც პროგრამული დანამატები არსებულ და მომავალ მიმღებებზე. მიუხედავად ამისა, დედამიწასთან უფრო მეტად სიახლოვე ავტომატურად არ ნიშნავს უფრო ძლიერ მიღებულ სიგნალებს ან პოზიციონირების სიზუსტეს,

განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც ახალი LEO თანამგზავრების სიგნალების გადამტანი სიხშირეები უფრო მაღალია, ვიდრე GNSS-ისთვის. **მეშვიდე თავში** წარმოდგენილია LEO თანამგზავრებზე დაფუძნებული პოზიციონირება მომავალი თანასწორი წვდომის ლოკალიზაციისთვის და ამ საკითხის ტექნიკურ-ეკონომიკური შესწავლა LEO თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედების არსებული უპირატესობებისა და გამოწვევების განხილვით, რომელთა უსაღესო სიგნალები შეიძლება გამოყენებულ იქნეს როგორც ოპორტუნისტული (შესაძლებლობების) სიგნალები. ჩვენ ვაჩვენებთ, რომ არსებობს მომავალი LEO მეგათანავარსკვლავედების გამოყენებული პოტენციალი თანასწორი წვდომის ლოკალიზაციისთვის, თუმცა რამდენიმე გამოწვევა ჯერ კიდევ დასაძლევია.

თანამგზავრული საკომუნიკაციო სისტემების შემდეგი თაობა მიზნად ისახავს ტერაბიტი წამში გამტარუნარიანობის მიღწევას. შეზღუდული სპექტრის გამო, ტრადიციული რადიოსიხშირული (RF) საკომუნიკაციო ლინკები ვერ უზრუნველყოფენ ასეთ მაღალ გამტარუნარიანობას. თავისუფალი სივრცის ოპტიკური (FSO) გადაცემა არის შესაძლო ალტერნატივა, რომელმაც ცოტა ხნის წინ მიიპყრო დიდი ყურადღება თანამგზავრულ საკომუნიკაციო საზოგადოებაში. თუმცა, FSO კომუნიკაციები დაუცველია ატმოსფერული ტურბულენტობისა და მილენის მიმართ ამინდის სხვადასხვა პირობების გამო, როგორცაა ნისლი, თოვლი და ღრუბლები. უფრო მეტიც, მიმდებარე და გადამცემს შორის შეუსაბამობით გამოწვეული შეცდომები და სხივის მოხეტიალე ბუნება გავლენას ახდენს FSO კომუნიკაციების საიმედოობაზე. ასეთი ეფექტების წარმატებით აღმოსაფხვრელად, **მერვე თავში** ჩვენ ვთავაზობთ კოსმოსურ-საჰაერო-სახმელეთო (SAG) FSO ქსელს მაღალ სიმაღლეზე სტრატეგიულად განლაგებული პლატფორმით, რომელიც მოქმედებს როგორც სარელეო სადგური. ჩვენ ვაჩვენებთ, რომ ასეთ დიზაინს შეუძლია არსებითად შეამციროს ატმოსფერული ტურბულენტობის ეფექტი, განსაკუთრებით მაშინ, როდესაც თანამგზავრის ზენიტის კუთხე შედარებით მაღალია. შემდეგ ჩვენ წარმოვადგენთ ახალ SAG თანამგზავრულ საკომუნიკაციო ქსელს, რომელიც აერთიანებს შემოთავაზებულ SAG-FSO გადაცემას და ჩვეულებრივ ჰიბრიდულ ერთნახტომიან FSO/RF გადაცემას სისტემის მთლიანი საიმედოობისა და მუშაობის მახასიათებლების კიდევ უფრო გასაუმჯობესებლად. რიცხვითი შედეგები ნათლად აჩვენებს შემოთავაზებული, უაღრესად ინოვაციური SAG-FSO ქსელის არქიტექტურის პოტენციალს.

6G კომუნიკაციებისთვის, მოსალოდნელია, რომ ინტეგრირებული თანამგზავრულ-სახმელეთო ქსელი უზრუნველყოფს მრავალფეროვან სერვისებს გლობალური დაფარვით. ასეთი ინტეგრირებული ქსელის წარმატებული დანერგვის პირველი ნაბიჯი არის თანამგზავრული ქსელის შექმნა, რომელსაც შეუძლია შეუფერხებლად იმუშაოს თავის ტერესტრიალურ პარტნიორთან. თუმცა, რამდენადაც თანამგზავრები დედამიწის გარშემო ბრუნავენ ძალიან მაღალი სიჩქარით და ისინი დაკავშირებულია ძალიან გრძელი უსაღესო ლინკებით, თითქმის შეუძლებელია ტერესტრიალური სქემების გამოყენება ცვლილების გარეშე. ქსელის ფენებად დაყოფა არის მრავალი უნიკალური ლოგიკური და ვირტუალიზებული ქსელის შექმნის მეთოდი საერთო მრავალ დომენურ ინფრასტრუქტურაზე. ქსელის თითოეული ფენა არის იზოლირებული გამჭოლი (ბოლოების დამაკავშირებელი) ქსელი, რომელიც მორგებულია კონკრეტული აპლიკაციის მიერ მოთხოვნილი სხვადასხვა მოთხოვნის შესასრულებლად. **მეცხრე თავში**, ქსელის ვირტუალიზაცია ქსელის ფენებად დაყოფით, რომელიც აქამდე აქტიურად იყო გამოკვლეული ტერესტრიალურ ქსელებში, გაანალიზებულია თანამგზავრული სისტემებისთვის. თანამგზავრული ქსელის ფენების დაგეგმვის (SNSP) მეთოდები შემოთავაზებულია ვირტუალური ქსელისთვის (VN), ამ ქსელის რესურსების დარეზერვირებისთვის მომსახურების საჭირო დროის განმავლობაში. პროცესი მოდელირებულია VN მოთხოვნებით (VNR), რადგან მიზანია VNR-ების ეფექტიანად ჩაშენება და VN-ის შენარჩუნება მისი მომსახურების საჭირო დროის დასრულებამდე. წარმოდგენილია SNSP-ის კანდიდატი მეთოდები თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედის ქსელებში, რომლებიც შემდეგ ფასდება სხვადასხვა მეთოდით შესაბამისი მეთოდის მოსაძებნად. ასევე იდენტიფიცირებულია SNSP-ის ძირითადი პარამეტრები და სისტემური ბარიერი, რომელსაც ვუწოდებთ სისტემის „ვიწრო ადგილს“. დაბოლოს, კომპიუტერული სიმულაციის შედეგების საფუძველზე განიხილება სისტემის ფუნქციონირება, SNSP-სთან დაკავშირებული კომპრომისები და ღია საკითხები.

დამატებით აღვნიშნავთ, რომ წიგნის ბოლოს წარმოდგენილია გამოყენებული ინგლისურენოვანი აბრევიატურებისა და აკრონიმების მნიშვნელობები და მათი შესატყვისი ქართული თარგმანები.

ვფიქრობთ, რომ მასალა სასარგებლო იქნება და დახმარებას გაუწევს საინფორმაციო ტექნოლოგიებისა და კომუნიკაციების დარგში მომუშავე სპეციალისტებსა და აკადემიურ პერსონალს, ბაკალავრიატის მაღალი კურსის სტუდენტებს, მაგისტრანტებსა და დოქტორანტებს.

თავი 1 მომდევნო თაობის მებათანამგზავრული ქსელები

თანასწორი წვდომისთვის: შესაძლებლობები, გამოწვევები და ეფექტიანობა

1.1. შესავალი

მოდერნიზაციის თანამედროვე მიდგომა ეფუძნება გაციფრულებას, გამოთვლებსა და ინტერნეტით საყოველთაოდ წვდომას. მათი ელემენტების ზემოქმედება გავლენას ახდენს ჩვენს ცხოვრებაზე, სოციალურ ურთიერთქმედებებზე, თანამედროვე ეკონომიკაზე, ჯანდაცვისა და განათლების სისტემებზე. დაწყებული, როგორც ინფორმაციის გაზიარების წინდახედული მიდგომა, ინტერნეტთან წვდომა ახლა აუცილებლობაა ადამიანის ძირითადი საჭიროებების დასაკმაყოფილებლად. თუმცა, ინტერნეტის ხელმისაწვდომობამ, საიმედოობამ და დაფარვამ ვერ მიაღწია ჭეშმარიტად გლობალურ მასშტაბებს. „ციფრული განხეთქილება“ არის ტერმინი, რომელიც აღნიშნავს უფსკრულს განვითარებულ რეგიონებს, რომლებსაც აქვთ წვდომა თანამედროვე საინფორმაციო და საკომუნიკაციო ტექნოლოგიებზე (ICT) და იმ რეგიონებს შორის, რომლებსაც საერთოდ არ აქვთ ან აქვთ შეზღუდული წვდომა. ციფრული განხეთქილება არის სამოქალაქო უფლებების საკითხი, რომელიც უფრო მძიმედ აისახება არაპრივილეგირებულ და დაუცველ თემებზე. აქედან გამომდინარე, აუცილებელია ეფექტიანი სტრატეგიებისა და გადაწყვეტილებების შემუშავება, რომლებიც აღმოფხვრის არსებულ ციფრულ განხეთქილებას და, შესაბამისად, უზრუნველყოფს სამართლიან და ჭეშმარიტად გლობალურ დაფარვას.

ამჟამინდელი ქსელის ინფრასტრუქტურა, სადენიანი იქნება ეს თუ უსადენო, დომინირებს ტერესტრიალური (მიწისპირა) საკომუნიკაციო სერვისებით, რომელთა განლაგება ძირითადად განპირობებულია მოკლევადიანი მოგებით, რაც ამძაფრებს წვდომის უთანასწორობის პრობლემას შორ მანძილებზე არსებულ ტერიტორიებთან არასაკმარისი კავშირის გამო, რომლებსაც არ გააჩნიათ საკმარისი ბიზნესმოტივები. არატერესტრიალური ქსელები (NTN) ახლახან გამოჩნდა, როგორც პერსპექტიული გადაწყვეტა ტერესტრიალური ქსელების კავშირის გასაძლიერებლად გაფართოებული დაფარვის უზრუნველყოფის გზით. NTN-ების ერთ-ერთი მთავარი კომპონენტია თანამგზავრული ქსელები, მათ შორის ბოლო პერიოდში ფართოდ გამოყენებული დედამიწის დაბალი ორბიტის (LEO) თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედები. მოსალოდნელია, რომ შემდეგი თაობის თანამგზავრული საკომუნიკაციო სერვისები უზრუნველყოფენ უწყვეტ კავშირს სოფლად და შორეულ რეგიონებში ინტეგრირებული კავშირით, თუნდაც მკვერი ურბანულ გარემოში.

LEO თანამგზავრული თანავარსკვლავედების გამოყენება გლობალური კომუნიკაციებისთვის ნიშნავს პარადიგმის შეცვლას ჩვეულებრივი ტერესტრიალურის დაფარვის სრული დამოკიდებულებიდან. არსებობს ტენდენცია ჰიბრიდული სისტემის შექმნისა, რომელიც აერთიანებს შემდეგი თაობის ტერესტრიალურ ქსელებს და არატერესტრიალური ქსელების სერვისებს უწყვეტ კონტინუუმში. ამ ახალ შესაძლებლობებს თან ახლავს ახალი საინჟინრო გადაწყვეტები და მრავალი ტექნიკური გამოწვევა, რომელიც დაკავშირებულია ქსელის წვდომის სტანდარტიზაციასთან, თანამგზავრებს შორის კომუნიკაციებთან, ჰენდოვერთან, ტერესტრიალურ ინტეგრაციასთან, თანაარხის ინტერფერენციებთან და ბევრ სხვა ფაქტორთან, რომლებიც ერთობლივად გავლენას ახდენენ ქსელის მუშაობაზე.

თანამგზავრული ქსელის მუშაობა ჩვეულებრივ ფასდება სპეციალიზებული პროგრამული პლატფორმებით, რომლებიც იყენებენ მორგებულ კომპიუტერულ სიმულაციებს. მიუხედავად იმისა, რომ სიმულატორები უზრუნველყოფენ საკმაოდ საიმედო შედეგებს ისეთი დელიკატური დეტალების აღრიცხვით, როგორიცაა ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტები, დედამიწის რელიეფი და ზუსტი თანამგზავრული ორბიტები, ისინი ვერ ქმნიან გამოსადეგ ანალიზურ მოდელებს. ასეთ მოდელებს გადამწყვეტი მნიშვნელობა აქვს ქსელის მუშაობაზე სხვადასხვა პარამეტრების გავლენის დასაფიქსირებლად, რაც ოპტიმიზაციის სწრაფ მიღწევას უზრუნველყოფს.

უფრო მეტიც, სიმულაციების სირთულე კიდევ უფრო პრობლემატურია მეგათანავარსკვლავედებისთვის, რომლებიც შედგება დიდი რაოდენობით ურთიერთდაკავშირებული თანამგზავრებისგან, რაც ზრდის სისტემის ოპტიმიზაციის სირთულეს. აქედან გამომდინარე, საჭიროა ანალიზური მოდელები, რომლებიც უზრუნველყოფენ კომპრომისს რეალურ განლაგებასა და დახვეწილ სიმულაციურ პლატფორმებს შორის, რომლებიც ჩვეულებრივ არ არის დამუშავებადი. სტოქასტური გეომეტრიის (SG) ინსტრუმენტებზე დაფუძნებული ანალიზური მოდე-ლირება ფართოდ გამოიყენება ტერესტრიალური ქსელებისთვის მათი მუშაობის აღსაბეჭდად და, როგორც ბოლოდროინდელმა კვლევებმა აჩვენა, რომ ასეთი მიდგომა სიცოცხლისუნარიანია თანამგზავრული მეგა-თანავარსკვლავედებისთვის.

ამ თავში განხილული ოთხი ძირითადი შედეგი შეიძლება ჩამოყალიბდეს შემდეგნაირად:

1. ასახულია LEO თანამგზავრული მეგათანავარსკვლავედების უპირატესობები და წარმოდგენილია ინფორ-მაცია მათ მიერ გამოყენებული სხვადასხვა შესაძლებლობების შესახებ;
2. ხაზგასმულია ის გამოწვევები, რომლებიც გამომდინარეობს მათი განლაგებიდან;
3. მოცემულია სხვადასხვა ქსელური არქიტექტურის მახასიათებლების ანალიზის თანამედროვე მეთოდების დეტალური აღწერა;
4. განხილულია ახლად შექმნილი სიმულაციური მიდგომები, რომლებიც შესაფერისია თანამგზავრების მეგათანავარსკვლავედების კვლევისა და განვითარებისთვის.

ეს თავი ასევე გვიჩვენებს ანალიზური მოდელების გამოყენების უპირატესობებს რთულ მეგათანამგზავრულ ქსელებში სწრაფი აღქმის უზრუნველსაყოფად. ნახ. 1.1-ზე წარმოდგენილია LEO მეგათანავარსკვლავედების ძირითადი მახასიათებლები.

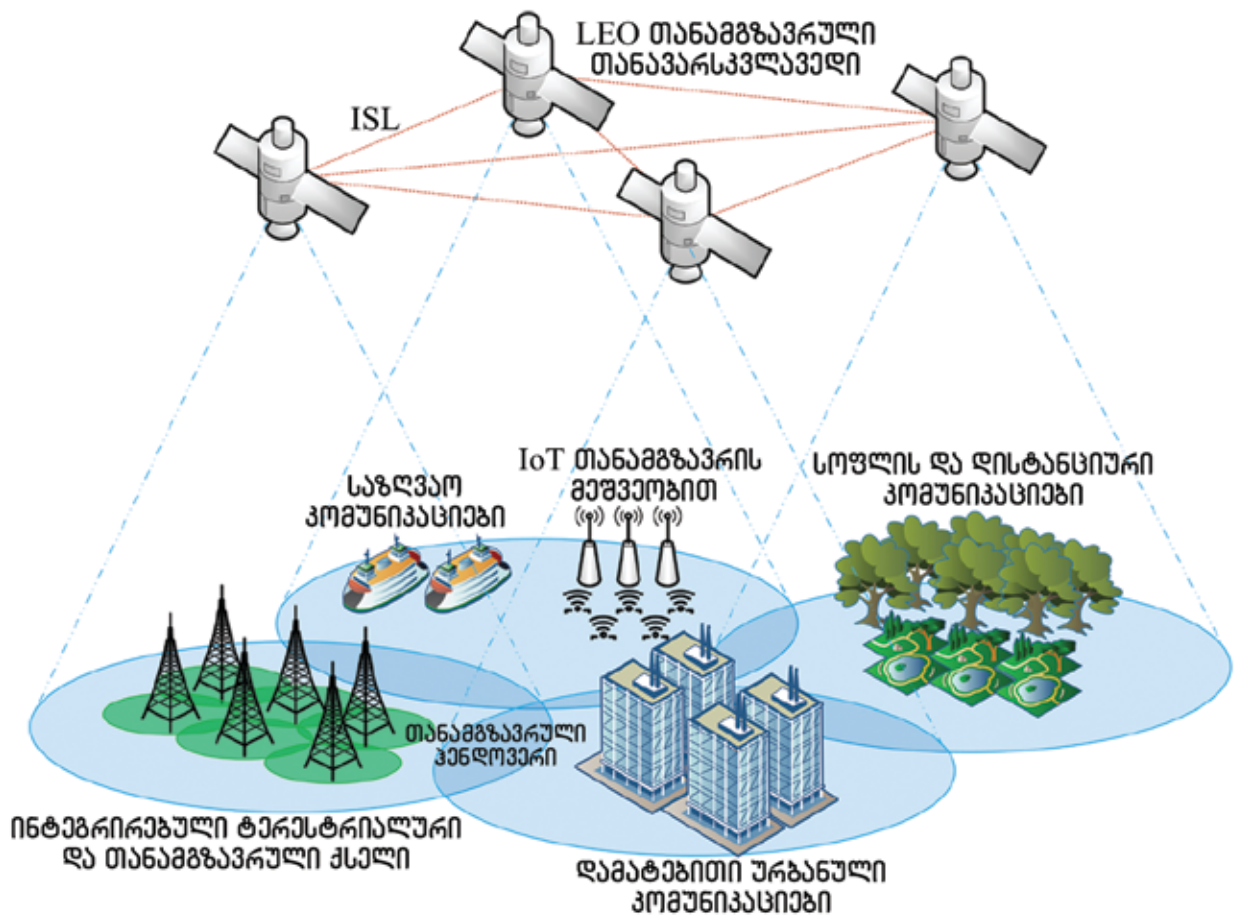
1.2. მეგათანავარსკვლავედების შესაძლებლობები

სამართლიანი და გლობალური დაფარვა:

მეხუთე თაობისა (5G) და მისი შემდგომი პერიოდის კომუნიკაციების განვითარებასთან დაკავშირებული გამოყენების შემთხვევების მხარდასაჭერად საჭიროა საყოველთაოდ დაკავშირება და მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარე. თუმცა, ტერესტრიალური სერვისები სულაც ვერ უზრუნველყოფს მომხმარებლის თანმიმდევრულ და სამართლიან სამომხმარებლო გამოცდილებას შორეულ რეგიონებში კავშირის განხორ-ციელებასთან დაკავშირებული სირთულეების გამო. თანამგზავრები ჩნდება, როგორც დამატებითი საშუალება, რათა უზრუნველყოს ფართომოლოვანი კომუნიკაციები ურბანული ტერიტორიების მიღმა. საკმარისად დიდი (ფართო) სიხვის გამოყენებით, LEO თანამგზავრს შეუძლია უზრუნველყოს დედამიწის ზედაპირის 3 და 12 პოლარული ეკვივალენტური დაფარვა, ზღვის დონიდან შესაბამისად, 400 და 2 000 კმ სიმაღლეებზე განთავსების შემთხვევაში. აქედან გამომდინარე, სოფლისა და შორეული (დისტანციური) ტერიტორიები შეიძლება ეფექტიანად დაიფაროს ციფრული განხეთქილების შესამცირებლად. თანამგზავრული დაფარვა ასევე შესაფერისია საზღვაო კომუნიკაციებისთვის და მაღალსიჩქარიანი მოძრავი პლატფორმებისთვის. ერთ-ერთი მაგალითია მაღალსიჩქარიანი საიმედო უსადენო კავშირის უზრუნველყოფა თვითმფრინავებთან ან მაღალსიჩქარიან მატარებლებთან თანამგზავრული საკომუნიკაციო ლინკების საშუალებით, რომელსაც შეუძლია სალონში ინტერნეტსერვისების მიწოდება. გარდა ამისა, საზღვაო კავშირი აუმჯობესებს უსაფრთხოებას და გემების მოძრაობის ეფექტიანობას.

IoT თანამგზავრის მეშვეობით:

საგნების ინტერნეტმა (IoT) მნიშვნელოვანი იმპულსი მოიპოვა ბოლო ათწლეულის განმავლობაში. იგი ემსახურება ბევრ აპლიკაციას, რომლებიც ეყრდნობა მასობრივ უსადენო სენსორულ ქსელებს, რომელთა გამოყენების სფეროა ჯგვიანი ქალაქები, ტრანსპორტი, დისტანციურად მართული სოფლის მეურნეობა და საზღვაო მონიტორინგი. კონკრეტულად, დაბალი სიმძლავრის ფართო არეალის ქსელები დიდწილად წარმატებით აკავშირებენ IoT-ს დიდ ტერიტორიებზე ტერესტრიალური ქსელების მეშვეობით და ისინი შესაფერისია ბატარეით მომუშავე მოწყობილობებისთვის. თუმცა, მრავალი სხვა გამოყენების შემთხვევა მოითხოვს დაკავშირებას სოფლად და შორეულ რეგიონებში, რისი მიღწევაც რთულია ჩვეულებრივი ტერესტრიალური



ნახ. 1.1. LEO თანამგზავრული თანავარსკვლავედის ქსელის მიმოხილვა, რომელიც აჩვენებს მის დაფარვას და პერსპექტიულ შესაძლებლობებს

ლინკების გამოყენებით. ახლახან შემოთავაზებული იქნა თანამგზავრული თანავარსკვლავედები IoT ქსელების მხარდასაჭერად, თუმცა, აქ ბევრი გამოწვევა ჩნდება:

- პოპულარული IoT პროტოკოლები ძირითადად ეყრდნობა შემთხვევითი წვდომის ტექნიკას, რის შედეგადაც უფრო მაღალი დონის თანაარხის ინტერფერენცია წარმოიქმნება მოწყობილობების დიდი რაოდენობის გამო, რომლებიც კონკურენციას უწევენ სიხშირული სპექტრის წვდომას აპლინგზე (რაც იწვევს პრობლემებს თანამგზავრის დიდი დაფარვის ზონის გამო);
- IoT მოწყობილობები, როგორც წესი, შეზღუდულია ენერგომომხმარებით, რაც ართულებს აპლინგის ენერგიის ბიუჯეტის დიზაინს, თუნდაც დაბალი ორბიტის თანამგზავრებისთვის.

შედეგად, IoT-ისთვის მიძღვნილ პროტოკოლებს თანამგზავრზე სჭირდებათ თავსებადი მექანიზმების დანერგვა, რათა შეამცირონ თანაარხის ინტერფერენცია მინიმალური ენერგეტიკული ბიუჯეტებით.

შემცირებული შეყოვნება:

თანამგზავრების საშუალებით გლობალური დაფარვა შეიძლება განხორციელდეს დედამიწის გეოსტაციონარული ორბიტის (GEO), დედამიწის საშუალო ორბიტის (MEO) და LEO თანამგზავრების გამოყენებით. მიუხედავად იმისა, რომ GEO თანამგზავრი ფარავს ზედაპირის გაცილებით დიდ რეგიონს, ტიპური გადაცემის ორმხრივი დრო (RTT) 250–350 მწმ-ზე მეტია, რაც მათ არაპრაქტიკულს ხდის შეყოვნებისგან თავისუფალი აპლიკაციებისთვის. ანალოგიურად, მიუხედავად იმისა, რომ MEO თანამგზავრების განთავსების სიმაღლე ოდნავ დაბალია, მათი RTT მაინც შედარებით დიდია. GEO-სა და MEO-ზე დაფუძნებულ თანამგზავრულ ქსელებთან შედარებით, LEO თანავარსკვლავედებს უჭირავთ გაცილებით დაბალი სიმაღლე ზღვის დონიდან (ჩვეულებრივ 400–2000 კმ). ეს შედარებითი სიახლოვე მნიშვნელოვნად აძლიერებს ლინკის ბიუჯეტს (45–60 დბ გაუმჯობესება