

# საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

სერგი გოგობია

გეოლოკაციის მეთოდების კვლევა და მათი გამოყენება  
მობილური ქსელის ხარისხის გაუმჯობესების მიზნით

წარმოდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

სადოქტორო პროგრამა: „ტელეკომუნიკაცია“

შიფრი: 0714

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

ივლისი, 2020 წელი

საავტორო უფლება © 2021 წელი, სერგი გოგობია

თბილისი

2021 წელი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერნი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით სერგი გოგობიას მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „გეოლოკაციის მეთოდების კვლევა და მათი გამოყენება მობილური ქსელის ხარისხის გაუმჯობესების მიზნით“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

ხელმძღვანელი ----- ასოც. პროფ ნ. აზიანიძე

რეცენზენტი ----- ტ.მ.დ. რ.სვანიძე

რეცენზენტი ----- ასოც. პროფ. შ კვიციანი

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2021

**ავტორი:** სერგი გოგობია

**თემის დასახელება:** „გეოლოკაციის მეთოდების კვლევა და მათი გამოყენება მობილური ქსელის ხარისხის გაუმჯობესების მიზნით“

**ფაკულტეტი:** ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის

**სადოქტორო პროგრამა:** „ტელეკომუნიკაცია“

**ხარისხი:** აკადემიური დოქტორი

**სხდომა ჩატარდა:** ივნისი, 2021

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ ზემოთ მოყვანილი დასახელების დისერტაციის გაცნობის მიზნით მოთხოვნის შემთხვევაში მისი არაკომერციული მიზნებით კოპირებისა და გავრცელების უფლება მინიჭებული აქვს საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტს.

---

ავტორის ხელმოწერა

ავტორი ინარჩუნებს დანარჩენ საგამომცემლო უფლებებს და არც მთლიანი ნაშრომის და არც მისი ცალკეული კომპონენტების გადაბეჭდვა ან სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

ავტორი ირწმუნება, რომ ნაშრომში გამოყენებული საავტორო უფლებებით დაცულ მასალებზე მიღებულია შესაბამისი ნებართვა (გარდა იმ მცირე ზომის ციტატებისა, რომლებიც მოითხოვენ მხოლოდ სპეციფიურ მიმართებას ლიტერატურის ციტირებაში, როგორც ეს მიღებულია სამეცნიერო ნაშრომების შესრულებისას) და ყველა მათგანზე იღებს პასუხისმგებლობას.

## რეზიუმე

დისერტაციაში განხილულია გეოლოკაციის სხვადასხვა საშუალებები, შესწავლილია სხვადასხვა ფაქტორები, რომლებიც გავლენას ახდენენ მათზე და შემუშავებულია ახალი მეთოდები, რომლებიც მნიშვნელოვნად ზრდიან მის სიზუსტეს. არსებული კლასიკური ადგილმდებარეობის დადგენის მექანიზმები იყენებენ სამი ან მეტი ფიჭიდან მიღებული სიგნალის დონეს. ჩვენ შევიმუშავეთ ახალი მეთოდი, რომელიც საშუალებას იძლევა მხოლოდ ერთი სადგურით მოხდეს აბონენტის კოორდინატების დადგენა. ნაშრომისათვის საჭირო ანათვლების აღებისათვის განვახორციელეთ გაზომვის სხვადასხვა მეთოდებისა და მათი ცდომილებების გამოკვლევა, რის შედეგადაც დავადგინეთ, რომ საუკეთესო სიზუსტე გააჩნია A-GPS მეთოდს, რომელიც დამოუკიდებელი მოდულია, არ ექვემდებარება 3GPP ორგანიზაციის მიერ შემუშავებულ პროტოკოლებს და მისგან მიღებული ინფორმაცია პირდაპირი სახით არ გადაიცემა ქსელის მმართველ ელემენტებში. ამის გამო შევიმუშავეთ ახალი აპლიკაცია, რომელიც ზომავს წინასწარ განსაზღვრულ სიდიდეებს და ახდენს მათ გადაცემას ქსელის მონაცემთა ბაზაში. დისერტაციაში ასევე შემოთავაზებულია სმარტფონებიდან მიღებული ანათვლები, რომლებიც კორელირებულია მაღალი სიზუსტის კოორდინატებთან. ნაჩვენებია როგორ გამოიყენება ეს ანათვლები თვითორგანიზებადი ქსელის სისტემის ხარისხის გასაუმჯობესებლად. არსებული SON სისტემებში დაფარვის ოპტიმიზირება ძირითადად განხორციელებულია ქსელის ხარისხის მაჩვენებლების მიხედვით, რადგან თვითოეული აბონენტის ადგილმდებარეობის გათვალისწინება მთლიანი სისტემისთვის ძალიან დიდ გამოთვლით რესურსს მოითხოვს. ჩვენ გამოვიკვლიეთ და განტოლების სახით ჩავწერეთ თითოეული პარამეტრის ცვლილების გავლენა მთელ სისტემაზე და მოვახდინეთ მისი ინტეგრაცია ქსელის ხარისხის და დატვირთვის ბალანსირების მაქსიმიზაციის მიზნით. ჩატარებულმა მოდელირებამ ასევე გვაჩვენა, რომ ახალი ალგორითმის გამოყენებით მოხერხდა გადატვირთული საბაზო სადგურების განტვირთვა მეზობელ სადგურებზე ტრაფიკის გადანაწილების შედეგად. ასევე მიღწეულ იქნა გადატვირთული ფიჭის ტრაფიკის მნიშვნელოვანი შემცირება მეზობელ სადგურებზე უმნიშვნელო მატების დროს. დისერტაციაში განვიხილეთ აბონენტების ადგილმდებარეობის გამოყენების შესაძლებლობა რადიო პაკეტების დამგეგმავის მექანიზმებში და შევიმუშავეთ ახალი ადაპტიური ალგორითმი, რომელიც უფრო მეტად მოქნილს ხდის დამგეგმავი მოდულის მუშაობას. ნაშრომში ასევე გამოკვლეულ იქნა სხვადასხვა რადიო პაკეტების დამგეგმავის ალგორითმები და შედარდა ჩვენს მიერ შემუშავებულ ახალ გეოლოკაციაზე დაფუძნებულ ადაპტიურ პაკეტების დამგეგმავთან. სიმულაციის შედეგად დადგინდა, რომ ახალი ალგორითმი უფრო ეფექტურად იყენებს სისტემის ტევადობას. დისერტაციაში განხილულია IOT სენსორებიდან მიღებული ქაოტური ინფორმაციის დამუშავების მეთოდები, სადაც შემუშავდა ახალი CEP მეთოდი, რომელიც იყენებს

კომპიუტერულ სწავლებას (ML) რომელიც აუმჯობესებს მიღებული ინფორმაციის რეალურ შემთხვევებთან კორელაციის სიზუსტეს. სენსორებიდან მიღებული ინფორმაციის გაუმჯობესების მიზნით ასევე შევისწავლეთ გეოლოკაციის გამოყენების მნიშვნელობა, რის შემდეგაც შემოთავაზებული იქნა დამატებითი აპარატურული უზრუნველყოფის გარეშე ადგილმდებარეობის დადგენის მეთოდი სამ განზომილებიან სივრცეში. ნაშრომში ასევე განვიხილეთ გეოლოკაციის საშუალებით ფიჭების ავტომატურ დაგეგმარების მეთოდების გაუმჯობესების შესაძლებლობა და სიმულაციის საშუალებით მოვახდინეთ მისი შედარება არსებულ მეთოდებთან. დადგინდა ერთ ფიჭის პარამეტრების ცვლილების გავლენა მთლიანი სისტემის ხარისხის მაჩვენებლებზე და მოხდა მისი ფორმულირება საუკეთესო ალგორითმის საპოვნელად. საბოლოოდ განვიხილეთ არსებული ACP ალგორითმები და მათი გამოყენებით შევიმუშავეთ ახალი ბინინგის ალგორითმი, რომლის საშუალებით მოვახდინეთ იტერაციების რაოდენობის შემცირება, რომელიც თავის მხრივ ეფექტურობის გაზრდას გულისხმობს. ნაშრომში ასევე განხილულია მე-4 და მე-5 თაობის მობილურ ტექნოლოგიებში გამოყენებული თვით-ოპტიმიზირებადი სისტემების ალგორითმი. მოძველებულ სისტემებში არსებული უხეში ძალის მეთოდი ძალიან არაეფექტური გახდა ქსელის ექსპონენტურად გაზრდის გამო, რომელიც ძალიან დიდ გამოთვლით რესურსს მოითხოვს და თითქმის შეუძლებელს ხდის პრობლემების დროულად აღმოჩენასა და მათზე რეაგირების მოხდენას. გეოლოკაციის ფაქტორის გამოყენებით შესაძლებელი ხდება პრობლემების ზუსტი ლოკალიზება, ხოლო აღმოჩენილი პოლიგონების გასაშუალოებული ხარისხის მაჩვენებლების სორტირება საშუალებას გვაძლევს წინასწარ დავადგინოთ და გამოვრიცხოთ პარამეტრების მნიშვნელობები, რომლებიც გააუარესებენ სისტემის ხარისხს. სიმულაციის შედეგმა სიგნალის საშუალო დონის უმნიშვნელო ცვლილების დროს გვაჩვენა ქსელის ხარისხის მნიშვნელოვანი გაუმჯობესება რაც თავისთავად გულისხმობს სპექტრული ეფექტურობის, გადმოტვირთვის სიჩქარისა და მომსახურების ხარისხის გაუმჯობესებას. ჩვენს მიერ ჩატარებულმა მოდელირებამ ასევე დაგვანახა, რომ ეს მეთოდი მნიშვნელოვნად ამცირებს იტერაციების რაოდენობას, ზრდის სისტემის სტაბილურობას, ამცირებს გამოთვლითი რესურსების დატვირთვას და ზრდის სისტემის ეფექტურობას. საშუალებას გვაძლევს ფოკუსირება მოვახდინოთ ფიჭებზე, რომლებიც განსაკუთრებით აუარესებენ ქსელის ხარისხობრივ მაჩვენებლებს. გაზრდილი ეფექტურობა ოპერატორებს ასევე მისცემს საშუალებას ავტომატურად და დროულად შეცვალონ ქსელის პარამეტრები.

## Abstract

In the dissertation we discussed the different geolocation algorithms, the effects of the different factors and developed new methods. The existing classic location detection methods use the signal level obtained from three or more base stations. We have developed a new method that needs only one station for geolocation which in fact increases its accuracy and flexibility. We also examined various measurement methods and their deviations, and found that the A-GPS method, which is an independent module, has the best accuracy, but does not belong 3GPP standard protocols and could not be directly transfer the information to the network elements. Because of this, we have developed a new application that measures predefines parameters and transmits them to a network database. The dissertation also offers the usage of smartphones measurements that are correlated with high-precision coordinates, in Self-Organized Network systems for quality improvement. Optimization of coverage in existing SON systems is mainly based on network quality indicators, as the location of each subscriber requires a very large computing resource for the entire system. We investigated and documented the effect of each parameter change on the whole system as an equation and integrated it to maximize network quality and load balancing. The modeling also showed that the new algorithm was able to unload congested base stations with the traffic redistribution at neighboring stations. Significant traffic reductions in congested cell were also achieved while minor increases detected at neighboring stations. In the dissertation, we discussed the possibility of using subscriber locations for radio packet schedulers and developed a new adaptive algorithm that can increase the flexibility of the module. We also looked at algorithms for different radio packet schedulers and compared them to our new geolocation based adaptive radio packet scheduler. The simulation revealed that the new algorithm uses the capacity of the system more efficiently. In the dissertation we also discussed the methods of processing chaotic information obtained from IOT sensors, where a new CEP method was developed, which uses the method of Machine Learning (ML), which improves the accuracy of the module by correlation of the actual events to the received information. In order to improve this information received from the sensors, the importance of the use of geolocation was also investigated, after which the method of determining the location in three-dimensional space without additional hardware provision was proposed. In the paper, we also discussed the possibility of improving the methods of Automated Cell Planning using geolocation and compared it with the existing methods. The influence of the parameter change for one cell to the whole system was investigated and formulated for finding the best algorithm. Also, we discussed the existing ACP algorithms and compared them to our new binning-based algorithm that reduced the number of iterations, which in turn increased its efficiency. The paper also discusses the algorithm of self-optimizing systems used in 4G and 5G mobile technologies. The brute force method that is used in existing ACP systems has become very inefficient due to the exponential increase of the

network elements, which requires very large computing resources and makes it almost impossible to detect problems in time and respond to them. Using the geolocation-based algorithm makes it possible to accurately locate the problems, rank them by different quality of service indicators that allows us to pre-determine and exclude the redundant cases that can degrade the quality of the system. The simulation results showed a significant improvement in network quality during a slight change in the mean signal level, which implies an improvement in spectral efficiency, download speed, and service quality. Our modeling has also shown that this method significantly reduces the number of iterations, increases the stability of the system, which is a key indicator of system efficiency. Increased efficiency allows us to focus on cells causing the network performance degradation and allow operators to automatically and timely adjust network settings.

## სარჩევი

88.

შესავალი.....	16
<b>1. გეოლოკაცია მობილურ ტექნოლოგიებში.....</b>	<b>23</b>
1.1. A-GPS მეთოდი.....	24
1.2. TA + AOA მეთოდი .....	26
1.3. ტრიანგულაციის მეთოდი .....	27
1.4. ტრილატერაციის მეთოდი.....	29
1.5. სექტორიზაციის მეთოდი .....	30
1.6. სტატისტიკური მეთოდი.....	31
1.7. TA + Cell_ID მეთოდი .....	31
1.8. კომბინირებული მეთოდი .....	32
1.9. მობილური მოწყობილობების ანათვლების მიღება საბაზო სადგურის ჩანაწერების მიხედვით.....	33
1.10. მობილური მოწყობილობების ანათვლების მიღება სმარტფონის ჩანაწერების მიხედვით.....	38
1.11. გეოლოკაციის ცდომილება .....	48
1.12. დასკვნა 1-ი თავის შედეგების მიხედვით.....	49
<b>2. გეოლოკაციის გამოყენება თვითორგანიზებადი ქსელში.....</b>	<b>51</b>
2.1. წყაროს სასურველი სიგნალის დონის ანგარიში .....	54
2.2. წყაროს ინტერფერენციის ანგარიში .....	55
2.3. მეზობელი სადგურების სასურველი დონის ანგარიში.....	58
2.4. მეზობელი სადგურების ინტერფერენციის ანგარიში.....	58
2.5. თვითორგანიზებადი ცვლილებების ალგორითმი .....	59
2.6. SON ქსელის პარამეტრების ცვლილებების სიმულაცია .....	60
2.7. დასკვნა მე-2 თავის შედეგების მიხედვით .....	71
<b>3. გეოლოკაციის გამოყენება რადიო პაკეტების დამგეგმავის ალგორითმებში .....</b>	<b>73</b>
3.1. დასკვნა მე-3 თავის შედეგების მიხედვით .....	82
<b>4. გეოლოკაციის გამოყენება IoT სისტემებში .....</b>	<b>84</b>
4.1. IoT არქიტექტურა.....	87



4.2. კომპლექსური შემთხვევების დამუშავების (CEP) მეთოდი .....	88
4.3. CEP არქიტექტურა .....	89
4.4. CEP მეთოდის გამოყენება IoT სისტემაში .....	90
4.5. CEP მეთოდის პრობლემები.....	91
4.6. IOT ინფორმაციის დამუშავების სტრუქტურა .....	92
4.7. IOT სენსორების ადგილმდებარეობის დადგენა .....	93
4.8. დასკვნა მე-4 თავის შედეგების მიხედვით .....	96
<b>5. გეოლოკაციის გამოყენება ფიჭების ავტომატურ დაგეგმარებაში .....</b>	<b>99</b>
5.1. ანტენის დახრილობით გამოწვეული სიგნალის დონის ცვლილების ანგარიში .....	103
5.2. სიმულაციის აღწერა.....	106
5.3. დასკვნა მე-5 თავის შედეგების მიხედვით .....	113
დასკვნა.....	114
გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხა.....	114

## ნახაზების ნუსხა

83.

ნახ. 1.1. A-GPS სისტემის სტრუქტურა.....	25
ნახ. 1.2. საბაზო სადგურიდან აბონენტამდე მანძილის გამოთვლა .....	26
ნახ. 1.3. აბონენტისაგან მიღებული სიგნალის დაცემის კუთხის ანგარიში ..	27
ნახ. 1.4. მარტივი ტრიანგულაცია.....	28
ნახ. 1.5. ტრილატერაციის მეთოდი .....	29
ნახ. 1.6. სექტორიზაციის მეთოდი.....	30
ნახ. 1.7. TA + Cell ID მეთოდი .....	32
ნახ. 1.8. CTR ჩანაწერის სტრუქტურა .....	35
ნახ. 1.9. ციფრული ჩანაწერის დეკოდირება.....	36
ნახ. 1.10. მსოფლიოს სმარტფონების გაყიდვები%.....	40
ნახ. 1.11. RIL დიაგრამა .....	41
ნახ. 1.12. სმარტფონის მიერ განხორციელებული ანათვლების ჩაწერის სტრუქტურა .....	45
ნახ. 1.13. სმარტფონის სიგნალის მახასიათებლების გასაზომი აპლიკაცია ..	45
ნახ. 1.14. რადიუსის ცდომილების განაწილება .....	49
ნახ. 2.1. ანტენის დახრილობა.....	64
ნახ. 2.2. მექანიკური და ელექტრონული ტილტის შედარება.....	64
ნახ. 2.3. არაბალანსირებული ტრაფიკის განაწილება ერთნაირი ანტენის დახრილობების შემთხვევაში.....	65
ნახ. 2.4. ანტენის მახასიათებლები და მიღებული სიგნალის დამოკიდებულება დახრის კუთხეზე.....	67
ნახ. 2.5. ცვლილება 1 .....	69
ნახ. 2.6. ცვლილება 2 .....	69
ნახ. 2.7. ცვლილება 3 .....	70
ნახ. 2.8. სიმულაციის შედეგი .....	70
ნახ. 2.9. SIR-ის შედარება ცვლილებამდე და ცვლილების შემდეგ .....	71
ნახ. 3.1. სისტემის გამტარუნარიანობის [Mbps] ხარისხთან [CQI] დამოკიდებულება .....	76
ნახ. 3.2. სისტემის სამართლიანობის მაჩვენებელთან დამოკიდებულების მრუდი.....	78

ნახ. 3.3. სისტემის დაყოვნების (Latency [ms]) CQI – ზე დამოკიდებულების გრაფიკი .....	79
ნახ. 3.4. სისტემის რესურსების გამოყენების ეფექტურობის CQI – ზე დამოკიდებულების გრაფიკი .....	80
ნახ. 4.1. IoT მონაცემების მახასიათებლები.....	86
ნახ. 4.2. კომპლექსური შემთხვევების დამუშავება .....	87
ნახ. 4.3. IoT არქიტექტურა.....	88
ნახ. 4.4. IOT სენსორები.....	89
ნახ. 4.5. CEP სისტემის არქიტექტურა .....	89
ნახ. 4.6. IOT გამოყენება .....	90
ნახ. 4.7. IOT ინფორმაციის დამუშავების სტრუქტურა .....	93
ნახ. 4.8. დაცემული კუთხის ანგარიში.....	94
ნახ. 5.1. ანტენის გამოსხივების დიაგრამა.....	103
ნახ. 5.2. სიმულაციისთვის განკუთვნილი კლასტერი.....	107
ნახ. 5.3. სიმულაციის შედეგი SINR გაუმჯობესება .....	110
ნახ. 5.4. სიმულაციის შედეგი, სიგნალის დონის გაუმჯობესება.....	110
ნახ. 5.5. სიმულაციის შედეგი: CQI-ის გაუმჯობესება .....	111
ნახ. 5.6. სიმულაციის შედეგი: ცუდი ბინების რაოდენობა.....	111
ნახ. 5.7. SIR-ის შედარება ცვლილებამდე და ცვლილების შემდეგ .....	112
ნახ. 5.8. ცვლილებების შედარება: ჰისტოგრამა .....	113

## ცხრილების ნუსხა

	83
ცხრილი 1.1. გეოლოკაციისთვის საჭირო პარამეტრები.....	38
ცხრილი 1.2. ანდროიდ ოპერაციული სისტემის ვერსიების სია .....	423
ცხრილი 1.3. სმარტფონის მიერ აღებული ანათვლების სია .....	43
ცხრილი 2.1. სიმულაციისთვის საჭირო სადგურების მონაცემები .....	602
ცხრილი 2.2. სიმულაციის პარამეტრები .....	680
ცხრილი 2.3. იტერაციის მნიშვნელობები .....	70
ცხრილი 3.1. APF ალგორითმის სიმულაციის პარამეტრები .....	75
ცხრილი 3.2. სისტემის გამტარუნარიანობის შედარება .....	76
ცხრილი 3.3. სისტემის სამართლიანობის შედარება.....	79
ცხრილი 3.4. სისტემის დაყოვნების შედარება .....	80
ცხრილი 3.5. სისტემის ტევადობის ეფექტურობა.....	81
ცხრილი 5.1. სიმულაციის პარამეტრები .....	107
ცხრილი 5.2. იტერაციის მნიშვნელობები .....	109
ცხრილი 5.3. სიმულაციის შედეგი .....	111

## გამოყენებული აბრევიატურების ნუსხა

3GPP	3rd Generation Partnership Project	მესამე თაობის პარტნიორობის პროექტი
AMC	Adaptation and Modulation Control	ადაპტაციის და მოდულაციის კონტროლი
APF	Adaptive Proportional Fair	ადაპტური პროპორციულ სამართლიანი
BET	Blind Equal Throughput	ბრმად თანაბარი გამტარუნარიანობა
BLER	Block Error Ratio	ბლოკების შეცდომების ალბათობა
CPICH	Common Pilot Channel	საერთო საპილოტო არხი
CQI	Channel Quality Indicator	არხის ხარისხის მაჩვენებელი
CRC	Cyclic Redundancy Check	სიჭარბის ციკლური შემოწმება
DCI	Downlink Control Information	დაღმავალი არხის საკონტროლო ინფორმაცია
DT	Drive Test	რადიო სიგნალის ტესტირება
eNB	Enhanced Node B	მეოთხე თაობის საბაზო სადგური
EPF	Enhanced Proportional Fair	გაუმჯობესებული პროპორციულ სამართლიანი
EXP	Exponential Algorithm	ექსპონენციალური ალგორითმი
GBR	Guaranteed Bit Rate	გარანტირებული ბიტების გადაცემის სიჩქარე
ICI	Inter Cell Interference	ფიჭათაშორისი ინტერფერენცია
IoT	Internet of Things	საგნების ინტერნეტი
ITU	International Telecommunication Union	ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო კავშირი
LTE	Long Term Evolution	ხანგრძლივი ევოლუციის ქსელი
MLF	Maximum Laxity First	მაქსიმალური მოდუნებისალგორითმი
MIMO	Multiple Input Multiple	მრავალი შესავალი მრავალი

	Output	გამოსავალი
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access	მულტიპლექსირება ორთოგონალური სიხშირული დაყოფით
PCI	Physical Cell Identifier	ფიზიკური ფიჭის განმსაზღვრელი
PRA	Pseudo Random Algorithm	ფსევდო შემთხვევითი განაწილების ალგორითმი
PRB	Physical Resource Block	ფიზიკური რესურს ბლოკები
PS	Packet Scheduler	პაკეტების დამგეგმავი
PSD	Power Spectral Density	სიმძლავრის სპექტრული სიმკვრივე
PF	Proportional Fair	პროპორციულ სამართლიანი
PUCCH	Physical UL Control Channel	ფიზიკური აღმავალი არხის საკონტროლო არხი
PUSCH	Physical UL Shared Channel	ფიზიკური აღმავალი არხის საზიარო არხი
QAM-16	Quadrature Amplitude Modulation	კვადრატული ამპლიტუდური მოდულაცია 16
QAM-64	Quadrature Amplitude Modulation	კვადრატული ამპლიტუდური მოდულაცია 64
QAM256	Quadrature Amplitude Modulation	პროპორციულკვადრატული ამპლიტუდური მოდულაცია 256
QoE	Quality of Experience	ხარისხის აღქმადობა
QoS	Quality of Service	მომსახურების ხარისხი
RAC	Radio Access Control	რადიო შეღწევის კონტროლი
RAN	Radio Access Network	რადიო შეღწევის ქსელი
RE	Resource Element	რესურსის ელემენტი
RF	Radio Frequency	რადიო სიხშირე
RLC	Radio Link Control	რადიო არხის კონტროლი
RR	Round Robin	რაუნდ რობინი
RS	Reference Signal	საკონტროლო სიგნალი

RSCP	Received Signal Code Power	მიღებული სიგნალის კოდის სიმძლავრე
RSRP	Reference Signal Received Power	მიღებული საკონტროლო სიგნალის სიმძლავრე
RSRQ	Reference Signal Received Quality	მიღებული საკონტროლო სიგნალის ხარისხი
RSSI	Received Signal Strength Indicator	მიღებული სიგნალის სიძლიერის ინდიკატორი
SINR	Signal to Noise and Interference Ratio	სიგნალის ხმაურზე და ინტერფერენციაზე თანაფარდობა
SON	Self Organization Network	თვითორგანიზებადი ქსელი
S-SCH	Secondary Synchronization Channel	მეორადი სინქრონიზაციის არხი
SSS	Secondary Synchronization Signal	მეორადი სინქრონიზაციის სიგნალი
TTI	Transmission Time Interval	გადასაცემი დროითი ინტერვალი

## შესავალი

მობილური ტელეკომუნიკაციის ახალ, ისევე როგორც ძველ სერვისებში მთავარ მოთხოვნად რჩება აბონენტთა ადგილმდებარეობის განსაზღვრა. იგი ხელს უწყობს და განაპირობებს ადგილმდებარეობაზე დაფუძნებული აპლიკაციების წარმატებულ მუშაობას. მომხმარებლებს შეუძლიათ გამოიყენონ მობილური ტელეფონები ამინდის პროგნოზის დასადგენად, ნავიგაციისთვის, გზებზე მოძრაობის შეფერხებისა და სოციალურ ქსელში ახლოს მყოფი მეგობრების აღმოსაჩენად. ყველა ეს მომსახურება მოითხოვს აბონენტის მობილური გადამცემის (MS) მდებარეობის ზუსტ განსაზღვრას.

აბონენტის ადგილმდებარეობის დადგენა უმნიშვნელოვანესია კრიმინალური, ჯანდაცვისა და სამაშველო სტრუქტურებისათვის, რათა დროულად მოხდეს სასწრაფო დახმარების აღმოჩენა აბონენტთათვის, რომლებიც ვერ ასახელებენ ზუსტ ლოკაციას. ასეთ შემთხვევაში გეოლოკაცია ყველაზე სწრაფ და ეფექტურ როლს ასრულებს საუკეთესო შედეგის მისაღწევად. მობილური ტელეფონით განხორციელებული ზარების ადგილმდებარეობები აქტიურადაა გამოყენებული კრიმინალური გამოძიების სამსახურებში და თითქმის 60%-ით გააუმჯობესა გახსნილი საქმეების რაოდენობა.

2003 წელს ამერიკის შეერთებული შტატების კონგრესის დადგენილებით [1] აუცილებელი გახდა, რომ 911-ის მიმართულებით განხორციელებული ყველა ზარისთვის დადგენილიყო მათი ზუსტი ადგილმდებარეობა. 2009 წელს, ასევე ამერიკის შეერთებული შტატების მარეგულირებელმა კომისიამ უსაფრთხოების სამსახურთან ერთად დაამტკიცა გეგმა, რომელიც გულისხმობდა 700 მეგაჰერცი სიხშირული ზოლის გამოყენებას სახალხო უსაფრთხოების სამსახურების მიერ [2], რომელიც თავისთავად გამოიყენებდა LTE ტექნოლოგიას მომსახურე პერსონალისა და აბონენტების კავშირისათვის და მათი ზუსტი ადგილმდებარეობის დასადგენად.



გეოლოკაციის მეთოდებით ქსელის ხარისხის შემოწმება და კონკურენტებთან შედარება უფრო და უფრო მეტი პოპულარობით გამოიყენება მობილური კავშირის მომსახურების მომწოდებელ კომპანიებში. ეს მეთოდი გაცილებით უფრო იაფი და სწრაფი საშუალებაა მის წინამორბედ დრაივტესტთან შედარებით, რადგანაც არ ითხოვს სპეციალური ტექნიკური საშუალებებით აღჭურვილ ავტომობილსა და კვალიფიციურ ტექნიკურ პერსონალს სიგნალის ზუსტი დონის დასადგენად. მისი საშუალებით შესაძლებელია დროულად გამოვლინდეს პრობლემური ადგილები და აღარ არის საჭირო დრაივტესტის მუშაობის დასრულებისთვის ლოდინი.

აბონენტთა ზუსტი გეოლოკაცია აუცილებელია თვითორგანიზებული ქსელის (SON Self-Organized Network) სწორი მუშაობისთვის. მისი საშუალებით შესაძლებელი ხდება დადგინდეს აბონენტთა რაოდენობის მაღალი კონცენტრაციის ადგილმდებარეობა და მოხდეს საბაზო სადგურის პარამეტრების ცვლილებები ქსელის მუშაობის ხარისხის გაუმჯობესების მიზნით.

მოწყობილობების ადგილმდებარეობის ზუსტი განსაზღვრა ერთერთი აუცილებელი წინაპირობაა IoT (Internet of Things) ფუნქციონირებისათვის, რომელიც დღითიდღე იზრდება და იპყრობს სხვადასხვა სფეროს. ექსპერტთა შეფასებით, 2025 წლისთვის დაახლოებით 35 მილიარდამდე მოწყობილობა იქნება ჩართული და დაკავშირებული IoT ქსელში.

მობილური ქსელის მართვისა და ოპერირების დროს აუცილებელი ხდება სხვადასხვა ოპტიმიზაციისა თუ დაგეგმარების რთული ამოცანის გადაწყვეტა. თუ გავითვალისწინებთ თანამედროვე აბონენტების მზარდი მოთხოვნების დასაკმაყოფილებლად გაშვებულ სხვადასხვა სიხშირეებისა და გადამტანების ექსპონენტურად გაზრდილ რაოდენობას, რომელიც თავის მხვრივ იწვევს ამ საბაზო სადგურების გავრცელების არეალის ერთმანეთთან გადაფარვას და გადაკვეთას, ამ ამოცანების ამოხსნა თითქმის შეუძლებელი ხდება გამომთვლელი სისტემებისა და ოპტიმალური

ალგორითმების გარეშე. ამის შედეგია ის, რომ მობილური ქსელის ოპერატორები განსაკუთრებულ ყურადღებას აქცევენ ავტომატური პარამეტრების ცვლილებების სისტემების დანერგვას, რომლებიც საშუალებას იძლევა გაზარდოს ქსელის ხარისხი და ამავდროულად შეამციროს ოპერირების ხარჯები. მე-2 და მე-3 თაობის სისტემებისგან განსხვავებით, მე-4 და მე-5 თაობის ქსელში მეზობელი სექტორები ერთმანეთთან ყველაზე მეტად ინტერფერირებენ, რაც ძალიან მნიშვნელოვანს ხდის საბაზო სადგურების ტევადობისა და პარამეტრების ოპტიმიზაციის მეთოდების დახვეწას, რომლის ხარჯზეც შესაძლებელი ხდება სპექტრის ეფექტურობისა და მომსახურების ხარისხის გაუმჯობესება.

ანტენის გამოსხივების დახრილობის ან სიმძლავრის რეგულირება ტექნიკურად ძალიან ადვილია, მაგრამ, ამისათვის საჭიროა ოპტიმალური პარამეტრების პოვნა. ამ ამოცანის გადაწყვეტილება გაცილებით გაგვიადვილდება თუ გავითვალისწინებთ აბონენტების ადგილმდებარეობას, რადგანაც მას ძალიან დიდი გავლენა აქვს ფიჭის საერთო ინტერფერენციისა და ხმაურის დონეზე, განსაკუთრებით კი მომხმარებლებს, რომლებიც იმყოფებიან ფიჭის კიდესთან, რადგანაც მათ უფრო მეტი სიმძლავრის გასხივება სჭირდებათ, რათა გადააჭარბონ ინტერფერენციის დონეს და დაამყარონ კავშირი მომსახურე საბაზო სადგურთან. ამის გამო, ფიჭის საზღვრისა და მისი აქტუალური პოლიგონის დადგენა უნდა მოხდეს სექტორის ფიზიკური და პროგრამული პარამეტრების ოპტიმიზაციით. ზემოთ აღწერილი პრობლემების და მონაცემების საფუძველზე, ფიჭის დაფარვის დაგეგმარება შესაძლებელია ფორმულირდეს, როგორც დიდი ზომის, განუყოფელი, მრავალცვლადიანი განტოლება.

მობილური ქსელის ოპერატორები ყოველწლიურად ცდილობენ, რომ დააკმაყოფილონ თანამედროვე მომხმარებლების მზარდი მოთხოვნები და გამოყენაბში გაუშვან სხვადასხვა სიხშირეები და გადამტანები, რაც თავისთავად იწვევს საბაზო სადგურების და სადგურებზე არსებული

სექტორების რაოდენობის ექსპონენტურ ზრდას. ამ სექტორების ერთმანეთთან გადაფარვა და გადაკვეთა იწვევს ქსელის ხარისხის გაუარესებას. სისტემის მასშტაბურობისა და კომპლექსური სტრუქტურის გამო თითქმის შეუძლებელია ამ პრობლემების სათითაოდ აღმოჩენა და მათზე რეაგირების მოხდენა, რადგანაც ასეთი პრობლემების გამოკვლევა უზარმაზარ რესურსს მოითხოვს. ამიტომაც, სულ უფრო მეტი ოპერატორი ნერგავს სისტემებს, რომლებსაც შეუძლიათ ავტომატურად შეცვალონ ქსელის პარამეტრები და გააუმჯობესონ ქსელის ხარისხი. ასეთი სისტემების შესწავლა ხდება Self-Organizing Networks (SON) და Coverage and Capacity Optimization (CCO) მიმართულებებით.

GSM და UMTS სისტემებისგან განსხვავებით, LTE ქსელში ახლოს მდებარე სექტორები ყველაზე მეტად განიცდიან ერთმანეთის მიმართ ინტერფერირებას, ამის გამო ფიჭის ტევადობისა და ფიზიკური პარამეტრების ოპტიმიზაცია ძალიან მნიშვნელოვანია სპექტრის ეფექტურობის გაზრდისათვის. ანტენის დახრილობის ან გამოსხივების სიმძლავრის ცვლილება ტექნიკურად ძალიან ადვილია, რადგანაც ამისათვის მხოლოდ მარტივი ბრძანების გაშვება ან კონფიგურაციის ფაილის ცვლილებაა საჭირო. თუმცა, მთავარი პრობლემა არის ოპტიმალური სიმძლავრის ან ანტენის დახრილობის პოვნა, რადგანაც თუ მაღალი სიმძლავრის მქონე საბაზო სადგური უკეთეს მომსახურების ხარისხს აწვდის თავისი დაფარვის ზონაში, ის ასევე მაღალ ინტერფერენციას უქმნის გარშემო სადგურებს და გაცილებით ცუდი შედეგი შეიძლება მივიღოთ რეგიონალურ დონეზე.

ამ ნაშრომში აღწერილია CTRs (Cell Trace Records) დეკოდირების საშუალებით ადგილმდებარეობა დადგენილი მომხმარებლების მონაცემების მიხედვით მოდელირებული იტერაციები, რომელიც აღმოაჩენს გადაფარვისა და გადაკვეთის ზონებს, გამოითვლის ოპტიმალურ ანტენის დახრილობასა თუ სიმძლავრის მნიშვნელობებს მისი გამოსხივების დიაგრამისა და რელიეფის პროფილის გათვალისწინებით იმ პირობით, რომ

კარგი პირობების მქონე მომხმარებლების რაოდენობა რეგიონალურ დონეზე იყოს მაქსიმალური. ამის განხორციელებისათვის საჭიროა თითოეული ფიჭისათვის საუკეთესო დიზაინის მოდელირება და სიმძლავრის, მიმართულების და დახრილობის ინდივიდუალური მნიშვნელობების პოვნა.

დღესდღეობით, მობილური ქსელის ელემენტების ძირითადი ნაწილის დაკონფიგურირება ჯერ კიდევ ხელით ხდება. თუ გავითვალისწინებთ იმას, რომ ამ პარამეტრების დაგეგმვა, გაშვება, კონფიგურაცია, ინტეგრაცია და მართვა პირდაპირ კავშირშია ქსელის ხარისხიან მუშაობასთან, მობილური ქსელის ოპერატორები ძალიან დიდ რესურსებსა და ფინანსებს ხარჯავენ მასში. ასევე, იმისათვის, რომ დააკმაყოფილონ თანამედროვე აბონენტების მზარდი მოთხოვნები, აუცილებელი ხდება სხვადასხვა სიხშირეებისა და გადამტანების გაშვება. გაზრდილი საბაზო სადგურების და სექტორების რაოდენობა იწვევს ამ სექტორების ერთმანეთთან გადაფარვას და გადაკვეთას, რომელიც აუარესებს ქსელის ხარისხს. როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ, სისტემის კომპლექსური სტრუქტურის გამო ამ პრობლემების სათითაოდ აღმოჩენა და მათი ხელით შესწორება ძალიან დიდ რესურსებთანაა დაკავშირებული. ამის გამო, მობილური ქსელის ოპერატორები ცდილობენ განავითარონ და დანერგონ სისტემები, რომლებიც უზრუნველყოფენ ქსელის პარამეტრების ავტომატურ ცვლილებას და ქსელის ხარისხის გაუმჯობესებას. აღსანიშნავია ისიც, რომ ნებისმიერი სახის ავტომატიზაცია მნიშვნელოვნად ამცირებს ქსელის მუშაობის ხარჯებს (operational expenses - OPEX). ასეთი სისტემების ერთერთი მთავარი დარგია თვით-ოპტიმიზირებადი ქსელი (Self-Optimizing Networks - SON).

3GPP ორგანიზაციამ ჯერ კიდევ მე-8 გამოცემაში (2008 წ.) შეიმუშავა გარკვეული სტანდარტები LTE ქსელის თვით-ოპტიმიზირებად და თვით-ორგანიზებად ფუნქციების შესახებ [3]. ეს სტანდარტები თანდათან დაიხვეწა, გაფართოვდა და დღესდღეობით მოიცავს შემდეგ ფუნქციებს:

- ავტომატური ინვენტარიზაცია
- ავტომატური პროგრამული უზრუნველყოფა ჩამოტვირთვა
- ავტომატური მეზობელი ურთიერთობა (ANR)
- ავტომატური PCI განაწილება
- მობილობის სიმტკიცე / გადაადგილების ოპტიმიზაცია (MRO)
- შემთხვევითი წვდომის არხი (RACH) ოპტიმიზაცია
- დატვირთვის ბალანსირების ოპტიმიზაციის (LBO)
- ინტერ-სექტორ ინტერფერენციის კოორდინაცია (ICIC)
- დაფარვისა და ტევადობის ოპტიმიზაცია (CCO)
- ინტენსიური ინტერ-სექტორ ინტერფერენციის კოორდინაცია (eICIC)
- სადგურის გათიშვის აღმოჩენა და კომპენსაცია
- თვით-გაუმჯობესების ფუნქციები
- დრაივ ტესტის მინიმიზაცია
- ენერჯის დაზოგვა
- ავტომატური საბაზო სადგურების მეზობლების შერჩევა
- დაფარვისა და შესაძლებლობების ოპტიმიზაცია
- ენერჯის დაზოგვა
- სხვადასხვა სამოქმედო ფუნქციებს შორის კოორდინაცია

ზემოთ ჩამოთვლილი მეთოდებიდან ყველაზე მეტი ყურადღება დაფარვისა და ტევადობის ოპტიმიზაციას (CCO) ეთმობა, რადგანაც, LTE ქსელში ახლოს მდებარე სექტორები ყველაზე მეტად განიცდიან ერთმანეთის მიმართ ინტერფერირებას, ამის გამო საბაზო სადგურის ტევადობისა და პარამეტრების ოპტიმიზაცია ძალიან მნიშვნელოვანია სპექტრის ეფექტურობის გაზრდისათვის. ანტენის დახრილობის ან გამოსხივების სიმძლავრის ცვლილება ტექნიკურად ძალიან ადვილია, რადგანაც ამისათვის მხოლოდ მარტივი ბრძანების გაშვება ან კონფიგურაციის ფაილის ცვლილებაა საჭირო. თუმცა, მთავარი პრობლემა არის ოპტიმალური სიმძლავრის ან ანტენის დახრილობის პოვნა, რადგანაც თუ მაღალი სიმძლავრის მქონე საბაზო სადგური უკეთეს მომსახურების

ხარისხს აწვდის თავისი დაფარვის ზონაში, ის ასევე მაღალ ინერფერენციას უქმნის გარშემო სადგურებს და გაცილებით ცუდი შედეგი შეიძლება მივიღოთ რეგიონალურ დონეზე.

ამ ამოცანის გადაწყვეტილება გაცილებით გაგვიადვილდება თუ გავითვალისწინებთ აბონენტების ადგილმდებარეობას, რადგანაც მას ძალიან დიდი გავლენა აქვს ფიჭის საერთო ინტერფერენციისა და ხმაურის დონეზე, განსაკუთრებით კი მომხმარებლებს, რომლებიც იმყოფებიან ფიჭის კიდესთან, რადგანაც მათ უფრო მეტი სიმძლავრის გასხივება სჭირდებათ, რათა გადააჭარბონ ინტერფერენციის დონეს და დაამყარონ კავშირი მომსახურე საბაზო სადგურთან. ამის გამო, ფიჭის საზღვრისა და მისი აქტუალური პოლიგონის დადგენა უნდა მოხდეს სექტორის ფიზიკური და პროგრამული პარამეტრების ოპტიმიზაციით. ზემოთ აღწერილი პრობლემების და მონაცემების საფუძველზე, ფიჭის დაფარვის დაგეგმარება შესაძლებელია ფორმულირდეს როგორც დიდი ზომის, განუყოფელი, მრავალ ცვლადიანი განტოლება.

## 1. გეოლოკაცია მობილურ ტექნოლოგიებში

უკაბელო მოწყობილობების ადგილმდებარეობის განსაზღვრის მეთოდები იყოფა ორ ძირითად კატეგორიად. პირველ კატეგორიაში შედიან მობილური მოწყობილობები, რომლებიც თავად შეიცავენ ლოკაციის დადგენის უნარს (GPS, A-GPS). ამ დროს ადგილმდებარეობის განსაზღვრა ხდება მობილურ ტელეფონში მოთავსებული GPS მოწყობილობის მეშვეობით და შემდგომ ხდება გრძედისა და განედის გადაცემა პაკეტური მონაცემების საშუალებით [4]. GPS ტექნოლოგიით განსაზღვრული ადგილმდებარეობის სიზუსტე ძალიან მაღალია და შესაძლებლობას გვაძლევს სანტიმეტრის ცდომილებით გამოვთვალოთ სამ განზომილებიან სივრცეში მისი მდებარეობა. ამ მეთოდის ნეგატიურ მხარედ რჩება სატელიტებთან პირდაპირი ხედვის აუცილებლობა, რომელიც თითქმის შეუძლებელს ხდის დახურულ შენობებში მის გამოყენებას [5]. ასევე შესაბამისი აპარატურული და პროგრამული უზრუნველყოფის დახმარებით, მომხმარებლებს შეუძლიათ GPS ფუნქციის გათიშვა და მცდარი მონაცემების მიწოდება, რათა შეცდომაში შეიყვანონ ლოკაციაზე დაფუძნებული სისტემები. აღსანიშნავია GPS-ის მიერ დიდი რაოდენობით ელექტრო ენერჯის მოხმარება, რომელიც ამცირებს მობილურის კვების წყაროს სიცოცხლისუნარიანობას. აგრეთვე დაბალ ფასიან მობილური ტელეფონების მნიშვნელოვან ნაწილს საერთოდ არ გააჩნიათ GPS მოდული, რადგანაც მისი წარმოება საკმაოდ ძვირი ჯდება.

ზემოთ ჩამოთვლილი უარყოფითი მხარეების გამო აუცილებელი გახდა ადგილმდებარეობის დადგენის ალტერნატიული საშუალებების დანერგვა, რომლებიც ერთიანდებიან ქსელზე დაფუძნებულ გეოლოკაციის კატეგორიაში. მართალია, ამ მეთოდების ცდომილება გაცილებით ჩამორჩება GPS ტექნოლოგიას, თუმცა საგრძნობლად ამცირებს ხარჯებს, არ მოითხოვს დიდი რაოდენობით ელექტრო ენერჯიას, არ არის

დამოკიდებული აპარატურის მოდელზე, არ საჭიროებს პირდაპირ ხედვას და პაკეტების გადაცემას.

მოდრავი რადიო მოწყობილობის ადგილმდებარეობის გასაგებად გამოიყენება შემდეგი პარამეტრები [6]: მიღებული სიგნალის დონის ინდიკატორი (RSSI), მიღებული სიგნალის კუთხე (AOA), გადაცემასა და მიღებას შორის დროის სხვაობა (TDOA), გადაცემასა და მიღებას შორის სიხშირის სხვაობა (FDOA), ორმხრივი გზის დაყოვნება (RTT) და სხვა. აუცილებლად გასათვალისწინებელია მრავალ-სხივიანი სიგნალის გავრცელების დროს სწრაფი და რელეის მიღების ეფექტი, რის გამოც მიღებული სიგნალის დონის მანძილზე დამოკიდებულების სიზუსტე მცირდება. FDOA ძირითადად გამოიყენება საავიაციო სფეროში, სადაც მოძრაობის სიჩქარე მაღალია და დოპლერის ეფექტი შესამჩნევია. რადგანაც მობილური მოწყობილობების გადაადგილების სიჩქარე გაცილებით დაბალია მისი გამოყენება ნაკლებად თავსებადია სახმელეთო გეოლოკაციისათვის. ზემოთ აღწერილი მიზეზების გამო LTE ტექნოლოგიაში, აბონენტის ადგილმდებარეობის განსაზღვრისათვის საუკეთესო საშუალებად რჩება სიგნალის დაყოვნების, დაცემული კუთხისა და მათი კომბინირებული მეთოდები.

LTE ტექნოლოგიაზე დაფუძნებულ სისტემებში საბაზო სადგურიდან აბონენტამდე მანძილის გამოსათვლელად გამოიყენება დროში წანცვლების მეთოდი (TA) . მრავალი სხვადასხვა ანძიდან ამ რადიუსების გადაკვეთა განსაზღვრავს აბონენტის მიახლოებით ადგილმდებარეობას.

## 1.1 A-GPS მეთოდი

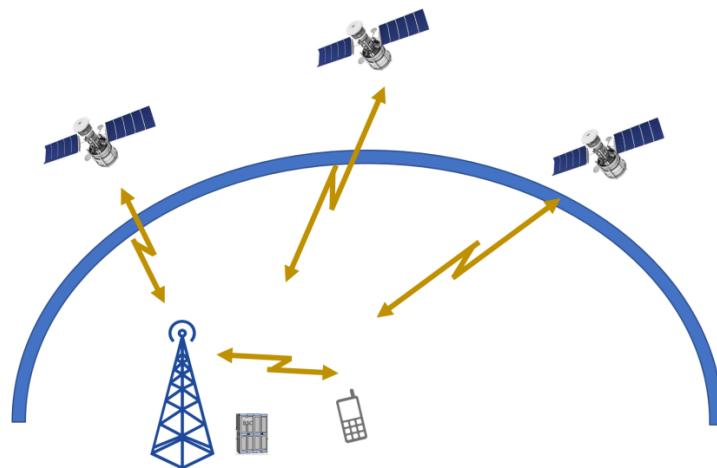
GPS სისტემის ფუნქციონირებისთვის ესაჭიროება ჰორიზონტზე ხილვადი ხელოვნური თანამგზავრების ორბიტების მონაცემები და მათთან სინქრონიზაცია. რადგანაც ეს საკმაოდ რთულად გამოსათვლელი პროცედურაა პირველადი ლოკაციის (TTFF) დადგენას, რომელსაც ხშირად ცივ სტარტსაც უწოდებენ [6], დაახლოებით 30 წამიდან რამდენიმე წუთამდე



სჭიდება და დამოკიდებულია ადგილმდებარეობაზე, ინტერფერენციის დონესა და თანამგზავრიდან მოსული სიგნალის დაცემის კუთხეზე. შესაბამისად, ღია სივრცეში უფრო სწრაფად ხდება ლოკაციის დადგენა ვიდრე მთიან ადგილებსა და ქალაქებში, სადაც შენობებია ხელის შემშლელი.

GPS სისტემისგან განსხვავებით A-GPS ტექნოლოგიისთვის მთელი ეს პროცესი გაცილებით უფრო სწრაფია. ფიჭური ქსელის საბაზო სადგურებში ერთმანეთთან სინქრონიზაციისთვის გამოყენებულია GPS მოდულები, რომლებიც მუდმივად იღებენ ინფორმაციას თანამგზავრიდან, ასრულებენ რთულ გამოთვლებს და მოთხოვნის შესაბამისად გადასცემენ მობილურ ტელეფონს. ქვემოთ ჩამოთვლილია მისი უპირატესობები:

- ლოკაციის უფრო სწრაფი მიღება
- მოწყობილობის მიერ ელექტრო ენერჯის ნაკლები დანახარჯი
- ელექტრომოწყობილობის კვების წყაროს უკეთესი სიცოცხლისუნარიანობა
- ლოკაციის დადგენა დახურულ სივრცესა და არაოპტიმალურ პირობებში



ნახ.1.1. A-GPS სისტემის სტრუქტურა

არსებობს სამი სახის კონფიგურაცია aGPS- ისთვის:

- ავტონომიური - როდესაც მოწყობილობას არ აქვს წვდომა მობილურ ქსელთან და იყენებს მხოლოდ GPS სიგნალს ლოკაციის დასადგენად

- ქსელზე დაფუძნებული - როცა მოწყობილობა დაკავშირებულია მხოლოდ ქსელთან და ადგილმდებარეობას ადგენს საბაზო სადგურების ლოკაციის მიხედვით.
- ჰიბრიდული - როდესაც მოწყობილობა დაკავშირებულია ქსელთან, იყენებს GPS სიგნალს და აგრეთვე ქსელიდან ლოკაციის სიგნალს. შემდეგ გადასცემს სერვერს, რომელიც ლოკაციის დასადგენად ითვლის ტელეფონიდან ანძაზე გადაცემული სიგნალის სიმძლავრეს.

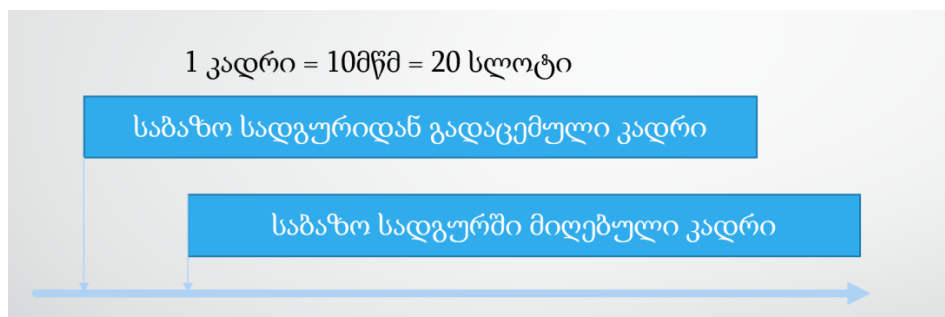
## 1.2 TA + AOA მეთოდი

TA + AOA მეთოდის უპირატესობას განაპირობებს ლოკაციის დადგენა შესაძლებლობა [7] მხოლოდ ერთი სექტორის შემთხვევაში. 64X64 M-MIMO დროს მისი სიზუსტე კიდევ უფრო იმატებს და ასევე შესაძლებელი ხდება მომხმარებლის ვერტიკალური კოორდინატის დადგენა. აბონენტის გრძედისა და განედის გამოსაანგარიშებელი ფორმულები კი მოცემულია ქვემოთ:

$$X = X_1 + TA * SIN(AOA) \quad (1.1)$$

$$Y = Y_1 + TA * COS(AOA) \quad (1.2)$$

სადაც,  $X_1$  და  $Y_1$  არის საბაზო სადგურის კოორდინატები,  $TA$  - ფიჭიდან მომხმარებლამდე მანძილი, ხოლო  $AOA$  კი არის დაცემული კუთხე. ნახ. 1.2 - ზე გამოსახულია გადაცემულსა და მიღებულ კადრებს შორის სხვაობის ანგარიში.



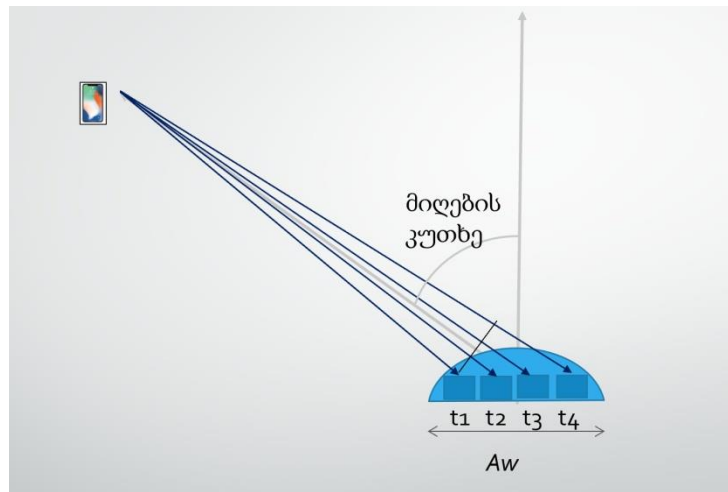
ნახ.1.2. საბაზო სადგურიდან აბონენტამდე მანძილის გამოთვლა

მათ შორის სხვაობით გამოყენებით საბაზო სადგურამდე აბონენტის დაშორების ანგარიში ხდება შემდეგი ფორმულით [8]:

$$\text{Dist} = C \times N_{TA} = TA \times 300000 \times 8 / 30720 = TA \times 78.12 \quad (1.3)$$

საბაზო სადგურის ანტენიდან აბონენტის მიმართულების დადგენა ხდება შემდეგი ფორმულით:

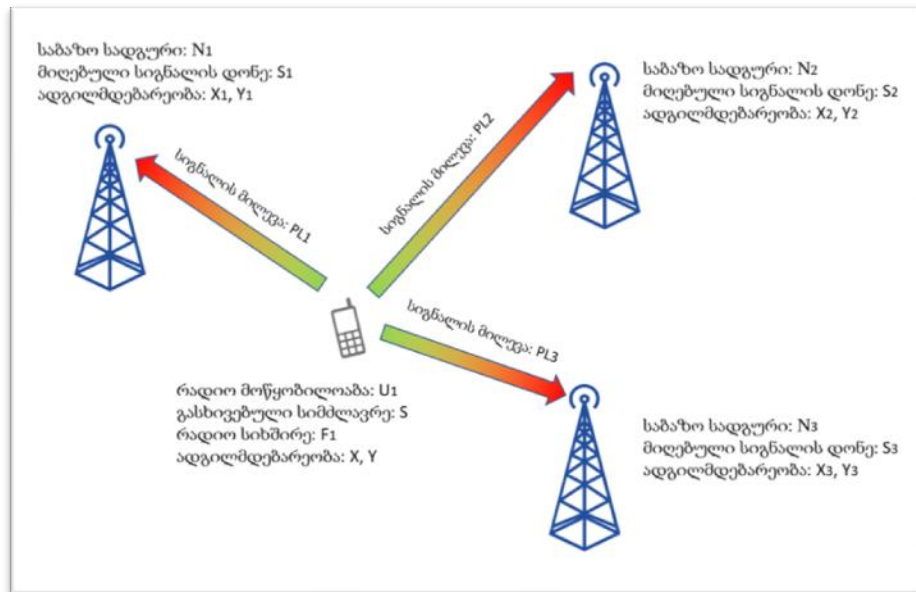
$$\text{AOA} = \arccos(C \times Dt / Aw) \quad (1.4)$$



ნახ.1.3. აბონენტისაგან მიღებული სიგნალის დაცემის კუთხის ანგარიში

### 1.3 ტრიანგულაციის მეთოდი

მარტივი ტრიანგულაციის მეთოდის დროს გამოიყენება სამი ან მეტი საბაზო სადგურიდან მიღებული სიგნალის დონის ანათვლები. აბონენტის ადგილმდებარეობის დასადგენად საკმარისია საბაზო სადგურის კოორდინატების, მიღებული სიგნალის დონით აწონილი საშუალოს გამოთვლა. ამ მეთოდის გამოყენებისას დადგენილი ადგილმდებარეობის სიზუსტე დამოკიდებულია საბაზო სადგურების რაოდენობასა და მათ მიმართულებებზე ხოლო ცდომილება მერყეობს 150-300 მეტრის ფარგლებში.



ნახ.1.4. მარტივი ტრიანგულაცია

აბონენტის ადგილმდებარეობის კოორდინატები გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$X = \frac{X_1 * S_1 + X_2 * S_2 + X_3 * S_3}{S_1 + S_2 + S_3} \quad (1.5)$$

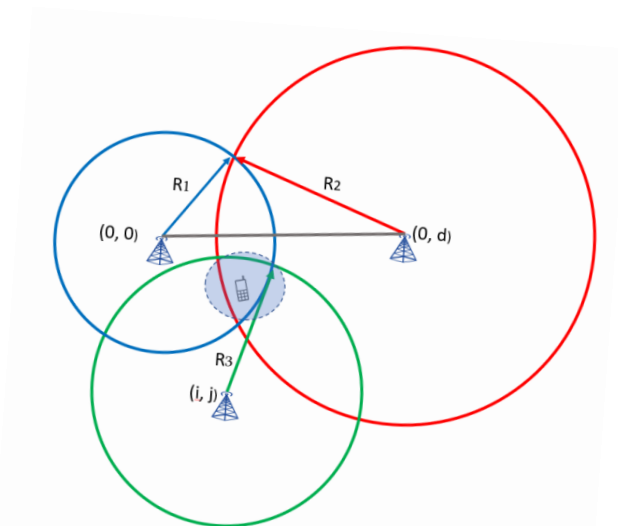
$$Y = \frac{Y_1 * S_1 + Y_2 * S_2 + Y_3 * S_3}{S_1 + S_2 + S_3} \quad (1.6)$$

სადაც, X არის მომხმარებლის გრძედი, Y არის მომხმარებლის განედი, X<sub>1</sub> - პირველი საბაზო სადგურის გრძედი, X<sub>2</sub> - მეორე საბაზო სადგურის გრძედი, X<sub>3</sub> - მესამე საბაზო სადგურის გრძედი, Y<sub>1</sub> - პირველი საბაზო სადგურის განედი, Y<sub>2</sub> - მეორე საბაზო სადგურის განედი, Y<sub>3</sub> - მესამე საბაზო სადგურის განედი, S<sub>1</sub> - პირველი საბაზო სადგურიდან გამოსხივებული სიგნალის დონე, S<sub>2</sub> - მეორე საბაზო სადგურიდან გამოსხივებული სიგნალის დონე, S<sub>3</sub> - მესამე საბაზო სადგურიდან გამოსხივებული სიგნალის დონე.

ამ მეთოდით გამოთვლილი ადგილმდებარეობის სიზუსტის შემდგომი გაუმჯობესება შესაძლებელია მიმართული ანტენების აზიმუტებისა და მათი მახასითებლების გათვალისწინებით. ამ დროს თითოეული სადგურიდან მოსული სიგნალის დონის ნორმალიზდება ატენის მიმართულებითა და გასხივების დიაგრამის შესაბამისად.

## 1.4 ტრილატერაციის მეთოდი

ტრილატერაციის მეთოდის გამოიყენება, მაშინ როდესაც ცნობილია სამი ან მეტი საბაზო სადგურიდან აბონენტამდე მანძილი. როგორც ზემოთ ავლინებთ, LTE ტექნოლოგიაზე დაფუძნებულ სისტემებში გადამცემიდან მიმღებამდე მანძილის გამოთვლა შესაძლებელია სიგნალის დროში წანაცვლების (TA) მეთოდის გამოყენებით. ამ დროს აბონენტის ადგილმდებარეობის დადგენა ხდება სადგურებზე შემოხაზული წრეების რადიუსის გადაკვეთის წერტილის პოვნით. გამოთვლების გამარტივების მიზნით, ერთერთი საბაზო სადგურის ადგილმდებარეობა მიჩნეულია დეკარტეს კოორდინატების საწყისად, ხოლო მეორე საბაზო სადგურთან შემაერთებული ხაზი მიუყვება აბსცისის ღერძს.



ნახ.1.5. ტრილატერაციის მეთოდი

პითაგორას თეორემაზე დაფუძნებული ფორმულების დახმარებით შეგვიძლია გამოვთვალოთ აბონენტის მიახლოებით გრძედი და განედი შემდეგნაირად:

$$X = \frac{R_1^2 - R_2^2 + d^2}{2 * d} \quad (1.7)$$

$$Y = \frac{\sqrt{R_1^2 * 4 * d^2 - (R_1^2 - R_2^2 + d^2)^2}}{2 * d} \quad (1.8)$$

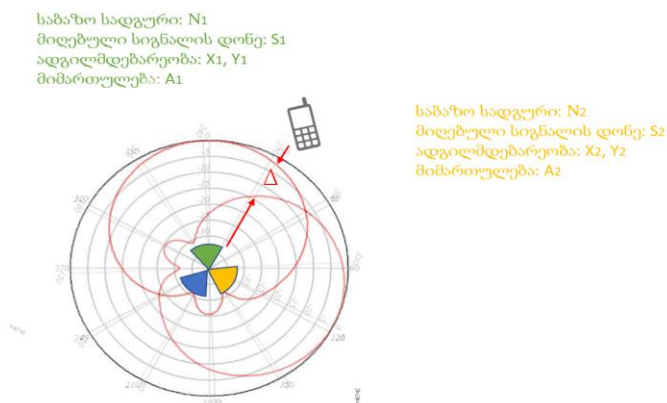
სადაც, X არის მომხმარებლის გრძედი, Y არის მომხმარებლის განედი, d - მანძილი პირველ და მეორე საბაზო სადგურს შორის, R<sub>1</sub> - მანძილი პირველი საბაზო სადგურისა და მომხმარებელს შორის, R<sub>2</sub> - მანძილი მეორე საბაზო სადგურისა და მომხმარებელს შორის, R<sub>3</sub> - მანძილი მესამე საბაზო სადგურისა და მომხმარებელს შორის.

### 1.5 სექტორიზაციის მეთოდი

ზემოთ აღწერილი ტრილტერაციისა და ტრიანგულაციის მეთოდებისგან განსხვავებით, სექტორიზაციის მეთოდის გამოყენებისას არ არის აუცილებელი 3 ან მეტი სხვადასხვა საბაზო სადგურიდან მიღებული სიგნალების არსებობა, მიმართულების დადგენა შესაძლებელია ერთიდაიგივე საბაზო სადგურის კუთვნილი ორი ფიჭისაგან მიღებული სიგნალის დონეების სხვაობითაც. ეს მეთოდი ეფუძნება პრინციპს, რომლის მიხედვითაც სიგნალთა შორის სხვაობა პირდაპირ პროპორციულია მოცემული ფიჭების ანტენის გაძლიერების სხვაობისა

$$D = G_1 - G_2 \tag{1.9}$$

მოცემული ფიჭების ანტენის მიმართულებებისა და მათ შორის არსებული D- სხვაობით შესაძლებელი ხდება აბონენტის საბაზო სადგურიდან მიმართულების პოვნა.



ნახ.1.6. სექტორიზაციის მეთოდი

ნახ. 1.6-ზე ნაჩვენებია ანტენის გამოსხივების დიაგრამების შედარების ილუსტრაცია. მიმართულების  $\alpha$  კუთხის პოვნის შემდეგ კი შესაძლებელი ხდება უშუალო კოორდინატების პოვნა:

$$X = X1 + Dist * \cos (\alpha) \quad (1.10)$$

$$Y = Y1 + Dist * \sin (\alpha) \quad (1.11)$$

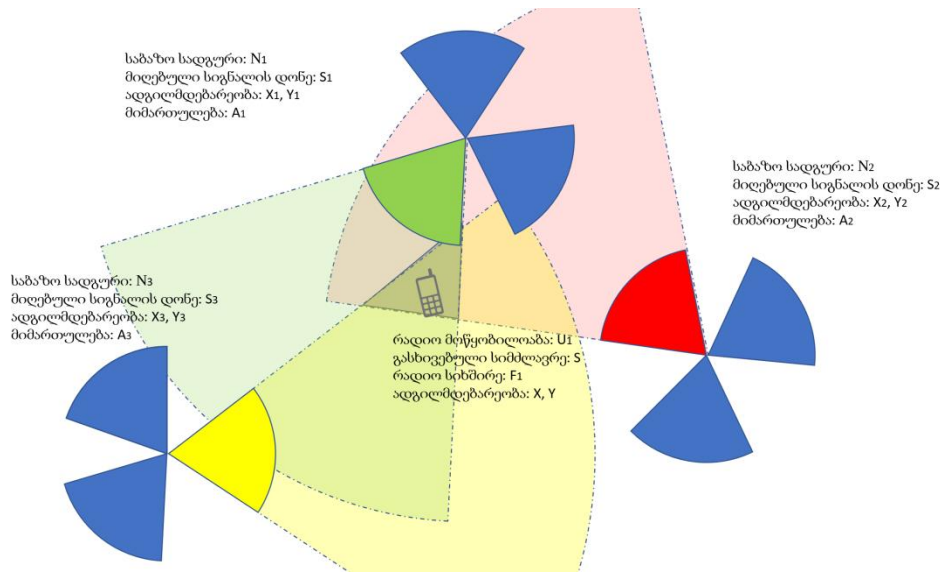
## 1.6 სტატისტიკური მეთოდი

სტატისტიკური მეთოდი ეფუძნება სხვადასხვა საბაზო სადგურიდან მოსული სიგნალის დონის ანათვალეების და მათი ადგილმდებარეობის მონაცემთა ბაზის შედგენას. მობილური ტელეფონის მიერ გაზომილი საბაზო სადგურების დონის წინასწარ გაზომილი ანათვალეებთან შედარების ყველაზე მეტად მიახლოებული წერტილის მოძებნა გულისხმობს მომხმარებლის ადგილმდებარეობის პოვნას. ამ პრინციპით მუშაობს Google's Location API, რომელსაც საკუთარი გეოლოკაციის ბაზა გააჩნია და ამ სტატისტიკურ მონაცემებზე დაყრდნობით საკმაოდ ზუსტად შეუძლია ადგილმდებარეობის დადგენა. ეს მონაცემები კი თავისთავად ეყრდნობა მობილური ქსელის ფიჭების, Wi-Fi წერტილებისა და GPS მოდულებისგან მიღებული მონაცემების ისტორიულ ჩანაწერებს. ის ყოველთვის მუშაობს საუკეთესო ძალისხმევის პრინციპის გამოყენებით ამის გამო მისი ადგილმდებარეობის დადგენის სიზუსტე გარანტირებული არ არის და დამოკიდებული არსებული სტატისტიკური მონაცემების ხარისხზე.

## 1.7 TA + Cell\_ID მეთოდი

TA+ CELL\_ID მეთოდი გამოიყენება მაშინ, როდესაც საბაზო სადგურზე არსებული ანტენების რაოდენობა მცირეა და არ გვეძლევა საშუალება გამოვთვალოთ დაცემული კუთხის მნიშვნელობა. ამ დროს მიმართულების დადგენა ხდება საბაზო სადგურის ანტენის აზიმუტისა და მისი დიაგრამის

ჰორიზონტალური გაშლის მიხედვით. მიმართულების სიზუსტის გაუმჯობესება შესაძლებელია ანტენის სიმულაციის მეშვეობით თუ ასევე ცნობილია აბონენტის სიგნალის დონე.



**ნახ.1.7. TA + Cell ID მეთოდი**

სურათზე ნაჩვენებია რადიუსების გადაფარვის ილუსტრაცია. ამ მიდგომის სრულყოფა, ცდომილების შემცირება და სიზუსტის გაზრდა ხდება მრავალი TA ანათვალის გასაშუალოების გზით [9].

### 1.8 კომბინირებული მეთოდი

ჩვენს მიერ შემუშავებული კომბინირებული მეთოდი იყენებს ყველა ზემოთ ჩამოთვლილ მეთოდს, რომლებიც დალაგებულნი არიან სიზუსტის მიხედვით: A-GPS, TA+AOA, ტრილატერაცია, ტრიანგულაცია, სექტორიზაცია, TA+CELL ID, რომელიც გულისხმობს, რომ თუ მოხერხდა აბონენტის ადგილმდებარეობის დადგენა ერთ-ერთი მეთოდით მისი გადამოწმება ხდება დანარჩენი მეთოდებითაც, რომელიც კიდევ უფრო აზუსტებს მიღებულ შედეგებს. მეთოდების მიმდევრობა მოცემულია ქვემოთ:



- A-GPS მეთოდი
- TA+AOA მეთოდი
- ტრილატერაციის მეთოდი
- ტრიანგულაციის მეთოდი
- სექტორიზაციის მეთოდი
- TA+CELL ID მეთოდი

ასევე აღსანიშნავია ის რომ თუ ლოკაციის დადგენა ხდება პირდაპირ რეჟიმში სხვადასხვა ალგორითმის გამოყენებამ შესაძლებელია მნიშვნელოვნად გაზარდოს გამოთვლის დრო. ამის გამო უმეტეს შემთხვევაში მეთოდების მიმდევრობა დალაგებულია გამოთვლის სიზუსტის ცდომილების სიმცირის მიხედვით და გამოთვლები წყდება პირველივე გეოლოკაციის დადგენის შემდეგ, თუ მისი სიზუსტე დამაკმაყოფილებელია წინასწარ დადგენილი მოცემულობით.

### **1.9 მობილური მოწყობილობების ანათვლების მიღება საბაზო სადგურის ჩანაწერების მიხედვით**

უსადენო მოწყობილობის საბაზო სადგურთან უწყვეტი და ხარისხიანი კავშირისათვის აუცილებელი არის მიღებული სიგნალის პერიოდულად ანათვლების აღება და მონიტორინგი. ეს ანათვლები გამოიყენება საბაზო სადგურის მიერ სხვადასხვა გადაწყვეტილების მიღების დროს. ერთი ფიჭიდან მეორეზე გადასვლის პირობების შემოწმებისას ხდება მომსახურე სექტორის სიგნალის დონის შედარება მის გარშემო მყოფი სადგურების მიმართებით და წინასწარ დადგენილი პირობის შესრულებისას ხდება მისი შესრულება. რა თქმა უნდა ამ დროს გადაწყვეტილების მიმღები არის საბაზო სადგური, ხოლო ანათვლების აღება ხორციელდება მობილური ტელეფონის მიერ. ანათვლების აღრიცხვა ხდება უსადენო მოწყობილობაში ინტეგრირებული სხვადასხვა სენსორებითა და მათემატიკური გამოთვლებით, რომლებიც წინასწარ გადაიცემა MIB (Master Information Block) და SIB (System information Block) საინფორმაციო ბლოკით.

გაზომილი მონაცემების კოდირება და გადაცემა ხდება 3GPP ორგანიზაციის მიერ მიღებული [10] და დამტკიცებული პროტოკოლებით. ეს წინასწარ შემუშავებული და განზოგადებული კოდირების წესები, რომლებიც ავალდებულებს ყველა მომწოდებლებს დაემორჩილოს მას, არის გარანტი იმისა, რომ სხვადასხვა კომპანიის მიერ წარმოებული მოწყობილობები უპრობლემოდ შესძლებენ ერთმანეთთან კავშირს და მონაცემთა გადაცემას.

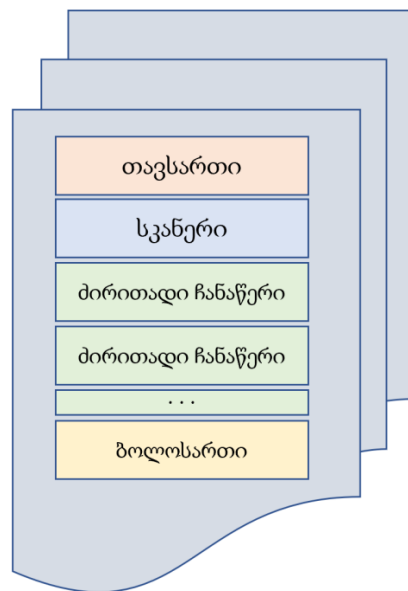
როგორც ზემოთ ავლნიშნეთ, მობილური ტელეფონის რადიო გადამცემის მოდული ინფორმაციის გადაცემის პარალელურად ახდენს საბაზო სადგურიდან მიღებული სიგნალის გაზომვებს, რომლებიც გადაიცემა სასიგნალო პაკეტების საშუალებით. ეს ანათვლები იყოფიან შემდეგ ჯგუფებად:

- INTERNAL - არასავალდებულო, დამატებითი პარამეტრები და წყვეტების, ბლოკებისა და გადასვლების მთვლელები
- UE - უსადენო მოწყობილობის მიერ შესრულებული უშუალო გაზომვები
- M3 - MME-დან (Mobility Management Entity) მიღებული მონაცემები
- RRC - რადიო რესურსების მართვისათვის საჭირო გაზომვები
- S1 - S1 ინტერფეისით განხორციელებული რადიო წვდომის გადამტანებისათვის საჭირო გაზომვები
- X2 - X2 ინტერფეისით განხორციელებული რადიო წვდომის გადამტანებისათვის საჭირო გაზომვები

ზემოთ მოყვანილი ჯგუფების კოდირება ხდება ASN.1 მეთოდით, რომელიც ძალიან დიდი ინფორმაციის ეფექტურად და შეკუმშულად გადაცემის საშუალებას იძლევა. მონაცემთა კომპრესიასა და მისი დეკოდირების სისწრაფეს კი ძალიან დიდი მნიშვნელობა აქვს ბევრი საბაზო სადგურების მქონე ქსელებში.

საბაზო სადგურის მიერ ჩაწერილი მონაცემები (CTR – Cell Trace Recordings) შეიცავს ზემოთ მოყვანილ შემთხვევებს. თითოეული განხორციელებული ზარის დროს აღებული ანათვლები გადადის

პერიოდული შედეგების ჩანაწერების (ROP – Result Output Period) ცალკეულ ფაილში, რომელიც დამოკიდებულია სამუშაო ჯგუფის ატრიბუტებზე. რაც შეეხება ROP- ის ხანგრძლივობას, იგი შესაძლებელია იყოს 15, 30 ან 60 წუთი. ეს ფაილები იქმნება და ინახება საბაზო სადგურის ფაილურ სისტემაში და მის შენახვის ხანგრძლივობა დამოკიდებულია ROP ფაილის ზომაზე. რაც შეეხება თვითონ ჩანაწერებს იგი შედგება თავსართიდან, რომელიც შეიცავს ადმინისტრაციულ ინფორმაციას, მონაცემთა ფაილები შედგება სხვადასხვა ჩანაწერებისგან. თითოეული ფაილი მოიცავს შემდეგ ჩანაწერებს: სათაური, ადმინისტრაციული ინფორმაცია და ინფორმაცია ჩანაწერის მასშტაბის შესახებ. სკანერი ინახავს ინფორმაციას მისი გააქტიურების შესახებ. შემდეგ კი მოდის უშუალო ჩანაწერები, რომლებიც შეადგენენ ფაილის ძირითად ნაწილს. ბოლოსართი კი შეიცავს ადმინისტრაციულ ინფორმაციას ROP ფაილის ნორმალური შეწყვეტის დროის შესახებ. ჩანაწერის სქემა მოცემული ნახაზზე:



**ნახ.1.8. CTR ჩანაწერის სტრუქტურა**

ძირითადი ინფორმაციის ჩანაწერი შედგება ASN.1 (Abstract Syntax Notation One) სისტემით კოდირებული ციფრული ჩანაწერისგან, რომლის დეკოდირება შესაძლებელია 3GPP სტანდარტის მიერ შემუშავებული წესების მიხედვით. მაგალითისთვის ნახაზის ზედა ნაწილში მოცემულია

მე-4 თაობის სისტემის ერთერთი RRC DL-DCCH ჩანაწერი, რომელიც წარმოდგენილია 30 ბაიტის ციფრული მიმდევრობით, ხოლო ქვედა ნაწილში ნაჩვენებია მისი დეკოდირებული მნიშვნელობა.

## Result of ASN.1 decoding

ASN.1 interface: 3GPP LTE Release 15 RRC (DL-DCCH-Message) 15.5.1

\*\*\* DECODING \*\*\*

```
<encoding>
060800C1 000426B7 B134B634 BA3C80
</encoding>
```

```
<DL-DCCH-Message>
<message>
<c1>
<csfbParametersResponseCDMA2000>
<rrc-TransactionIdentifier>3</rrc-TransactionIdentifier>
<criticalExtensions>
<csfbParametersResponseCDMA2000-r8>
<rand>00010000000000011000001000000000</rand>
<mobilityParameters>4D6F62696C697479</mobilityParameters>
</csfbParametersResponseCDMA2000-r8>
</criticalExtensions>
</csfbParametersResponseCDMA2000>
</c1>
</message>
</DL-DCCH-Message>
```

15 bytes decoded.

\*\*\* DECODING SUCCESSFUL \*\*\*

### ნახ.1.9. ციფრული ჩანაწერის დეკოდირება

რაც შეეხება მხოლოდ გეოლოკაციისთვის საჭირო ანათვლებს, რომლებიც დამოკიდებულია ადგილმდებარეობის პოვნის მეთოდზე. მაგალითად, ტრიანგულაციისა და ტრილატერაციის მეთოდი იყენებს TA, measResults და measResultNeighCells პარამეტრებს, მაშინ როდესაც TA+AOA მეთოდისათვის საჭიროა მხოლოდ TA და AOA პარამეტრები. გაფილტრული პარამეტრები და მათი დეკოდირებული მნიშვნელობები მოცემულია ცხრილში.



ერთეულის მისაღებად საჭიროა შემდეგი გამოთვლების ჩატარება. პირველად გამოვთვალოთ დროში სხვაობა გადაცემულ და მიღებული კადრებს შორის:

$$T_s = 1/(FFT \times B) = 1/(2048 \times 15000) = 1/30720000 \text{ წმ} \quad (1.12)$$

სადაც, FFT არის სწრაფი ფურიეს გარდაქმნის მნიშვნელობა, რომელიც მოცემული 20მჰც მე-4 თაობის სისტემისათვის უდრის 2048-ს, ხოლო B არის ქვეგადამტანის სიხშირული ზოლის სიგანე, რომელიც ჩვენს შემთხვევაში არის 15კჰც. რაც შეეხება თვით TA დაყოვნების მნიშვნელობას:

$$T_{TA} = 16 T_s = 16/30720000 \text{ წმ} = 0.5208 \text{ მკწმ} \quad (1.13)$$

მისი მანძილად გადაყვანისათვის საჭიროა C სინათლის სიჩქარეზე გამრავლება, რომლის მნიშვნელობაა  $3 \times 10^8$  მ/წმ:

$$D_{TA} = (3 \times 10^8 \times 0.5208 \times 10^{-6})/2 = 78.12\text{მ} \quad (1.14)$$

ცხრილში მოცემული მნიშვნელობის მეტრებში გადაყვანისათვის კი საჭიროა მისი გამრავლება  $D_{TA}$  ერთეულზე:

$$D_m = D_{TA} \times TA = 78.12 \times 11 = 859.32\text{მ} \quad (1.15)$$

### 1.10 მობილური მოწყობილობების ანათვლების მიღება სმარტფონის ჩანაწერების მიხედვით

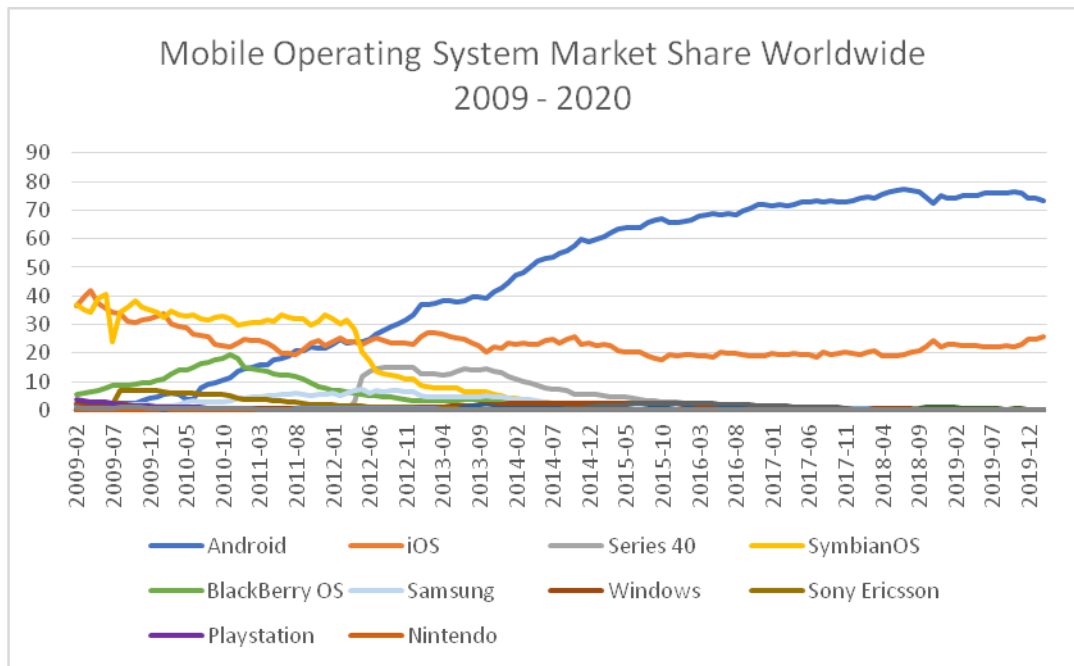
როგორც ზემოთ ავლნიშნეთ, მობილური ტელეფონის სისტემებში ერთიანი სტანდარტის დანერგვა აუცილებელია სხვადასხვა მომწოდებლებისა და მომხარებლების მიერ გამოყენებული პროგრამული თუ აპარატურული უზრუნველყოფის ერთმანეთთან უპრობლემო ფუნქციონირებისთვის. ამ ნაშრომში მოყვანილია გაზომვის მეთოდი, რომელიც გულისხმობს უსადენო მოწყობილობის ოპერაციული სისტემის საშუალებით განხორციელებასა და მის გეოლოკაციას. სიგნალის გავრცელების გაზომვის შესაძლებლობის მქონე პროგრამები საშუალებას

გვაძლევს შევავროვოთ სხვადასხვა სახის ანათვლები და შევინახოთ ისინი მონაცემთა ბაზებში.

3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project) ორგანიზაციამ თავის მე-9 გამოცემის დროს NGMN (Next Generation Mobile Network) ალიანსთან ერთად დაიწყო აქტიური მუშაობა ერთიანი სტანდარტებისა და რეკომენდაციების დადგენისათვის. ამ დადგენილებაში ერთერთი მთავარი მოთხოვნა იყო ქსელის ხარისხის გაზომვების პროცესის გამარტივება და გაუმჯობესება. ეს პროცედურები გაერთიანებული იქნა MDT (Minimization of Drive Tests) ჯგუფში [11]. MDT-ის მიზანია გამოიყენოს მობილური ტელეფონის ფუნქციონირებისათვის საჭირო პერიოდული გაზომვების ანათვლები ქსელის ხარისხის გასაგებად და მოხდეს ამ ინფორმაციის დახმარებით დაგეგმარების, ოპტიმიზაციისა თუ სხვა ამოცანების გადაწყვეტა. უსადენო მოწყობილობას ქსელის პარამეტრების გაზომვა შეუძლია როგორც აქტიური კავშირის დროს, ასევე პასიურ მდგომარეობაში, რაც უფრო მეტი ინფორმაციის მიღების საშუალებას იძლევა. ამ დროს ანათვლების შენახვა ხდება მოწყობილობის შიდა მეხსიერებაში და მხოლოდ საბაზო სადგურთან დაკავშირების შემდგომ ხდება ამ მონაცემების მიღება. რაც შეეხება თვით გაზომვების სტანდარტებსა და მოთხოვნებს, მისი განახლება ხდება ახალი ვერსიის გამოშვების დროს. სპეციალურად სმარტფონებისათვის (Smartphones) შექმნილმა მმლავრმა ოპერაციულმა სისტემებმა რადიკალურად გააუმჯობესა ნებისმიერი განახლებისა და ახალი სტანდარტების მყისიერი დანერგვის შესაძლებლობა. დღესდღეობით, ყველა თანამედროვე ტელეფონს შეუძლია მცირე ზომის, მარტივი პროგრამა საშუალებით მუდმივად დაასკანრონ საბაზო სადგურიდან მიღებული სიგნალის მახასიათებლები და გადასცენ ქსელის ხარისხის შემმოწმებელ მოდულებს.

მობილურ მომხმარებლებს შორის Android ოპერაციული სისტემა ყველაზე მეტი პოპულარობით სარგებლობს. ამის მთავარი მიზეზია მისი პროგრამული კოდის საჯაროობა, რაც ნებისმიერ პროგრამისტს საშუალებას

აძლევს გამოიყენოს, შეცვალოს და შექმნას უამრავი აპლიკაცია, რომელთა ჩამოტვირთვა მარტივად არის შესაძლებელი პროგრამების კატალოგიდან.



**ნახ.1.10. მსოფლიოს სმარტფონების გაყიდვები%**

ნახ.1.10-ზე ნაჩვენებია ანდროიდ ოპერაციული სისტემის (Android OS) გაყიდვების ზრდა, რომელიც დღესდღეობით თითქმის 80%- შეადგენს. ეს პლატფორმა კომპანია Google-მან შექმა ლინუქსის (Linux) ოპერაციული სისტემის ბაზაზე და ბაზარზე გამოჩენიდან მალევე მოიპოვა დიდი პოპულარობა. როგორც ნახაზიდან ჩანს, გაყიდული ტელეფონების 80% იყენებს ამ ოპერაციულ სისტემას. მაღალი ბაზრის შეღწევადობა თავისთავად გულისხმობს უფრო და უფრო მეტი პროგრამის შემქმნის პოტენციალს, რომელთა საზოგადოების მიერ შეფასება და დეტალური ინფორმაციის მიღება მარტივად არის შესაძლებელი Google Play პორტალზე.

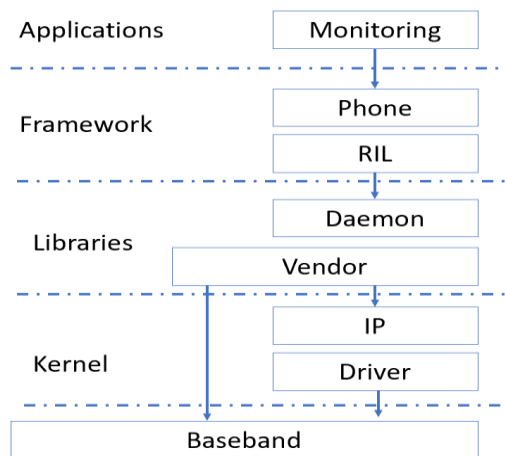
ამ ნაშრომში შესწავლილია ანდროიდ პლატფორმაზე დაფუძნებული უსადენო მოწყობილობების მიერ ქსელის ხარისხისა და დაფარვის მონიტორინგის შესაძლებლობები და მოყვანილია ის სტრუქტურული პარამეტრები, რომელთა გამოყენებითაც შესაძლებელი ხდება საჭირო ზუსტი ანათვლების მიღება, გამოანგარიშება და გადაცემა შემდგომი ანალიზისთვის.



ანდროიდის ოპერაციული სისტემა შეიძლება წარმოდგენილი იქნას სხვადასხვა დონის პროგრამული შრეებით [12], სადაც თითოეული ფენა წარმოადგენს რამდენიმე კომპონენტისგან შემდგარ ჯგუფებს, სადაც შედის თავად ოპერაციული სისტემა, პროგრამების სისტემასთან დამაკავშირებელი უზრუნველყოფა (Middleware) და საბოლოო აპლიკაციები.

Android OS ფაქტობრივად ზღუდავს პირდაპირი მეთოდებით ქსელის პარამეტრების გაზომვებს. უშუალოდ აპარატის რადიო გადამცემის და მოდემთან წვდომა და ანათვლების აღება შესაძლებელია RIL (Radio Interface Layer) მოდულიდან AOSP (Android Open Source Project) საშუალებით, რომელიც თავის მხრივ იყენებს android.telephony API-ის (Application Programming Interface)[4].

RIL შედგება ორი Daemon და Vendor ძირითადი კომპონენტებისგან. Daemon კომპონენტის ფუნქციაა კავშირი დაამყაროს სმარტფონის აპლიკაციებთან უზრუნველყოფს ბრძანებების გაგზავნას Vendor კომპონენტისთვის, რომელიც ძალიან სპეციფიკურია და დამოკიდებულია რადიო მოდულის მის ფიზიკურ მახასიათებლებზე. იგი ასევე ფილტრავს არათავსებად ბრძანებებს. დიაგრამა მოცემულია ნახ.1.11.



ნახ.1.11. RIL დიაგრამა

სმარტფონებისათვის დაწერილი პირველი Android OS-ის ვერსია გამოჩნდა 2008 წელს და მას შემდეგ რამდენიმე ათეული ვერ განახლებული

ვერსიაა შექმნილი. თვითოეული განახლება და ვერსია ემსახურება სხვადასხვა API-ს დონის მხარდაჭერის შესაძლებლობას (ცხრილი 1.2). ძველი ტელეფონები, რომლებიც იყენებენ Gingerbread ან უფრო ძველ ვერსიას რომლის API დონე ნაკლებია 10-ზე არ აქვს საშუალება განახორციელოს და გადასცეს პროგრამულ უზრუნველყოფას საბაზო სადგურის სიგნალის დონის მონაცემები. რა თქმა უნდა ეს დიდ პრობლემას აღარ წარმოადგენს, რადგანაც მათი წილი მსოფლიო ბაზარზე მინიმალურია.

**ცხრილი 1.2. ანდროიდ ოპერაციული სისტემის ვერსიების სია**

Code Name	Version	API Level	Release Date
Android10	10	29	2019-09
Pie	9	28	2018-08
Oreo	8.1.0	27	2017-08
	8.0.0	26	
Nougat	7.1	25	2016-08
	7	24	
Marshmallow	6	23	2015-10
Lollipop	5.1	22	2014-11
	5	21	
KitKat	4.4 - 4.4.4	19	2013-10
Jellybean	4.3.x	18	2012-07
	4.2.x	17	
	4.1.x	16	
Ice Cream Sandwich	4.0.3 - 4.0.4	15, NDK 8	2011-10
	4.0.1 - 4.0.2	14, NDK 7	
Honeycomb	3.2.x	13	2011-02
	3.1	12, NDK 6	
	3	11	
Gingerbread	2.3.3 - 2.3.7	10	2010-12
	2.3 - 2.3.2	9, NDK 5	
Froyo	2.2.x	8, NDK 4	2010-05
Éclair	2.1	7, NDK 3	2009-10
	2.0.1	6	
	2	5	

Donut	1.6	4, NDK 2	2009-09
Cupcake	1.5	3, NDK 1	2009-04
Android 1.1	1.1	2	2009-02
Android 1	1	1	2008-09

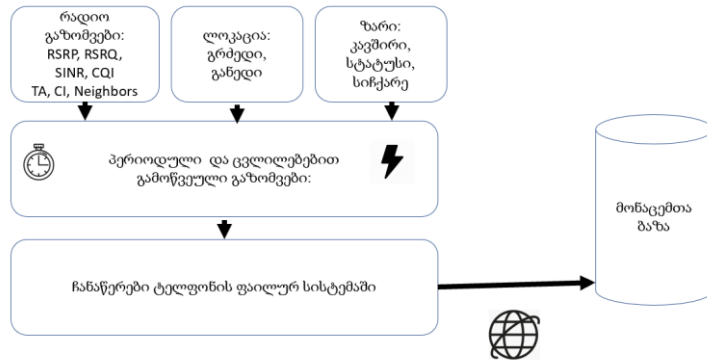
რაც შეეხება შედარებით ახალი ანდროიდის ვერსიებს, API 17-დან მოხდა LTE ტექნოლოგიაზე დაფუძნებული ბევრი გაზომვადი რადიო პარამეტრის დამატება (მაგ. OFDM, სიგნალის სტრუქტურა, სიჩქარე, და ა.შ.), ხოლო მე-5 თაობის შესაბამისი ანათვლების შემოტანა დაიწყო API-26 ვერსიის მქონე ტელეფონებში. ეს ანათვლები ძირითადად მოიცავს სიგნალის სიმძლავრის, ხარისხის, ფიჭის ინფორმაციის და სხვა მრავალ სპეციალურ პარამეტრს, რომელთა ნაწილი მოცემულია ცხრილში:

**ცხრილი 1.3. სმარტფონის მიერ აღებული ანათვლების სია**

პარამეტრის დასახელება	დამატებითი ინფორმაცია
<b>PhoneNumber Utils</b>	სტრუქტურული პარამეტრი, რომელიც შეიცავს ინფორმაციას აბონენტის შესახებ: MSISDN ნომერი, IMSI ნომერი, TIMSI ნომერი და ა.შ.
<b>PhoneState Listener</b>	პარამეტრების კლასი, რომელიც აფიქსირებს ტელეფონის საბაზო სადგურთან კავშირის მდგომარეობებს.
<b>ServiceState</b>	აჩვენებს მომსახურების მიღებისათვის მზაობას.
<b>SignalStrength</b>	აჩვენებს საბაზო სადგურიდან მიღებული სიგნალის დონის მნიშვნელობას.
<b>Telephony Manager</b>	გვამღევს საშუალებას მივიღოთ ინფორმაცია სატელეფონო ფუნქციების შესახებ.
<b>CellIdentityCdma</b>	CDMA ფიჭის უნიკალური საიდენტიფიკაციო ნომერი
<b>CellIdentityGsm</b>	GSM ფიჭის უნიკალური საიდენტიფიკაციო ნომერი
<b>CellIdentityLte</b>	LTE ფიჭის უნიკალური საიდენტიფიკაციო ნომერი
<b>CellIdentityWcdma</b>	UMTS ფიჭის უნიკალური საიდენტიფიკაციო ნომერი
<b>CellInfo</b>	დამატებითი ინფორმაცია ფიჭის შესახებ (როგორც მომსახურე ასევე მეზობელი სექტორებისათვის)
<b>CellSignalStrength</b>	მეზობელი საბაზო სადგურის სიგნალის დონის მაჩვენებელი
<b>RSRP</b>	Reference Signal Received Power არის საბაზო სადგურიდან მიღებული სპეციფიკური შესადარებელი სიგნალის სიმძლავრის დონის

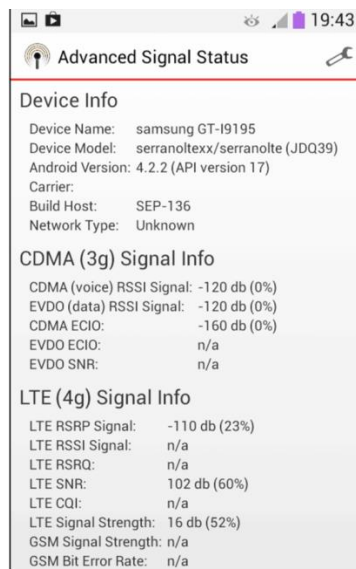
	მნიშვნელობა, რომელიც გამოსახულია დეციბელებით. ეს მნიშვნელობა ასევე გამოყენებულია ტელეფონის მიერ ეკრანზე გამოსახული სიგნალის მიღების დონის მაჩვენებელი ხაზებისათვის.
<b>RSSI</b>	Received Signal Strength Indicator (მიღებული სიგნალის სიძლიერის ინდიკატორი) არის მიღებული მთლიანი სიმძლავრის საშუალო მნიშვნელობა.
<b>RSRQ</b>	Reference Signal Received Quality არის მიღებული სიგნალის ხარისხი. RSRQ მერყეობს -3db- დან -19.5db- მდე, რაც უფრო ახლოს არის -3db-ით უკეთესი.
<b>SNR</b>	Signal to Noise Ratio არის სიგნალის ხმაურთან თანაფარდობა. რაც უფრო მაღალია SNR, მით უფრო კარგია მიღებული სიგნალის ხარისხი და შესაბამისად მისი გამტარუნარიანობაც, რაც ასევე აისახება კავშირის სიჩქარეზე
<b>CQI</b>	Channel Quality Indicator (არხის ხარისხის ინდიკატორი) აჩვენებს მომსახურების მომწოდებელი ფიქსთან დაკავშირებული არხის ხარისხს. CQI პირდაპირ კავშირშია SINR- თან და მისი მნიშვნელობა მერყეობს 1-დან 15-მდე.
<b>SINR</b>	Signal to Interference and Noise Ratios არის მაჩვენებელი, რომელიც აჩვენებს მომსახურების ხარისხს და პირდაპირ კავშირშია ქსელის სპექტრულ ეფექტურობასა და მოწოდებული არხის სიჩქარეზე.

ჩვენი სატესტო პროგრამის შემუშავებისთვის გამოვიყენეთ Samsung Galaxy S4 Mini (GT-I9195) სმარტფონი, რომელიც იყენებს ანდროიდ ოპერაციულ სისტემას. იგი თავსებადია GPRS, EDGE, UMTS (WCDMA), HSxPA და LTE სტანდარტიზაციასთან. პროგრამირებისას გამოყენებული იქნა Android Studio აპლიკაცია, რომელიც თავისთავად იყენებს Windows ოპერაციულ სისტემას. Android Studio-ს გააჩნია წინასწარ შექმნილი კატალოგები, რომელთა გამოყენებით შესაძლებელია მრავალი სხვადასხვა ფუნქციის დამატება აპლიკაციისთვის. ანდროიდის პროგრამირების ენა საკმაოდ მარტივია და ძალიან გავს HTML (HyperText Markup Language) და JavaScript ენებს, რომელიც ძალიან პოპულარულია ინტერნეტ საიტების შექმნისას. რაც შეეხება თვით აპლიკაციას არქიტექტურა მოყვანილია ნახაზში.



**ნახ.1.12. სმარტფონის მიერ განხორციელებული ანათვლების ჩაწერის სტრუქტურა**

მაგალითისთვის მოყვანილია ღია აპლიკაცია "Advanced Signal Status" [9], რომელიც ხელმისაწვდომია Google Play- სა და GitHub- ში. ეს პროგრამა უკვე აჩვენებს რადიოს სხვადასხვა ტექნოლოიაზე დაფუძნებული ქსელის ანათვლებს, როგორც ეს მოცემულია ნახაზზე. გაზომვის პროცედურების გასაუმჯობესებლად და ოპტიმიზაციის მიზნით შესაძლებელია დამატებითი პარამეტრებისა და ანათვლების დამატება:



**ნახ.1.13. სმარტფონის სიგნალის მახასიათებლების გასაზომი აპლიკაცია**

როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ, გაზომვების შეგროვებასთან ერთად, აუცილებელია ამ ანათვლების ადგილმდებარეობის გაგება. პოზიციონირების ტექნოლოგია, რომლის გამოყენებაც შესაძლებელია აპლიკაციის მიერ, არის ტელეფონში ინტეგრირებული A-GPS მოდული. ეს

მოწყობილობა ჩვეულებრივი GPS-ისგან განსხვავდება იმით, რომ არ არის აუცილებელი მხოლოდ პირდაპირი სატელიტური სიგნალის მიღება და ადგილმდებარეობის დადგენა შესაძლებელი ხდება დახურულ შენობებშიც კი ინტერნეტ კავშირის შემთხვევაში. ასევე არსებობს Google's Location API, რომელსაც საკუთარი გეოლოკაციის ბაზა გააჩნია და სხვადასხვა სტატისტიკურ მონაცემებზე დაყრდნობით საკმაოდ ზუსტად შეუძლია ადგილმდებარეობის დადგენა. ეს სტატისტიკური მონაცემები კი ეყრდნობა მობილური ქსელის ფიჭების, Wi-Fi წერტილებისა და GPS მოდულებისან მიღებულ მონაცემების. ის ყოველთვის მუშაობს საუკეთესო ძალისხმევის პრინციპის გამოყენებით ამის გამო მისი ადგილმდებარეობის დადგენის სიზუსტე გარანტირებული არ არის და დამოკიდებული არსებული სტატისტიკური მონაცემების ხარისხზე.

რაც შეეხება ადგილმდებარეობის ანათვლების სმარტფონის ფაილურ სისტემაში შენახვის აუცილებლობას, აღსანიშნავია, რომ მისი სერვერზე ატვირთვა პირდაპირ რეჟიმში ხანდახან შეუძლებელია. ამის მიზეზი შესაძლებელია იყოს დაფარვის სიგნალის ან ინტერნეტ კავშირის არარსებობა. ასევე გასათვალისწინებელია მონაცემთა გადაცემის დროს გაზრდილი ენერგო მოხმარება და შემცირებული ბატარიის გამძლეობა. ამ დროს აუცილებელია მოხდეს გაზომვების დროებით ტექსტურ დოკუმენტში ჩაწერა და მისი გადაცემა დამგეგმავი მოდულისათვის, რომელიც თავისთავად პასუხისმგებელია ამ ინფორმაციის სერვერი მონაცემთა ბაზაში გადატანაზე, მაშინ როდესაც ეს უფრო მოხერხებულია (დამით, Wi-Fi სიგნალის გამოყენებით, და ა.შ.).

მონაცემთა ტერმინალის ლოკალურ ფაილურ სისტემაში ჩაწერა და შენახვა ანდროიდის ოპერაციული სისტემის უსაფრთხოების მოთხოვნების მიხედვით მომხმარებლის სპეციალურ ნებართვას საჭიროებს. ამის გამო, ნებისმიერი აპლიკაცია, რომელსაც სჭირდება შენახვის ფუნქცია, დააინსტალირების დროს ატყობინებს მომხმარებელს ამის შესახებ და თანხმობის შემთხვევაში ავტომატურად ენიჭება ფაილურ სისტემაში ჩაწერის

ნებართვა. ასევე საჭიროა სპეციალური ნებართვები ადგილმდებარეობისა და სატელეფონო ფუნქციების მონაცემების მიღებისთვის. ყველა ეს ინფორმაცია იკრიბება და სპეციალური დაარქივებული სახით ინახება შეინახება ტელეფონის ლოკალურ მეხსიერებაში.

ამ და სხვა ტერმინალებისგან შეგროვებული ანათვლების გადაცემა და შენახვა ხდება სპეციალურ მონაცემთა ბაზაში, სადაც ხდება მათი აგრეგაცია და შემდგომი ანალიზი. ინფორმაციის მიმოცვლა სმარტფონსა და სერვერს შორის ხდება ეფექტური FTP პროტოკოლის გამოყენებით, ხოლო მონაცემების საბოლოო სახით შენახვისათვის გამოიყენება MySQL მონაცემთა ბაზა, რომელზედაც თავის მხრივ მიბმულია ვიზუალიზაციის პროგრამა Tableau, რომლის საშუალებითაც შესაძლებელია დიდი რაოდენობით მონაცემების დამუშავება და ინტერაქტიული გრაფიკებისა თუ რუკების გაკეთება.

ქსელის გაზომვების ავტომატიზაციის საჭიროება გვხვდება მობილური ქსელების ყველა თაობაში. ასევე ხდება მობილური ტელეფონის სენსორებისგან მიღებული ინფორმაციის სტანდარტიზაცია, რომლებიც საშუალებას გვაძლევს სხვადასხვა მომწოდებლის მიერ დამზადებული მოწყობილობების ანათვლების ერთიან სისტემაში მოქცევისა და აგრეგაციის საშუალებას. სმარტფონების სისტემებზე დაფუძნებული API-ების მრავალფუნქციური გამოყენება კი გზას უხსნის იმ ახალ შესაძლებლობებს შესაძლებლობებს, სადაც მთელი საზოგადოებას შეუძლია მონაწილეობა მიიღოს მონაცემთა შეგროვებასა და სერვერებზე გადაცემაში. ამ თემის ანალიზურმა მიდგომამ აჩვენა, რომ არსებობს უამრავი Android OS ვერსია, რომლებიც განსხვავდება სატელეფონო კლასების მხარდაჭერის თვალსაზრისით. რა თქმა უნდა, უახლესი გამოშვებები შეიცავს დამატებით ინფორმაციას უახლესი ტექნოლოგიების შესახებ.

### 1.11 გეოლოკაციის ცდომილება

სტანდარტული გეოლოკაციის სისტემებში გამოყენებულია ბრტყელი დედამიწის მოდელი, რომელიც დაფუძნებული დეკარტესულ კოორდინატებზე. რა თქმა უნდა დედამიწის სიმრგვალის გამო ზუსტი ადგილმდებარეობის კოორდინატებში ტიპური ცდომილება ყოველთვის იქნება, მაგრამ მასშტაბების სიმცირის გამო შესაძლებელია მისი უგულველყოფა.

მანძილი საბაზო სადგურსა და უსადენო მოწყობილობას შორის გამოითვლება სიგნალის გავრცელების დაყოვნების საშუალებით. რადგანაც რადიო ტალღა ცარიელ სივრცეში სინათლის სიჩქარით (300 000 კმ/წმ) ვრცელდება, ხოლო LTE-ში გამოყენებული ქვე-გადამტანების სიხშირული ზოლის სიგანე 15კჰც-ია, TA-ის ინტერვალი შეადგენს 78.125 მეტრს. შესაბამისად, მანძილის სხვაობის ალბათობა:

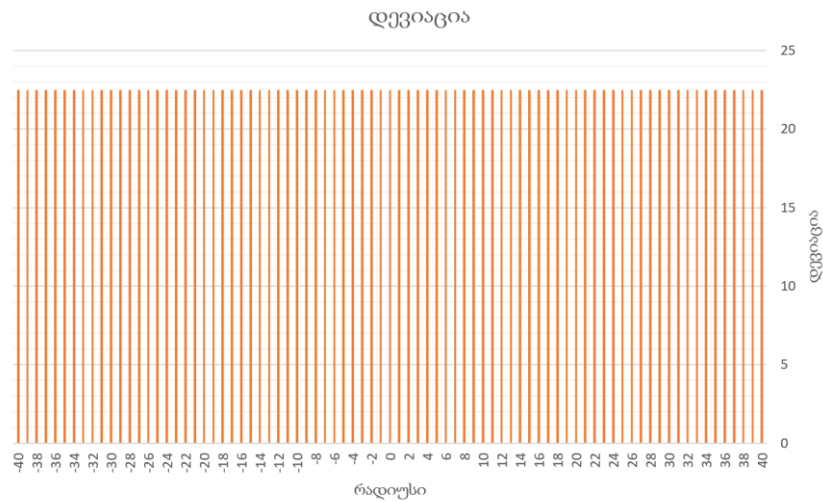
$$P(\Delta r) = \frac{1}{78.125} \quad (1.16)$$

კვანტირების ცდომილების სტანდარტული დევიაციის ფორმულა გვაძლევს [13]:

$$\sigma = \sqrt{E[(\Delta r - 0)^2]} = \sqrt{2 \int_0^{78.125/2} \Delta r^2 \times P(\Delta r) dx} = \sqrt{\frac{2}{78.125} \times \frac{1}{3} \times \left(\frac{78.125}{2}\right)^3} = 22.5 \text{მ} \quad (1.17)$$

როგორც, მივიღეთ საბაზო სადგურის მიერ მობილური მოწყობილობების მიერ აღებული ანათვლების საშუალებით დადგენილი ადგილმდებარეობის ცდომილების მინიმალური მნიშვნელობა არის 22.5მ, რომლის გრაფიკული დიაგრამა მოცემულია ნახ. 1.14-ზე.





**ნახ.1.14. რადიუსის ცდომილების განაწილება**

რაც შეეხება სმარტფონის მიერ ჩაწერილი ანათვლების ადგილმდებარეობის ცდომილება, სადაც გამოყენებულია ზემოთ აღწერილი Google Location API, რომელიც თავის მხრივ იყენებს გეოლოკაციის სტატისტიკურსა და A-GPS მეთოდის კომბინაციას, დამოკიდებულია თვით ამ მეთოდების სიზუსტეებზე. შესაბამისად, ცდომილებაც მერყეობს 1მ-დან 300მ-დე.

### 1.12 დასკვნა 1-ლი თავის შედეგების მიხედვით

1. შემუშავებული იქნა სმარტფონების ადგილმდებარეობის დადგენის ახალი კომბინირებული მეთოდი, რომელიც იყენებს უკვე არსებული კლასიკური მეთოდების ერთობლიობას. ამის შედეგად მოვახდინეთ გეოლოკაციის ცდომილების შემცირება.
2. შემუშავებული იქნა ახალი სექტორიზაციის მეთოდი, რომელიც საშუალებას იძლევა დადგინდეს ადგილმდებარეობა მხოლოდ ერთი საბაზო სადგურის მონაცემების მიხედვით.
3. შესწავლილი იქნა 3GPP ორგანაზაციის მიერ რეკომენდირებული საბაზო სადგურების მიერ განხორციელებული ანათვლების საშუალებით

ადგილმდებარეობს დადგენის მეთოდები და შემუშავებული იქნა ჩანაწერების დამუშავების ოპტიმიზირებული მეთოდი.

4. შექმნილი იქნა ანდროიდ ოპერაციულ სისტემებზე დაფუძნებული აპლიკაცია, რომელსაც შეუძლია საბაზო სადგურიდან მიღებული სიგნალის მახასიათებლების გაზომვა. ანათვლების აღების შემდეგ კი მისი ტექსტურ ფორმატში ჩაწერა მონაცემთა ბაზაში გადაცემა.
5. გაანალიზირებული და შედარებული იქნა საბაზო სადგურების ჩანაწერების სიზუსტე სმარტფონების მიერ გაკეთებულ ჩანაწერებთან და დადგენილი იქნა მეორე მეთოდის აშკარა უპირატესობა.
6. ჩვენს მიერ შექმნილი აპლიკაციით მოვახდინეთ ანათვლების აღება, რომელიც შემდგომ გამოყენებული იქნა სხვადასხვა სიმულაციებში.

## 2 გეოლოკაციის გამოყენება თვითორგანიზებადი ქსელში

როგორც ზემოთ ავლინებთ CCO შესაძლებელია ჩაიწეროს კლასიკურ მრავალცვლადიან ოპტიმიზაციის განტოლებად, რადგანაც მისი რამოდენიმე დამოუკიდებელი კომპონენტის: დაფარვის, მომსახურების ხარისხისა და ტევადობის მაქსიმიზირებაა საჭირო. თუმცა, სხვადასხვა ამოცანების ამოხსნებიდან მიღებული პრაქტიკა გვიჩვენებს, რომ უმჯობესია თვითოეულ კომპონენტს მივანიჭოთ სხვადასხვა პრიორიტეტი, რადგანაც თანაბარი პირობების შემთხვევაში პრობლემის გადაწყვეტა ძალიან რთულდება. უმეტეს შემთხვევაში ოპტიმიზაცია ფოკუსირებულია ქსელის ტევადობაზე, რადგანაც ის პირდაპირ კავშირშია სპექტრულ ეფექტურობასთან, რომელიც თავისთავად დამოკიდებულია ქსელის ხარისხზე. შესაძლებელია გამოყენებული იქნას შემდეგი სახის აგრეგაციები, რომელიც საშუალებას მოგვცემს გამოვთვალოთ და ფორმულის სახით ჩავწეროთ მიღებული შედეგები. ესენია:

1. თანაბარ პრიორიტეტული მომხმარებლები, რომელიც გულისხმობს რომ ყველა აბონენტი ერთნაირი პრიორიტეტით სარგებლობს და მათი მოთხოვნილი მომსახურება ერთნაირია.
2. თანაბარ პრიორიტეტული ფიჭები, სადაც ნებისმიერი ფიჭა, მიუხედავად მისი ზომისა და ტრაფიკისა ერთნაირი პრიორიტეტით სარგებლობს. ეს მეთოდი ძალიან პოპულარულია ოპერატორებში, რადგანაც შენონის თეორიის მიხედვით, თვითოეული ფიჭისათვის SINR-ის საშუალო მნიშვნელობა პირდაპირ კავშირშია მის სპექტრულ ეფექტურობასთან და გაცილებით ამარტივებს გამოთვლას. თუ ასევე გავითვალისწინებთ, რომ ქსელის ხარისხი პირდაპირ პროპორციულია ფიჭების რესურსებისა და ტევადობის მიმართ ამ ამოცანის ფორმულირება კიდევ უფრო გაგვიადვილდება.
3. ჰარმონიული წონით გასაშუალებული ფიჭები, რომელშიც პრიორიტეტები გადანაწილებულია SINR-ის მიხედვით (ცუდი

მოსახურების ხარისხის მქონე ფიქებს ენიჭებათ დაბალი წონითი მნიშვნელობა, ხოლო მაღლებს პირიქით)

ამ ნაშრომში განხილულია მე-2 აგრეგაციის მეთოდი. შესაბამისად SINR-ის მაქსიმიზაციის ფორმულირება შესაძლებელია ჩაიწეროს შემდეგნაირად:

მაქსიმალური მნიშვნელობისათვის:

$$\sigma_t = \sum_i^n \bar{\sigma}(i) \quad (2.1)$$

რომელიც ექვმდებარება:

$$\bar{\sigma}_{c\#}(i) > \sigma_{c\#min}(i) \quad (2.2)$$

სადაც  $\bar{\sigma}(i)$  არის ფიქა  $i$ -ს საშუალო SINR-ის მნიშვნელობა,  $\bar{\sigma}_{c\#}(i)$  არის ფიქა  $i$ -ს საზღვრის საშუალო SINR-ის მნიშვნელობა,  $\sigma_{c\#min}(i)$  არის საჭირო მინიმალური მნიშვნელობა ფიქის საზღვარზე.

შეზღუდვების არარსებობის შემთხვევაში მინიმალურმა მნიშვნელობამ უნდა დააკმაყოფილოს შემდეგი პირობა [14]:

$$\frac{\partial \sigma_t}{\partial P_{TX}(i)} = 0 \quad \forall i \quad (2.3)$$

ასევე, თუ გავითვალისწინებთ, რომ სიმძლავრის ან ტილტის ცვლილება გავლენას ახდენს მხოლოდ შეზღუდული რაოდენობის მეზობელ ფიქებზე, სტანციონალური პირობა შესაძლებელია გადავწეროთ შემდეგნაირად:

$$\frac{\partial \sigma_t}{\partial P_{TX}(i)} \approx \frac{\partial (\bar{\sigma}(i) + \sum_{j \in N(i)} \bar{\sigma}(j))}{\partial P_{TX}(i)} \quad (2.4)$$

სადაც  $N(i)$  არის  $i$  ფიქის მეზობლები. ფორმულა გვიჩვენებს, რომ ფიქის სიმძლავრის გაზრდა აუმჯობესებს მომსახურების ხარისხს თავის დაფარვის ზონაში:

$$\frac{\partial(\bar{\sigma}(i))}{\partial P_{TX}(i)} > 0 \quad (2.5)$$

მაგრამ ამავედროულად ზრდის ინტერფერენციას მეზობელ ფიჭებზე [15]:

$$\frac{\partial(\sum_{j \in N(i)} \bar{\sigma}(j))}{\partial P_{TX}(i)} < 0 \quad (2.6)$$

ფუნქციის მაქსიმუმის საპოვნელად შეგვიძლია გამოვიყენოთ გრადიენტული დაშვების მეთოდი. ამისათვის საჭიროა თვითოეული ცვლადის დახრის ფუნქციის გამოთვლა. სიმარტივისათვის გამოვთვალოთ ჯამური SINR-ის მნიშვნელობა ფიჭის გარშემო:

$$\begin{aligned} \sigma_c(i) &= \bar{\sigma}(i) + \sum_{j \in N(i)} \bar{\sigma}(j) \\ &= \bar{S}(i) - \bar{I}(i) + \sum_{j \in N(i)} (\bar{S}(j) - \bar{I}(j)) \end{aligned} \quad (2.7)$$

სადაც  $\bar{S}(j)$  და  $\bar{I}(j)$  არიან სასურველი სასარგებლო სიგნალისა და ინტერფერენციის საშუალო დონეები მოცემული ფიჭისათვის გამოსახული დეციბელებში. თუ გავითვალისწინებთ მომხმარებელის ადგილმდებარეობის ალბათობის ფაქტორს მივიღებთ:

$$\sigma_c(i) = \sum_{(x,y) \in A(i)} P_u(x,y) (S(x,y) - I(x,y)) + \sum_{j \in N(i)} \sum_{(x,y) \in A(j)} P_u(x,y) (S(x,y) - I(x,y)) \quad (2.8)$$

სადაც  $A(i)$  არის ფიჭის დაფარვის არეალი,  $P_u(x,y)$  არის ალბათობა იმისა რომ აბონენტი დაუკავშირდება საბაზო სადგურს მოცემული  $(x,y)$  ადგილიდან, ხოლო  $S(x,y)$  და  $I(x,y)$  კი სასარგებლო და ინტერფერენციის დონეები [16]. რა თქმა უნდა ჩვენს შემთხვევაში:

$$\sum_{(x,y) \in A(j)} P_u(x,y) = 1 \quad \forall i \quad (2.9)$$

მე-4 და მე-7 ფორმულებიდან გამომდინარე:

$$\beta(i) = \frac{\partial \sigma_c(i)}{\partial P_{TX}(i)} \approx \frac{\partial \sigma_c(i)}{\partial P_{TX}(i)} \quad (2.10)$$

სიმარტივისათვის მე-10 პირობა ჩავწეროთ 4 შემადგენელი კომპონენტების სახით:

$$\beta(i) \approx F1-F2+F3-F4 \quad (2.11)$$

სადაც,

$$F1 = \frac{\partial S(i)}{\partial P_{TX}(i)}$$

$$F2 = \frac{\partial I(i)}{\partial P_{TX}(i)} \quad (2.12)$$

$$F3 = \frac{\partial \sum_{j \in N(i)} S(j)}{\partial P_{TX}(i)}$$

$$F4 = \frac{\partial (\sum_{j \in N(i)} I(j))}{\partial P_{TX}(i)}$$

F1 არის მოცემული ფიქსისთვის გამოსხივების სიმძლავრის გავლენა სასურველ სიგნალის დონეზე, რომელიც უნდა მიეწოდეს მომხმარებლებს. F2 არის მოცემული ფიქსისთვის მეზობელი სექტორებისაგან მიღებული ინტერფერენციის დონე. F3 არის მეზობელი ფიქსებისთვის სასურველ სიგნალის დონე, ხოლო F4 არის მეზობელი ფიქსების ინტერფერენციის დონე.

## 2.1 წყაროს სასურველი სიგნალის დონის ანგარიში

მოცემული  $(x,y)$  კოორდინატებისთვის სიგნალის დონის გამოთვლა  $i$  ფიქსისათვის შეგვიძლია ჩავწეროთ შემდეგნაირად:

$$P_{RX}(i, x, y) = P_{TX}(i) - PL(i, x, y) \quad (2.13)$$

სადაც,  $PL(i, x, y)$  არის სიგნალის არხის მილევა საბაზო სადგურსა და მომხმარებლის ადგილმდებარეობას შორის. ზემოთ ნახსენები ფორმულის

გათვალისწინებით, შეგვიძლია გამოვიყენოთ, რომ სასურველი სიგნალის დონე მიმღებში არის:

$$S(x, y) = P_{RX}(i, x, y), \quad (x, y) \in A(i) \quad (2.14)$$

აქვე უნდა ავლნიშნოთ, რომ სივრცული ტრაფიკის განაწილება არ არის დამოკიდებული ანტენის სიმძლავრის პარამეტრებზე, ამიტომ მისი გავლენა მიღებული სიგნალის დონეზე შესაძლებელია ჩაიწეროს შემდეგნაირად:

$$\begin{aligned} F1 &= \frac{\partial \left( \sum_{(x,y) \in A(i)} P_u(x, y) S(x, y) \right)}{\partial P_{TX}(i)} \\ &= \sum_{(x,y) \in A(i)} P_u(x, y) \frac{\partial P_{TX}(i)}{\partial P_{TX}(i)} \\ &= \sum_{(x,y) \in A(i)} P_u(x, y) = 1 \end{aligned} \quad (2.15)$$

## 2.2 წყაროს ინტერფერენციის ანგარიში

ფიჭა  $i$ -ს ინტერფერენციის დონის  $(x, y)$  კოორდინატებზე გამოსათვლელად, რომელიც გამოწვეულია  $j$  მეზობელი სადგურის მიერ მაშინ, როდესაც  $(i \neq j)$ , შეგვიძლია გამოვიყენოთ შემდეგი ფორმულა:

$$I(x, y) = 10 \cdot \text{Log}_{10}(\sum_{j \in N(i)} P_{rx}(j, x, y) l(j) + n_0) \quad (2.16)$$

სადაც,  $P_{rx}(j, x, y)$  არის მიღებული სიგნალის დონე  $x, y$  კოორდინატებზე მეზობელი საბაზო სადგურიდან, ხოლო  $n_0$  არის სითბური ხმაური. ფიჭის საერთო დატვირთვის გასაგებად საჭიროა ყველა  $x, y$  კოორდინატის დონეებზე მიღებული ინტერფერენციის აჯამვა და საშუალო არითმეტიკულის გამოყვანა [17].

$$l(i) = \sum_{(x,y) \in A(i)} l(x,y) = \frac{\sum_{(x,y) \in A(i)} \left( \frac{t(x,y)}{se(x,y)} \right)}{N_{prb}(i)} \quad (2.17)$$

სადაც,  $t(x,y)$  არის საშუალო სიჩქარე (ბიტ/წმ),  $se(x,y)$  არის სპექტრალური ეფექტურობა (ბიტ/წმ/ჰც), ხოლო  $N_{prb}(i)$  არის რესურს ბლოკების რაოდენობა, რომელიც განისაზღვრება სისტემის ოპერირების სიხშირული ზოლის მიხედვით. შენონის ფორმულიდან გამომდინარე:

$$se(x,y) = \begin{cases} 0, & \sigma(x,y) < \sigma_{min} \\ \alpha_{IL} \log_2(1 + \sigma(x,y)), & \sigma_{min} \leq \sigma(x,y) \leq \sigma_{max} \\ se_{max}, & \sigma_{max} < \sigma(x,y) \end{cases} \quad (2.18)$$

სადაც,  $\alpha_{IL}$  არის მილევის ფაქტორი, ხოლო  $\sigma_{max}/\sigma_{min}$  არის მაქსიმალური/მინიმალური სპექტრალური ეფექტურობა. შესაბამისად, საბაზო სადგურზე სიმძლავრის ცვლილების გავლენა ინტერფერენციის დონეზე შესაძლებელია ჩაიწეროს შემდეგნაირად:

$$F2 = \frac{\partial I(i)}{\partial P_{TX}(i)} = \sum_{(x,y) \in A(i)} P_u(x,y) \frac{\partial l(x,y)}{\partial P_{TX}(i)} \quad (2.19)$$

$$= \sum_{(x,y) \in A(i)} \left[ \frac{10 P_u(x,y)}{\ln 10 (\sum_{j \in N(i)} P_{rx}(j,x,y) l(j) + n_0)} \cdot \sum_{j \in N(i)} P_{rx}(j,x,y) \frac{\partial l(j)}{\partial P_{TX}(i)} \right]$$

როგორც გამოვიყვანეთ, სიმძლავრის გაზრდა ამცირებს ინტერფერენციის დონეს თავისივე დაფარვის ზონაში, თუმცა ზრდის დატვირთვას მეზობელ ფიჭებში. თუ გავითვალისწინებთ შენონის სპექტრალური ეფექტურობის პირობას:



$$\frac{\partial l(j)}{\partial P_{TX}(i)} = -\frac{1}{N_{prb}(j)}$$

$$\cdot \sum_{\substack{(x,y) \in A(i) \\ \sigma(x,y) \in [\sigma_{min}, \sigma_{max}]}} \left( t(x,y) \frac{1}{\sigma_{IL} [\log_2(1+\sigma(x,y))]^2} \frac{1}{\ln(1+\sigma(x,y))} \frac{\partial [10^{\sigma(x,y)/10}]}{\partial P_{TX}(i)} \right) \quad (2.20)$$

$$- \sum_{\substack{(x,y) \in A(i) \\ \sigma(x,y) \in [\sigma_{min}, \sigma_{max}]}} \left( l(x,y) \frac{\sigma(x,y)}{(1+\sigma(x,y)) \cdot \ln(1+\sigma(x,y))} \cdot \frac{\ln 10}{10} \cdot \frac{\partial (-l(x,y))}{\partial P_{TX}(i)} \right)$$

სიმარტივისათვის ჩავთვალოთ, რომ ინტერფერენციის დონე თანაბრად იცვლება ფიქსის ყოველ წერტილში. შესაბამისად მივიღებთ:

$$\frac{\partial l(j)}{\partial P_{TX}(i)} \approx l(j) \frac{\bar{\sigma}(j)}{(1+\bar{\sigma}(j)) \cdot \ln(1+\bar{\sigma}(j))} \frac{\ln 10}{10} \frac{\partial \bar{I}(j)}{\partial P_{TX}(i)} \quad (2.21)$$

სადაც,  $\bar{\sigma}(j)$  და  $\bar{I}(j)$  არიან ტრაფიკის მიხედვით აწონილი საშუალო SINR და

ინტერფერენციის დონე მოცემული ფიქსის ყოველ წერტილში. აქედან:

$$\frac{\partial \bar{I}(j)}{\partial P_{TX}(i)} \approx \sum_{(x,y) \in A(i)} P_u(x,y) \frac{\partial I(x,y)}{\partial P_{TX}(i)} \quad (2.22)$$

$$\sum_{(x,y) \in A(i)} \left[ \frac{10}{\ln 10} \cdot \frac{P_u(x,y)}{\sum_{m \in N(i)} P_{rx}(m,x,y) \cdot l(m) + n_0} \cdot \sum_{m \in N(i)} \frac{\partial (P_{rx}(m,x,y) \cdot l(m))}{\partial P_{TX}(i)} \right]$$

როგორც 2.22 გამოსახულებიდან ვხედავთ, ფიქსის სიმძლავრის ცვლილება გავლენას ახდენს მომსახურების ხარისხზე, სპექტრულ ეფექტურობასა და დატვირთვაზე როგორც თავის დაფარვის არეალში, ასევე მეზობელ სადგურებზეც. სხვადასხვა დროს ჩატარებული ექსპერიმენტებიდან მიღებული მონაცემები გვაჩვენებს, საშუალოდ, ერთ საბაზო სადგურზე 1დბ-ით შემცირება იწვევს გარშემო ფიქსების დატვირთვის 7%-ით გაზრდას. თუ უგულველყოფთ მეზობელ სადგურებზე დატვირთვის ცვლილებას, და გავამარტივებთ გამოსახულებას მაშინ მივიღებთ:

$$F_2 = [1 - f(\bar{\sigma}(i))] \cdot \sum_{j \in N(i)} [\bar{ic}(j, i) \cdot f(\bar{\sigma}(j)) \cdot \bar{ic}(i, j)] \quad (2.23)$$

სადაც,

$$f(\bar{\sigma}(i)) = \frac{\bar{\sigma}(i)}{(1 + \bar{\sigma}(i)) \ln(1 + \bar{\sigma}(i))} \quad (2.24)$$

ხოლო,

$$\bar{ic}(j, i) = \sum_{(x,y) \in A(i)} \frac{P_u(x,y) P_{RX}(j,x,y) I(j)}{\sum_{k \in N(i)} P_{TX}(k,x,y) I(k) + n_0} \quad (2.25)$$

### 2.3 მეზობელი სადგურების სასურველი დონის ანგარიში

2.8 და 2.12 გამოსახულებიდან გამომდინარე შეგვიძლია გამოვთვალოთ:

$$F3 = \frac{\partial \sum_{j \in N(i)} S(j)}{\partial P_{TX}(i)} \quad (2.26)$$

$$= \frac{\partial (\sum_{j \in N(i)} \sum_{(x,y)} P_u(x,y) P_{RX}(j,x,y))}{\partial P_{TX}(i)}$$

რადგანაც არც  $P_u(x, y)$  და არც  $P_{RX}(j, x, y)$  არ არის დამოკიდებული  $P_{TX}(i)$ -ზე შესაბამისად:

$$F3 = 0 \quad (2.27)$$

### 2.4 მეზობელი სადგურების ინტერფერენციის ანგარიში

როგორც, ზემოთ გამოვთვალეთ:

$$F4 = \frac{\partial (\sum_{j \in N(i)} I(j))}{\partial P_{TX}(i)} \quad (2.28)$$

$$= \sum_{j \in N(i)} \sum_{(x,y) \in A(i)} P_u(x, y) \frac{\partial I(x,y)}{\partial P_{TX}(i)}$$

აღსანიშნავია ის, რომ  $N(j)$  ინტერფერენციაზე გავლენას ახდენს  $i$  ფიჭაც. ამის გამო გამოსახულება უნდა გავყოთ ორ ნაწილად:  $i$  ფიჭის შექმნილი

ინტერფერენციად და დანარჩენი სადგურების მიერ გამოწვეულ ხმაურად  $m \neq i$ :

$$\frac{\partial I(x, y)}{\partial P_{TX}(i)} = \frac{10}{\ln 10} \cdot \frac{1}{\sum_{m \in N(i)} P_{RX}(m, x, y) l(m) + n_0} \cdot \left[ \frac{\partial (\sum_{m \in N(j), m \neq i} P_{RX}(m, x, y) l(m))}{\partial P_{TX}(i)} + \frac{\partial (P_{RX}(i, x, y) l(i))}{\partial P_{TX}(i)} \right] \quad (2.29)$$

თუ გავიმეორებთ იგივე პროცესს, რაც გამოვიყენეთ წყაროს ინტერფერენციის ანგარიშის დროს მივიღებთ შემდეგს:

$$F_4 = [1 - f(\bar{\sigma}(j))] \cdot \sum_{j \in N(i)} [\bar{ic}(i, j) + \sum_{m \in N(j), m \neq i} \bar{ic}(m, j) \cdot f(\bar{\sigma}(m)) \cdot \bar{ic}(i, m)] \quad (2.30)$$

აქედან შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ დატვირთვის ცვლილება ფიჭაზე იწვევს ინტერფერენციის ცვლილებას გარშემო სადგურებზე და ასევე მეზობელი სადგურების დატვირთვის ცვლილება გავლენას ახდენს ამავე ფიჭის ხმაურზე.

## 2.5 თვითორგანიზებადი ცვლილებების ალგორითმი

თვითორგანიზებადი ცვლილებების განსახორციელებლად შეგვიძლია გამოვიყენოთ ევრისტიკული მეთოდი, რაც საშუალებას მოგვცემს ვცვალოთ სიმძლავრე და ანტენის დახრილობა თითოეული სექტორისთვის ისე, რომ ყოველი მომხმარებლისთვის მივიღოთ მაქსიმალური SINR-ის მნიშვნელობა და გავაუმჯობესოთ სისტემის საერთო ხარისხი. ამისათვის საჭიროა დავიხმაროთ კლასიკური გრადიენტულ ასვლის მეთოდი, რომელიც გვაჩვენებს საუკეთესო მნიშვნელობას ფიჭის დაფარვის არეალსა და მის გარეთ.

როგორც ზემოთ აღწერეთ  $\beta(i)$  ინდიკატორი ასახავს თუ რამდენად ახდენს გავლენას ფიჭის პარამეტრის ცვლილება საერთო სისტემის SINR-ზე.

გრადიენტული ასვლის ალგორითმი გამოიყენება როგორც მარტივი პროპორციული ობიექტების კომპლექტი, რომელიც გამოიანგარიშებს ცვლილებებს თითოეული ფიჭისათვის და გამოთვლის სისტემის ჯამურ ხარისხს [18]:

$$\Delta P_{TX}(i) = \begin{cases} -1, & \beta(i) \leq \beta_{min} \\ 0, & \beta_{min} < \beta(i) \leq \beta_{max} \\ 1, & \beta_{max} \leq \beta(i) \end{cases} \quad (2.30)$$

სადაც  $\beta_{min}$  და  $\beta_{max}$  არის ქვემო და ზედა საზღვარი ცვლილებების განხორციელებისათვის.

## 2.6 SON ქსელის პარამეტრების ცვლილებების სიმულაცია

სიმარტივისათვის ავიღოთ 44 საბაზო სადგურისაგან შედგენილი კლასტერი, რომელიც თავისთავად დაოფილია 3 სექტორიან და 1 სიხშირიან ფიჭებად. ფიჭების დეტალური ჩანაწერების პერიოდი შეადგენს 7 დღეს 100% ფრაქციით:

ცხრილი 2.1. სიმულაციისთვის საჭირო სადგურების მონაცემები

საბაზო სადგურების რაოდენობა	44
ფიჭების რაოდენობა	132
საშუალო მანძილი სადგურებს შორის [მ]	815
ოპერირების სიხშირე [მჰც]	734
სიხშირული ზოლი [მჰც]	20
რესურს ბლოკების რაოდენობა	100
მომხმარებელის მიმღები მოწყობილობის სიმაღლე [მ]	1.5
საბაზო სადგურის ანტენის სიმაღლე [მ]	[20-40]
საბაზო სადგურის გასხივების სიმძლავრე [დბმ]	[43-48]
ანტენის გაძლიერება [დბი]	[12-15]
ანტენის დახრა [°]	[0-12]

გავრცელების მოდელი	Winner II C2 [33] with for NLOS users
ქსელის უჯრედის ზომა [მ]	50
ტრაფიკის სივრცული განაწილების მოდელი	რეალური აბონენტების ადგილმდებარეობა
არსებული რესურსების გამოყენების ფაქტორი [%]	[5-70]

თვით-ოპტიმიზირება შეგვიძლია გავყოთ ორ ნაწილად. პირველ ეტაპზე საჭიროა დადგინდეს პრობლემური სადგურები მომსახურების ხარისხის, წყვეტების, გადატვირთვების ან გათიშვების მიხედვით, ხოლო მეორე ეტაპზე უნდა მოხდეს პარამეტრების ავტომატური ცვლილება ქსელის ხარისხის გაუმჯობესების მიზნით. მრავალწლიანმა პრაქტიკამ გვიჩვენა, რომ ანტენის დახრილობის ცვლილება ყველაზე ეფექტურ შედეგს გვაძლევს მობილური ქსელის მომსახურების გაუმჯობესების მხრივ, მითუმეტეს, რომ მისი დისტანციურად კონტროლირება უპრობლემოდ არის შესაძლებელი RET-ის გამოყენებით. მიუხედავად იმისა, რომ ანტენის დახრილობის ცვლილება აქტიურად გამოიყენება თვით-ოპტიმიზირებად სისტემებში, არსებობს გარკვეული გამოწვევები, რომლებიც დაკავშირებულია რეალურ ქსელებში ანტენის ცვლილების ოპტიმიზაციის დაწერგვასთან დაკავშირებით.

თვით-ოპტიმიზირების პროცესში, დატვირთვის დაბალანსების კონტროლი ხდება ანტენის დახრილობის გამოყენებით, რომელიც პირველ ეტაპზე ადგენს კრიტიკულ სადგურებს წინასწარ დადგენილი ზღვრების მიხედვით. გასათვალისწინებელია ისიც, რომ ქსელის დატვირთვის ცვლილების დროს არ მოხდეს სიგნალის დონის შემცირება. ასევე, ხდება მეზობელი სადგურების დატვირთვის ანალიზი, რომ დატვირთვის დაბალანსებამ უარყოფითი გავლენა არ იქონიოს მომსახურების (QoS) ხარისხზე.

საბაზო სადგურებზე ტრაფიკის დატვირთვა დამოკიდებულია მომხმარებლის ადგილმდებარეობაზე. შესაბამისად, მასზე არსებული რესურსების გამოყენების დინამიკის პროგნოზირება ძალიან ძნელია. რადგანაც, ერთი ანტენის დახრილობის ცვლილებამ შესაძლებელია გამოიწვიოს სადგურის დაფარვის არეალის ცვლილება, ამიტომ აუცილებელია მოიძებნოს ერთი ან რამოდენიმე მეზობელი სადგურები, რომლებიც გადაინაწილებენ ტრაფიკს მომსახურების ხარისხის გაუარესების გარეშე. ამის გამო, თითოეული სადგურის პარამეტრის ცვლილების დროს აუცილებელია განვიხილოთ მის გარშემო არსებული სადგურების სისტემა.

რადგანაც ერთ სადგურზე ერთი პარამეტრის ცვლილება იწვევს მის გარშემო არსებული სადგურებზე დატვირთვისა თუ დაფარვის არეალის ცვლილებას, მაშინ მთელი ეს პროცესი შესაძლებელია ჩაიწეროს კლასიკურ მრავლცვლადიან ოპტიმიზაციის განტოლებად. ამ განტოლების ფორმულირება შესაძლებელია მოხდეს რამოდენიმე დამოუკიდებელი კომპონენტის: დაფარვის, მომსახურების ხარისხისა და ტევადობის მაქსიმიზირებით. თვით-ოპტიმიზაციის ფოკუსიც შესაძლებელია შეიცვალოს მობილური ქსელის ოპერატორის პრიორიტეტების მიხედვით. სიმარტივისათვის ამ ნაშრომში განვიხილავთ მხოლოდ ტევადობაზე დაფუძნებულ ოპტიმიზაციას, რადგანაც ის პირდაპირ კავშირშია სპექტრალურ ეფექტურობასთან, რომელიც თავისთავად დამოკიდებულია ქსელის ხარისხზე:

SIR – ის მაქსიმალური მნიშვნელობისათვის:

$$s_t = \sum_i^n \bar{s}(i) \quad (2.31)$$

რომელიც ექვმდებარება:

$$\bar{s}_{c\#}(i) > s_{c\#\min}(i) \quad (2.32)$$

სადაც  $\bar{s}(i)$  არის სადგურის i-ს საშუალო SIR-ის მნიშვნელობა,  $\bar{s}_{c\#}(i)$  არის სადგურის i-ს დაფარვის საზღვარზე საშუალო SIR-ის მნიშვნელობა, ხოლო  $s_{c\#\min}(i)$  არის საჭირო მინიმალური მნიშვნელობა ფიჭის საზღვარზე.

შეზღუდვების არარსებობის შემთხვევაში მინიმალურმა მნიშვნელობამ უნდა დააკმაყოფილოს შემდეგი პირობა:

$$\frac{\partial S_t}{\partial P_{TX}(i)} = 0 \quad \forall i \quad (2.33)$$

ასევე, თუ გავითვალისწინებთ, რომ ანტენის ტილტის ცვლილება გავლენას ახდენს მხოლოდ ამ სადგურის გარშემო არსებული მეზობელ სადგურებზე, მოცემული პირობა გადაიწერება შემდეგნაირად:

$$\frac{\partial S_t}{\partial P_{TX}(i)} \approx \frac{\partial (\bar{S}(i) + \sum_{j \in N(i)} \overline{\sigma(j)})}{\partial P_{TX}(i)} \quad (2.34)$$

სადაც  $N(i)$  არის  $i$  ფიჭის მეზობლები. ფორმულა გვიჩვენებს, რომ ფიჭის ტილტის შემცირება აუმჯობესებს მომსახურების ხარისხს თავის დაფარვის ზონაში:

$$\frac{\partial (\bar{S}(i))}{\partial P_{TX}(i)} > 0 \quad (2.35)$$

მაგრამ ამავედროულად ზრდის ინტერფერენციას მეზობელ ფიჭებზე:

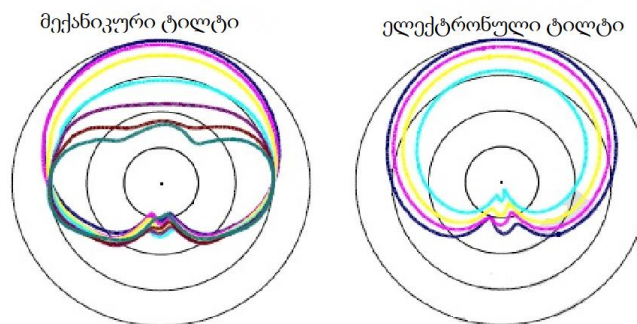
$$\frac{\partial (\sum_{j \in N(i)} \overline{\sigma(j)})}{\partial P_{TX}(i)} < 0 \quad (2.36)$$

ანტენის დახრილობა არის კუთხე ანტენის მთავარ მიმართულებასა და ჰორიზონტს შორის. იგი იზომება გრადუსებში და შესაძლებელია ჰქონდეს როგორც დადებითი ასევე უარყოფითი მნიშვნელობები. დადებითი მნიშვნელობა გულისხმობს რომ ანტენა დახრილია ჰორიზონტთან მიმართებაში, ხოლო უარყოფითი ტილტის დროს ანტენა ახრილია ჰორიზონტის მიმართ.



ნახ. 2.1. ანტენის დახრილობა

არსებობს დახრილობის ცვლილების ორი მეთოდი: მექანიკური და ელექტრონული. მექანიკური ტილტის ცვლილება ხდება ანტენის სამაგრების ფიზიკური გადაადგილებით, ხოლო ელექტრონული ცვლილების დროს ხდება ანტენის ელემენტებს შორის ფაზების სხვაობის შეცვლა, რომლის საშუალებით ანტენის ფიზიკური მოძრაობის გარეშე იცვლება მისი გასხივების დიაგრამის კუთხე.

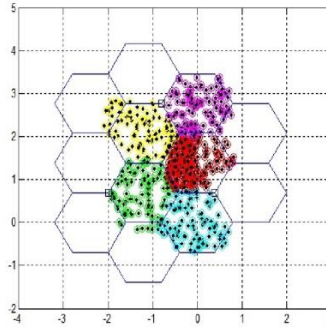


ნახ.2.2. მექანიკური და ელექტრონული ტილტის შედარება

ანტენის დახრაზე დატვირთვის დამოკიდებულების ანგარიშისთვის შესაძლებელია გამოვიყენოთ სიგნალის დონეზე დამოკიდებული დატვირთვის ბალანსის მოდელი, რომელიც პირდაპირ აჩვენებს ანტენის დახრილობის კავშირს სადგურის დაფარვის არეალთან და საუკეთესოდ ერგება სიტუაციას, როდესაც მეზობელ სადგურების დატვირთვებს შორის სხვაობა საკმაოდ განსხვავებულია. ჩვენ ავიღეთ რამოდენიმე საბაზო სადგური, სადაც თვითოეულ ფიჭის მიმართული ანტენები განვათავსეთ



ჰექსაგონების მიხედვით, ხოლო აბონენტების ადგილმდებარეობა დავაგენერირეთ მონტე-კარლოს განაწილების მეთოდით.



ნახ.2.3. არაბალანსირებული ტრაფიკის განაწილება ერთნაირი ანტენის დახრილობების შემთხვევაში

სიგნალის მილევა ( $L$ ) დამოკიდებულია მანძილსა და სიხშირეზე, რომელიც ჩვენს შემთხვევაში არის 2გჰც:

$$L = 128.1 + 37.6 \log(d) \quad (2.37)$$

სადაც,  $d$  არის მანძილი კმ-ში. აქედან გამომდინარე მიღებული სიგნალის დონე მობილურის მიმღებზე იქნება:

$$P_r = P_t - L + G_h(\varphi) + G_v(\theta) \quad (2.38)$$

სადაც  $P_t$  არის საბაზო სადგურიდან გადაცემული სიმძლავრე, ხოლო  $G_h$  და  $G_v$  არიან ანტენის ჰორიზონტალური და ვერტიკალური გაძლიერებები შესაბამის ( $\varphi$ ) და ( $\theta$ ) კუთხეების მიმართულებით.

აბონენტები უკავშირდებიან საუკეთესო სიგნალისა და (Signal to Interference Ratio) SIR-ის მქონე საბაზო სადგურებს. სადაც, SIR-ის მნიშვნელობის გამოსათვლელად  $j$  ტერმინალისთვის, რომელიც დაკავშირებულია  $i$  საბაზო სადგურთან შეგვიძლია გამოვიყენოთ შემდეგი ფორმულა:

$$\left(\frac{S}{I}\right)_j = \frac{P_{t,i} * G_{i,j}}{\sum_{k \neq i}^n \frac{P_{t,k} * G_{i,k}}{L_{i,k}}} \quad (2.39)$$

როგორც, ნახ.3-ზე ჩანს, წითელი ფერით აღნიშნულ ფიჭის დაფარვის არეალში მყოფი აბონენტების სიმჭიდროვე გაცილებით აჭარბებს მის გარშემოარსებული ფიჭების სიმჭიდროვეს, რადგანაც აბონენტების ადგილმდებარეობა ახლოს არის მოცემულ სადგურთან, ხოლო SIR-ის მნიშვნელობა მანძილის უკუპროპორციულია, რაც შესაბამისად იწვევს ამ ფიჭის დატვირთვის მეზობელ სადგურებთან შედარებით არაპროპორციულ ზრდას.

ნაშრომში განხილული სიმულაციისთვის გამოყენებულია ელექტრონული ტილტის მქონე მიმართული ანტენა, რომლის გაძლიერება ჰორიზონტალურ სიბრტყეში გამოითვლება შემდეგი ფორმულით [19]:

$$G_h = - \min \left( 12 * \left( \frac{\phi}{HPBW_h} \right)^2, FBR \right) + G_{max} \quad (2.40)$$

სადაც,  $G_{max}$  არის ანტენის მაქსიმალური გაძლიერება, HPBW არის ნახევარი სიმძლავრის გაშლის კუთხე, FBR არის წინა და უკანა მხარეს შორის ფარდობა, ხოლო  $\phi$  არის ჰორიზონტალური კუთხე ტერმინალსა და ანტენის პირდაპირ მიმართულებას შორის. ჩვენს შემთხვევაში გამოვიყენეთ ანტენა შემდეგი მახასიათებლებით:

- $G_{max}=21\text{dBi}$
- $HPBW=70$
- $FBR=20\text{dB}$
- $-180 \leq \phi \leq 180$

გაძლიერება ვერტიკალურ სიბრტყეში გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$G_v = \max \left( -12 * \left( \frac{\theta - \theta_{tilt}}{HPBW_v} \right)^2, SLL \right) \quad (2.41)$$

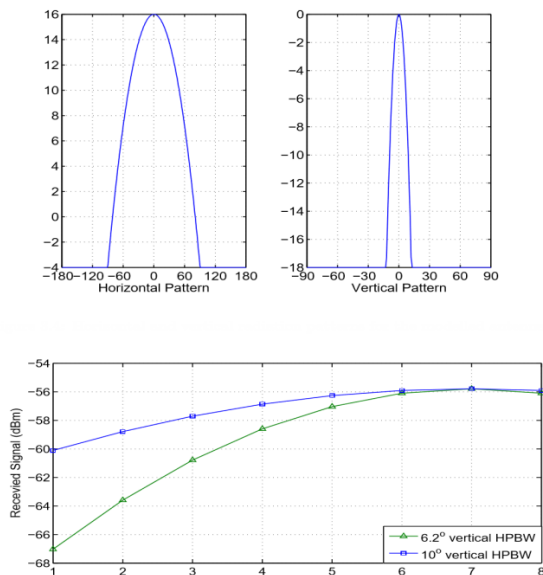
სადაც, HPBW არის ნახევარი სიმძლავრის გაშლის კუთხე, SLL არის გვერდითა ფოთოლის დონე, ხოლო  $\theta$  არის ვერტიკალური კუთხე ტერმინალსა და ანტენის პირდაპირ მიმართულებას შორის. ჩვენს შემთხვევაში გამოყენებული მნიშვნელობები მოცემულია ქვემოთ:

- $-90 \leq \theta \leq 90$
- $HPBW_V = 10$
- $SLL = -18dB$

სიმულაციის დროს ტერმინალი განვითავსეთ 25მ სიმაღლის მქონე საბაზო სადგურიდან 500მ დაშორებით. ვერტიკალური კუთხის გამოთვლა შესაძლებელია შემდეგი ფორმულით:

$$\theta = \arctan\left(\frac{h_{BS}-h_m}{d}\right) \quad (2.42)$$

სადაც,  $h_{BS}$  არის საბაზო სადგურის სიმაღლე,  $h_m$  მობილურის სიმაღლე, ხოლო  $d$  მობილურსა და საბაზო სადგურს შორის მანძილი. როგორც ნახ.4-ზე შედარებული ორი სხვადასხვა ტიპის ანტენის შედარებიდან ჩანს, ანტენის დახრას მით უფრო მეტი გალენა აქვს, რაც უფრო ვიწროა ანტენის ვერტიკალური ფოთოლის სიგანე. ასევე აღსანიშნავია ისიც, რომ ანტენის მახასიათებლების მიუხედავად არსებობს ოპტიმალური დახრის კუთხე, რომელიც არ არის დამოკიდებული ფოთოლის სიგანეზე.



ნახ.2.4. ანტენის მახასიათებლები და მიღებული სიგნალის დამოკიდებულება დახრის კუთხეზე

თვით-ოპტიმიზირებადი ცვლილებების შესასრულებლად შესაძლებელია ევრისტიკული მეთოდის გამოყენება, რაც საშუალებას

მოგვეცემს ვცვალოთ ანტენის დახრილობა თითოეული ფიჭისთვის, რათა მოხდეს შედეგის ფოკუსირება ყოველი მომხმარებლისთვის მაქსიმალური SINR-ის მნიშვნელობის მიწოდებისთვის და გაუმჯობესდეს საერთო სისტემის ხარისხი. ასევე გვჭირდება კლასიკური გრადიენტული ასვლის მეთოდი, რომელიც გვამძლევს საშუალებას გვაჩვენოს საუკეთესო მნიშვნელობა სადგურის დაფარვის არეალსა და მის გარეთ.

როგორც ზემოთ აღვწერეთ  $\beta(i)$  მაჩვენებელი ასახავს ფიჭის პარამეტრის ცვლილების გავლენას საერთო სისტემის SIR-ზე. გრადიენტული ასვლის მექანიზმის გამოყენება შესაძლებელია, როგორც პროპორციული მარტივი ობიექტების ჯგუფისთვის, რომელიც გამოთვლის თითოეული სადგურისთვის საჭირო ცვლილებებს და გამოიანგარიშებს სისტემის საერთო მომსახურების ხარისხს:

$$\Delta P_{TX}(i) = \begin{cases} -1, & \beta(i) \leq \beta_{min} \\ 0, & \beta_{min} < \beta(i) \leq \beta_{max} \\ 1, & \beta_{max} \leq \beta(i) \end{cases} \quad (2.43)$$

სადაც  $\beta_{min}$  და  $\beta_{max}$  არის ქვემო და ზედა საზღვარი ცვლილებების განხორციელებისათვის. სიმულაციის დროს ჩვენი მიზანი იყო გვეჩვენებინა ანტენის დახრილობის ეფექტური გამოყენების მნიშვნელობა არათანაბარი ტრაფიკის განაწილების დროს. სიმულაციისთვის საჭირო დამატებითი პარამეტრები მოცემულია ცხრილში.

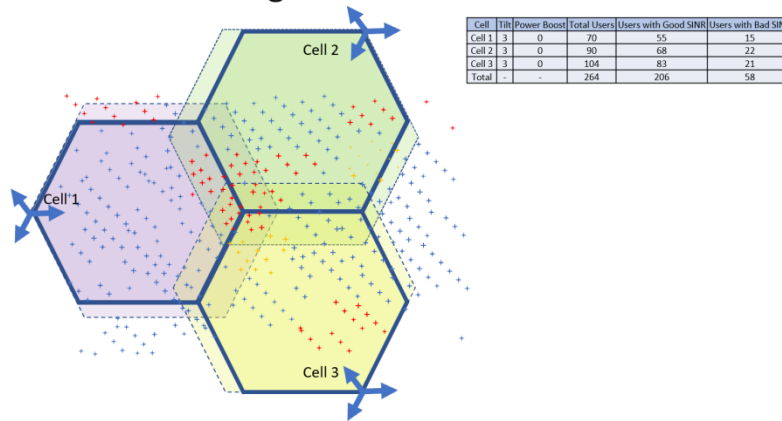
**ცხრილი 2.2. სიმულაციის პარამეტრები**

პარამეტრი	მნიშვნელობა
საბაზო სადგურის სიმაღლე	25მ
მობილურის სიმაღლე	1.5მ
ფიჭის რადიუსი	800მ
სიგნალის მილევა	$L = 128.1 + 37.6 \cdot \log(d)$
საბაზო სადგურის გადაცემის სიმძლავრე	43დბმ
ანტენის გაძლიერება	16დბი
ანტენის მთავარი ფოთლის ჰორიზონტალური გაშლა	70
ანტენის მთავარი ფოთლის ვერტიკალური გაშლა	10
ტილტის ცვლილება	0 – 10

ტილტის გაზრდის ბიჯი	1
ტილტის ტიპი	ელექტრონული

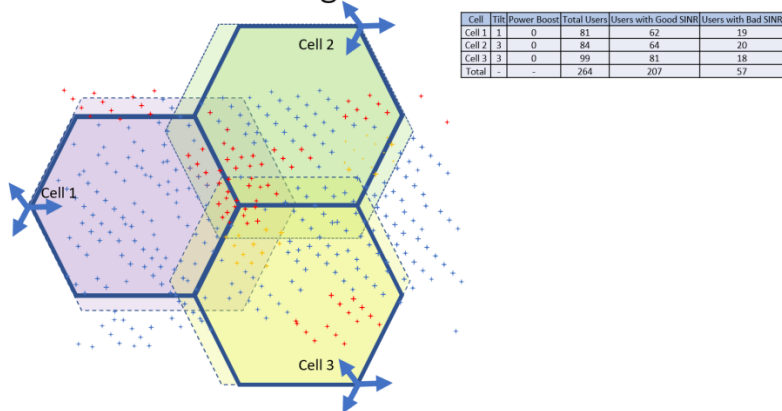
თითოეული საბაზო სადგურის არსებული ტილტების მნიშვნელობების ცვლილება განხორციელდა სხვადასხვა იტერაციად. მთავარი მიზანი იყო გადატვირთული ფიჭების დახრა და ტრაფიკის გადანაწილება მეზობელ სადგურებზე. დატვირთვის მნიშვნელობა გამოვითვალეთ ფიჭაში არსებული აბონენტების რაოდენობის ფარდობით მაქსიმალური შესაძლებელი აბონენტების რაოდენობაზე ერთი ფიჭისთვის.

Actual Cell coverage



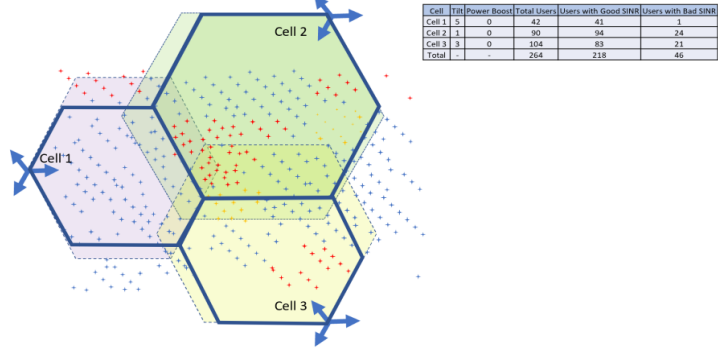
ნახ. 2.5 ცვლილება 1

Simulated Cell coverage



ნახ. 2.6 ცვლილება 2

Simulated Cell coverage



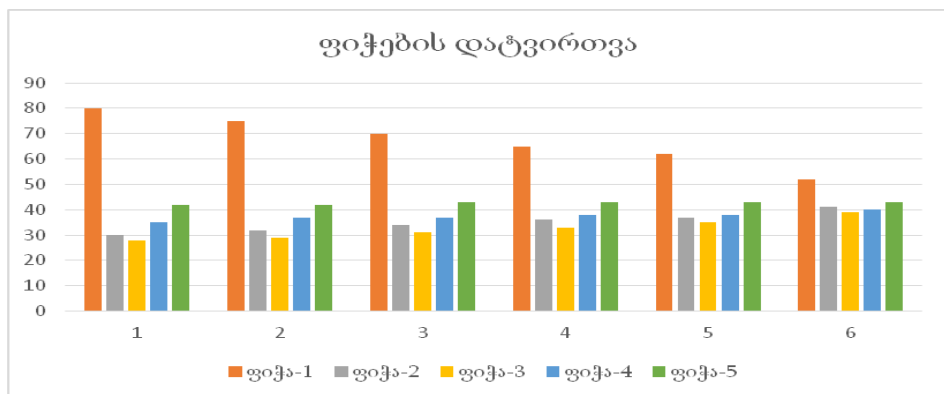
ნახ.2.7. ცვლილება 3

პირველ ეტაპზე მოვახდინეთ გადატვირთული სექტორების დახრა და მისი უშუალო მეზობლების ანტენების ახრა.

ცხრილი 2.3. იტერაციის მნიშვნელობები

იტერაცია	სექტორი 1	სექტორი 2	სექტორი 3	სექტორი 4
1				
2	+1			
3	+1	-1	-1	
4	+2	-1	-1	-1
5	+2	-2	-2	-1
6	+3	-2	-2	-1

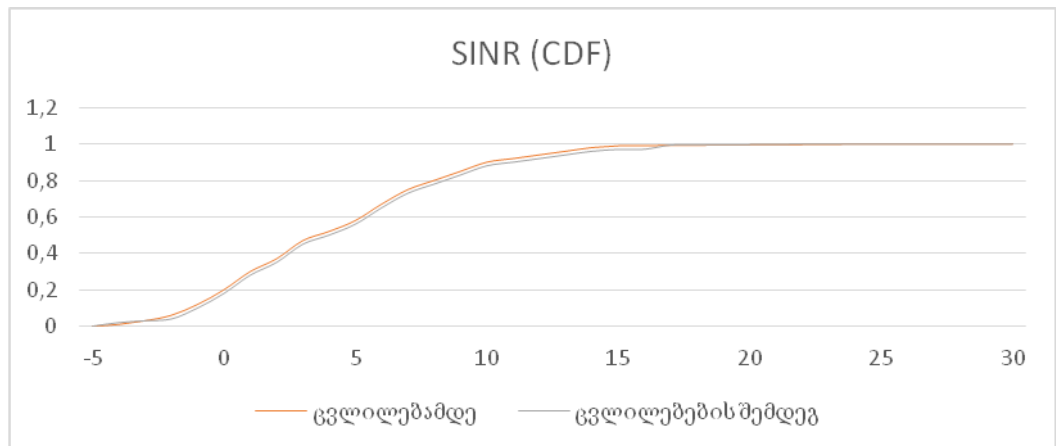
ექვსი იტერაციის შემდეგ მიღებული იქნა საუკეთესო შედეგი, რომელიც ნაჩვენებია ნახ.4.8-ზე:



ნახ.2.8. სიმულაციის შედეგი

სიმულაციის შედეგმა გვაჩვენა 28% -ით დატვირთვის შემცირება, მაშინ როდესაც მეზობელ სადგურებზე მხოლოდ 9%-14%-იანი ზრდა დაფიქსირდა და არცერთი ფიჭა არ დარჩა გადატვირთული.

ანტენის დახრილობის მეთოდის გამოყენების დროს მთავარი პრობლემა არის იგივე მომსახურების ხარისხის QoS შენარჩუნება. ეს განსაკუთრებით შეეხება პაკეტურ მომსახურებებს, სადაც სიჩქარე პირდაპირ კავშირშია რადიო არხის ხარისხსა და მიღებული SIR-ზე. როგორც ნახ.6-ზე ჩანს, ზოგიერთ აბონენტისთვის მცირედით გაუარესდა SIR-ის მნიშვნელობა, მაგრამ საერთო ჯამში განსხვავება ნაკლებად შეიმჩნევა, რადგან რიგი აბონენტებისთვის მნიშვნელოვნად გაუმჯობესდა ხარისხი, რომელიც აკომპენსირებს გაუარესებას.



ნახ.2.9. SIR-ის შედარება ცვლილებამდე და ცვლილების შემდეგ

## 2.7 დასკვნა მე-2 თავის შედეგების მიხედვით

1. ნაშრომში განსაზღვრულია ფიჭების დაგეგმარების პრობლემები და მოხდენილი მათი მათემატიკური ფორმულირება, რომელთა შემდგომი ანალიზით შესაძლებელია სისტემის ფუნქციონირების სხვადასხვა მაჩვენებლებით შეფასება და მათი ანალიზი.
2. დადგინდა, რომ თითოეული ფიჭის პარამეტრის შეცვლა იწვევს დაფარვის მახასიათებლის ცვლილებას როგორც ფიჭის შიგნით, ასევე მის მეზობელ ფიჭებზე.
3. ანტენის დიაგრამების გაანალიზების შედეგად დამტკიცდა, რომ ყველა სახის ანტენისათვის შესაძლებელია მოიძებნოს ოპტიმალური დახრის მნიშვნელობა, რომელიც საუკეთესო მნიშვნელობას გვიჩვენებს მთლიანი სისტემის ხარისხობრივი მაჩვენებლებისათვის.

4. გამოყენებული უხეში ძალის მეთოდის საშუალებით გავანალიზეთ ფიჭებზე არსებული ყველა ანტენის მნიშვნელობების შესაძლო ვარიანტები და ამორჩეული იქნა საუკეთესო პარამეტრები.
5. გამოკვლეული იქნა სხვადასხვა მრავალწევრიანი გენეტიკური ალგორითმები (MOGA – Multi-Objective Genetic Algorithm) და შედარებული იქნა უხეში ძალის მეთოდთან.
6. შემუშავებული იქნა ახალი ალგორითმი, რომლის დახმარებითაც მოხერხდა გადატვირთული საბაზო სადგურები და მოხდა მათი განტვირთვა მეზობელ სადგურებზე ტრაფიკის გადანაწილების შედეგად.
7. სიმულაციის შედეგად მიღწეული იქნა გადატვირთული ფიჭის ტრაფიკის 28%-იანი შემცირება, ხოლო მეზობელ სადგურებზე მხოლოდ 10% მაქსიმალური მატება დაფიქსირდა.



### 3 გეოლოკაციის გამოყენება რადიო პაკეტების დამგეგმავის ალგორითმებში

ჩვენს მიერ გამოკვლეული იქნა ახალი გეოლოკაციაზე დაფუძნებული ადაპტური რადიო პაკეტების დამგეგმავის ალგორითმი. ასევე მოყვანილია მისი შედარება პაკეტების დაგეგმარების სხვა ცნობილ სქემებთან, ნაჩვენებია მისი LTE სისტემაში გამოყენების სიმულაცია და განხილულია შედარებით ელასტიური, EPF (Enhanced Proportional Fair) ალგორითმი, რომლის თანახმადაც, სამართლიანობის დონის სპექტრული ეფექტურობის ცვლილება დამოკიდებული არის ალფა ( $\alpha$ ) პარამეტრზე. EPF ალგორითმი მიზანია სისტემის გამტარუნარიანობის რეგულირება და გაუმჯობესება კლასიკურ PF ალგორითმთან მიმართებაში. აღნიშნული EPF სქემის ჩაწერა შესაძლებელია ფორმულით [20]:

$$m_{i,k}^{Enh} = \log_2 \left( r_k^i(t) \right) - \alpha \log_2 \left( (t_c - 1) \bar{R}^i(t) + r_i(t) \right) \quad (3.1)$$

შესაბამისად,  $j$  მომხმარებელისთვის გამოყოფილი რესურსები შეგვიძლია გამოვიყვანოთ შემდეგნაირად:

$$j = \arg \max_i \log_2 \left( r_k^i(t) \right) - \alpha \log_2 \left( (t_c - 1) \bar{R}^i(t) + r_i(t) \right). \quad (3.2)$$

როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) სამართლიანობის პარამეტრის საშუალებით შესაძლებელი ხდება პაკეტების დამგეგმავის მონაცემთა გადაცემის სიჩქარესა და სამართლიანობის რეგულაცია.

ჩვენს მიერ განხილული ადაპტიური APF (Adaptive Proportional Fair) ალგორითმი იყენებს EPF მოდულაციას, რაც გულისხმობს  $\alpha$  მნიშვნელობის პერიოდულ ცვლილებას  $t$  წამში ერთხელ (ეს დრო პირობითია და შესაძლებელია მისი შემცირება ან გაზრდა, ჩვენს შემთხვევაში კი  $t=30$ ) აბონენტის ადგილმდებარეობის, რესურსებისა და საშუალო მომსახურების ხარისხის მიხედვით [21]. მისი მათემატიკური ფორმულირება კი მოცემულია ქვემოთ:

$$\alpha = \begin{cases} 1 & \text{if } T_{Cell} < 1.5 \text{ or } Dist > 3, \\ 0.9 & \text{if } N_{UE} > 90 \text{ or } 2.5 < Dist \leq 3, \\ 0.8 & \text{if } Q_{Avg} < 4 \text{ or } 2 < Dist \leq 2.5, \\ 0.7 & \text{if } 4 < Q_{Avg} \leq 5 \text{ or } 1.8 < Dist \leq 2, \\ 0.6 & \text{if } 5 < Q_{Avg} \leq 6 \text{ or } 1.5 < Dist \leq 1.8, \\ 0.5 & \text{if } 6 < Q_{Avg} \leq 7 \text{ or } 1.2 < Dist \leq 1.5, \\ 0.3 & \text{if } 7 < Q_{Avg} \leq 8 \text{ or } 1.0 < Dist \leq 1.2, \\ 0.1 & \text{if } 8 < Q_{Avg} \leq 10 \text{ or } 0.5 < Dist \leq 1.0, \\ 0 & \text{if } 10 < Q_{Avg} \text{ or } Dist < 0.5. \end{cases} \quad (3.3)$$

სადაც Dist არის საბაზო სადგურსა და აბონტებს შორის საშუალო მანძილი კილომეტრებში,  $T_{Cell}$  არის მომხმარებლების საშუალო გადმოტვირთვის სიჩქარე მეგაბიტ/წმ-ში(Mbps),  $Q_{Avg}$  - რადიო არხის გასაშუალოებული ხარისხის მაჩვენებელი, რომელიც გამოხატულია CQI ინდექსით, ხოლო  $N_{UE}$  არის ერთდროულად დაკავშირებული აბონენტების რაოდენობა. ალგორითმის მუშაობის ლოგიკა შემდეგშია: თუ ფიჭის აბონენტების საშუალო სიჩქარე 1.5 მ.ბიტზე-ზე ნაკლებია ან საშუალო მანძილი 3 კმ-ზე მეტია, მაშინ სამართლიანობის მაჩვენებელი  $\alpha=1$  და პაკეტების დამგეგმავის პრინციპი ემთხვევა კლასიკურ PF დამგეგმავის პრინციპს. საბაზო სადგურამდე მანძილის შემცირებასთან ერთად მცირდება  $\alpha$  მნიშვნელობაც რაც სისტემის სპექტრული ეფექტურობის ზრდაზე მეტყველებს.

პაკეტების ადაპტური დამგეგმავის გეოლოკაციის ფაქტორით დაოპტიმიზირებული ალგორითმი შედარებულია სხვადასხვა პაკეტების დამგეგმავის ალგორითმებთან. ესენია:

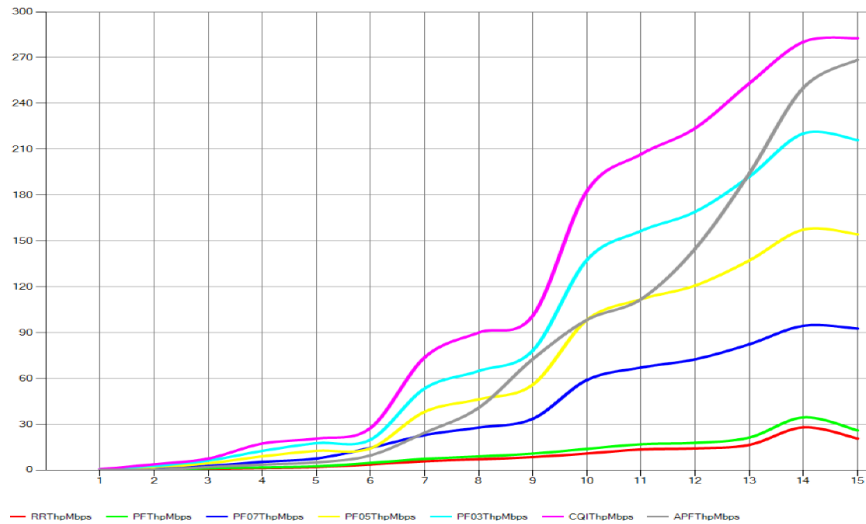
- RR – Round Robin,
- PF – Proportional Fair,
- PF7 –  $\alpha = 0.7$ ,
- PF5 –  $\alpha = 0.5$ ,
- PF3 – როდესაც  $\alpha = 0.3$  და
- CQI - საუკეთესო CQI

მოდელირებისთვის საჭირო პარამეტრები მოცემულია ცხრილში 3.1:

**ცხრილი 3.1 APF ალგორითმის სიმულაციის პარამეტრები**

<u>სიმულაციის პარამეტრები</u>	<u>მნიშვნელობა</u>
ფიჭების რაოდენობა	1
ფიჭის რადიუსი	15 კმ
სიხშირული ზოლის სიგანე (Bandwidth)	20 მჰც
სიხშირე	1900 მჰც
გადაცემის ტიპი	FDD
MIMO	4x4
რესურსების რაოდენობა (PRB-s)	100
ქვეგადამტანების (Subcarrier) რაოდენობა	1200
ქვეგადამტანებს შორის დაშორება	15 kHz
დამგეგმავის ინტერვალი (TTI)	1 მწმ
OFDMA სიმბოლო TTI-სთვის	14
გადაცემის სიმძლავრე	52.04 დბმ
Path Loss	Cost 231 Hata Model
მოდელირების ტიპი	ზრდადი მონტე-კარლოს სიმულაცია
მოდულაცია და კოდირების სქემა	QPSK, 16QAM, და 64QAM
პაკეტების გადამცემის დამგეგმავის ტიპი	RR, PF, PF7, PF5, PF3, Best CQI and A-PF
მოდელირების სიხშირე	1 ცვლილება/წმ
მოდელირების ხანგრძლივობა	3 სთ

სისტემის ჯამური მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის მოდელირებული მნიშვნელობების შედარება მოყვანილია ნახ.3.1-ზე. სიმულაცია იწყება 10 აბონენტით, რის შემდეგაც, ყოველ წამში მონტე-კარლოს პრინციპით ემატება ახალი მომხმარებელი შემთხვევითი CQI მაჩვენებლითა და ბუფერში გადასაცემი ბიტების რაოდენობით.



**ნახ.3.1. სისტემის გამტარუნარიანობის [Mbps] ხარისხთან [CQI] დამოკიდებულება**

როგორც მოსალოდნელი იყო, სიმულაციის შედეგებმა გვიჩვენა, რომ სისტემის საუკეთესო გამტარუნარიანობა შეესაბამება საუკეთესო CQI დამგეგმავის მრუდს, რადგანაც ამ დროს, პირველ რიგში ხდება რადიო რესურსების გამოყოფა ხარისხიანი კავშირის მქონე აბონენტებისთვის [22]. მოცემული გრაფიკის უმალო მნიშვნელობები ასევე მოცემულია ცხრილ 3.2-ში.

**ცხრილი 3.2. სისტემის გამტარუნარიანობის შედარება**

CQI (Ind.)	RRTThpMbps	PFThpMbps	PF07ThpMbps	PF05ThpMbps	PF03ThpMbps	CQIThpMbps	APFThpMbps
1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.1
2	0.2	0.2	1.2	1.9	2.7	3.8	0.2
3	0.9	1.3	2.6	4.4	6.2	7.5	2.0
4	1.4	1.7	5.4	9.0	12.5	17.4	3.5
5	1.9	2.4	7.5	12.6	17.6	20.6	5.0
6	3.7	4.6	14.5	14.2	19.9	27.5	9.6
7	5.8	7.3	22.9	38.2	53.4	73.7	24.4
8	7.0	8.9	27.8	46.3	64.9	90.0	40.8
9	8.5	10.7	33.6	55.9	78.3	101.1	72.7
10	10.8	13.9	59.0	98.3	137.6	182.7	98.3
11	13.5	16.9	67.1	111.9	156.6	206.9	111.9
12	14.2	17.8	72.5	120.8	169.1	223.8	145.0
13	16.4	21.3	82.3	137.2	192.1	253.2	194.2
14	28.0	34.5	94.5	157.4	220.4	280.4	250.4
15	20.6	25.9	92.6	154.4	216.1	282.8	268.7

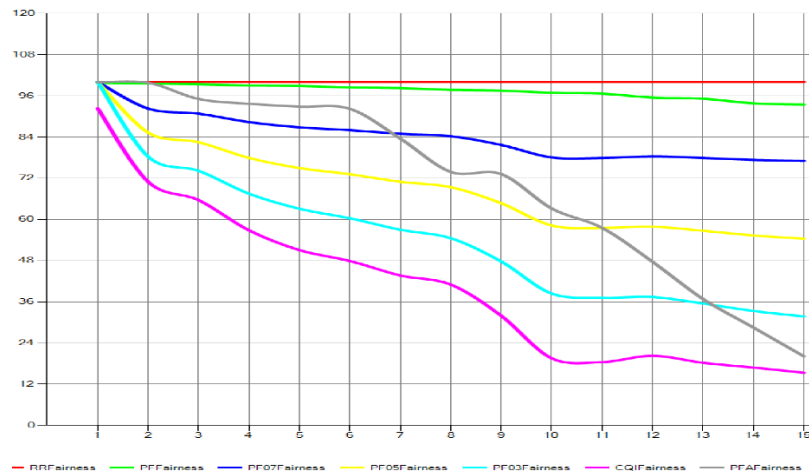
ასევე აღსანიშნავია, რომ საუკეთესო გამტარუნარიანობის მიუხედავად, სისტემის სამართლიანობის თვალსაზრისით Best CQI მეთოდი არასამართლიანია. რეალურად, მობილური ოპერატორების ქსელში, სხვადასხვა მომხმარებლისთვის რადიო არხის პირობები ძალიან

განსხვავებულია და დამოკიდებულია ძალიან ბევრ ფაქტორზე. ესენია: აბონენტის ადგილმდებარეობა, საბაზო სადგურსა და აბონენტს შორის არსებულ სიგნალის მიღება, და ა.შ. ამის გამო შესაძლებელია, რომ არადამაკმაყოფილებელი რადიო პირობების მქონე აბონენტებს (სხვადასხვა ფიჭების საზღვარზე) რესურსის გამოყოფის გარეშე დარჩნენ, რადგანაც შესაძლებელია ყოველთვის იყოს რომელიმე მომხმარებელი, რომელსაც უკეთესი მომსახურების ხარისხი აქვს, შესაბამისადაც ექნება მაღალი პრიორიტეტი რესურსის გამოყოფის დროს. ამიტომაც, ეს მეთოდი ხანდახან შესაძლებელია მიუღებელი აღმოჩნდეს მომსახურების მიწოდების თვალსაზრისით. რაც შეეხება RR (Round Robin) დამგეგმავს, რომელმაც ყველაზე დაბალი გამტარუნარიანობა აჩვენა, ყოველგვარი მომსახურების ხარისხისა და ადგილმდებარეობის გათვალისწინების გარეშე ანიჭებს თანაბარ რესურსს ყველა აბონენტს, რომლებსაც აქვს გადასაცემი ინფორმაცია დაგროვების ბუფერში. შესაბამისად, ცუდი ხარისხის აბონენტები, რომლებიც უფრო დიდხანს ანდომებენ ინფორმაციის გადაცემას, უარყოფიდად მოქმედებს მთლიანი სისტემის გამტარუნარიანობაზე.

რაც შეეხება Proportional Fair (PF) მეთოდს, რომელიც ყველაზე მეტი პოპულარობით სარგებლობს მობილურ ოპერატორებში და შეუძლია გადაანაწილოს სისტემის რესურსი გამტარუნარიანობასა და სამართლიანობას შორის წინასწარ განსაზღვრული ფარდობით. ამ ფარდობას განსაზღვრავს ზემოთ მოყვანილი ალფა პარამეტრი, რომლის მნიშვნელობები ჩვენს შემთხვევაში წარმოდგენილია PF7 ( $\alpha = 0.7$ ), PF5 ( $\alpha = 0.5$ ) და PF3 ( $\alpha = 0.3$ ) მეთოდებით. ჩვენი მიზანი იყო შეგვედარებინა ზემოთ აღნიშნული მექანიზმები ჩვენს მიერ შემუშავებულ მეთოდთან და შეგვეფასებინა გაუმჯობესება სხვადასხვა მაჩვენებლებით.

ნახ. 3.1 და ცხრილი 3.2 გვიჩვენებს მოდელირებულ სქემების მნიშვნელობებს ყველა CQI ინდექსისათვის (1-15). როგორც ვხედავთ, APF ალგორითმი საგრძნობლად გამოირჩევა სისტემის საერთო სიჩქარით (THP)

კლასიკურ PF ალგორითმთან შედარებით. მაგალითისთვის შეგვიძლია გავანალიზოთ მრუდების მნიშვნელობები: CQI(6) ისათვის ნაჩვენებია 110% გაუმჯობესება ხოლო CQI(9) - 30% გაუმჯობესება PF05 სქემასთან მიმართებით, CQI(14) აჩვენებს 14% გაუმჯობესებას PF03 სქემასთან შედარებით. ზემოთ მოყვანილი შედეგების საფუძველზე კი შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ შემოთავაზებული APF სქემა მნიშვნელოვნად ზრდის სისტემის გამტარუნარიანობასა და სპექტრის ეფექტურად გამოყენებას.



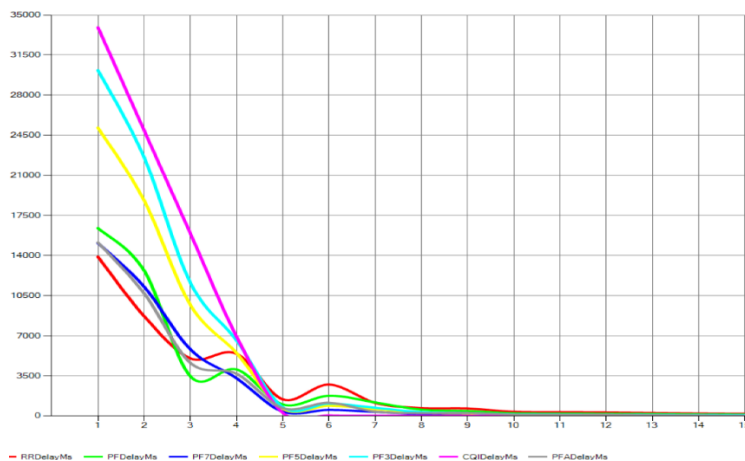
**ნახ.3.2. სისტემის სამართლიანობის მაჩვენებელთან დამოკიდებულების მრუდი**

ნახ. 3.2 გვიჩვენებს სისტემის სამართლიანობის მნიშვნელობებს ყველა CQI ინდექსისათვის. ჩვენს მიერ წარმოდგენილი ყველა მოდულაციიდან ყველაზე მაღალი სამართლიანობის მახასიათებელით გამოირჩევა RR ალგორითმი, რომლის მნიშვნელობა 100%-ა. რაც შეეხება დანარჩენ ალგორითმებთან შედარებით ყველაზე დაბალ მნიშვნელობას არის Best CQI (BC) სქემა.

ცხრილი 3.3. სისტემის სამართლიანობის შედარება

CQI (Ind.)	RRFairness	PFFairness	PF07Fairness	PF05Fairness	PF03Fairness	CQIFairness	PFAFairness
1	100.0	99.8	100.0	100.0	100.0	92.3	99.9
2	100.0	99.6	92.3	85.3	78.3	70.9	99.8
3	100.0	99.3	90.8	82.5	74.1	65.6	95.1
4	100.0	99.0	88.3	77.9	67.5	56.8	93.7
5	100.0	98.9	86.8	75.0	63.1	51.1	92.8
6	100.0	98.4	86.0	73.2	60.3	47.9	92.2
7	100.0	98.2	84.9	71.0	57.0	43.7	83.5
8	100.0	97.7	84.2	69.4	54.5	41.0	73.8
9	100.0	97.5	81.7	64.7	47.7	31.9	73.2
10	100.0	96.9	78.0	58.2	38.4	19.6	63.2
11	100.0	96.6	77.9	57.5	37.2	18.4	57.5
12	100.0	95.5	78.4	57.9	37.4	20.3	47.7
13	100.0	95.2	77.9	56.7	35.5	18.2	36.8
14	100.0	93.8	77.3	55.3	33.3	16.9	28.5
15	100.0	93.4	77.0	54.4	31.8	15.4	20.1

რაც შეეხება ჩვენს მიერ წარმოდგენილ გეოლოკაციაზე დაფუძნებულ APF სქემას, აღსანიშნავია, რომ იგი უფრო მეტად სამართლიან მნიშვნელობებს გვიჩვენებს როდესაც 8-ზე დაბალი CQI ინდექსებისთვის. 7-ზე უკეთესი ხარისხის მქონე ფიჭებისთვის კი ხდება სამართლიანობის მაჩვენებლების შემცირება, რადგანაც ჩვენი მიზანია ამ შემთხვევაში სისტემის გამტარუნარიანობის გაზრდა. ცხრილი 3.3 აჩვენებს ჩვენს მიერ განხორციელებული მოდელირების უშუალო მნიშვნელობებს.



ნახ.3.3. სისტემის დაყოვნების (Latency [ms]) CQI – ზე დამოკიდებულების გრაფიკი

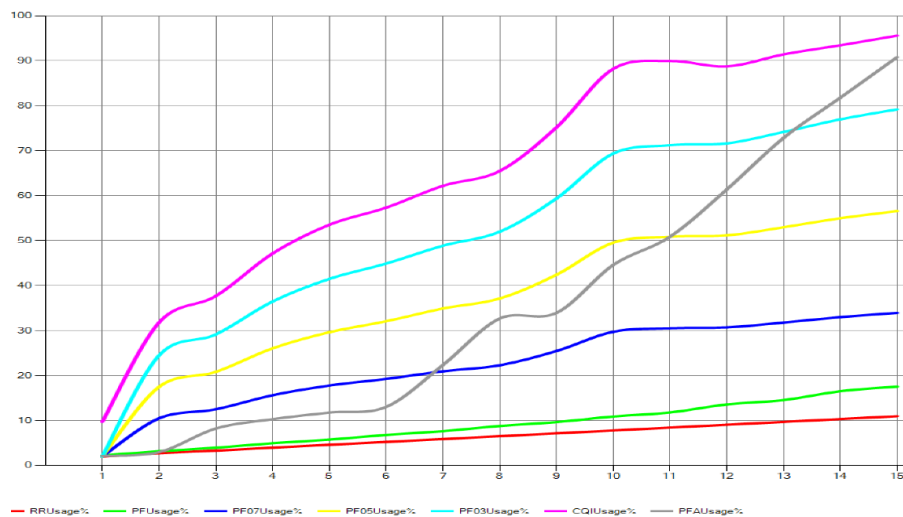
ნახ.3.3-ში წარმოდგენილია დაყოვნების მრუდები ჩვენს მიერ შერჩეულ სხვადასხვა სქემებისათვის. უფრო მეტი სიცხადისთვის შეგვიძლია დავამატოთ, რომ დაყოვნება არის თითოეული აბონეტისათვის დამგემავის

მიერ გაწეული მომსახურებისათვის გახარჯული გასაშუალოებული დრო მილიწამებში.

**ცხრილი 3.4. სისტემის დაყოვნების შედარება**

CQI (Ind.)	RRDelayMs	PFDelayMs	PF7DelayMs	PF5DelayMs	PF3DelayMs	CQIDelayMs	PFADelayMs
1	13899.1	16393.0	15094.9	25158.2	30189.8	33923.3	15146.1
2	8707.1	12688.0	11283.4	18805.6	22566.8	24923.3	10697.6
3	5033.3	3455.0	5813.5	9689.1	11627.0	15923.3	4634.2
4	5427.7	4051.5	3292.5	5487.4	6584.9	6923.3	3672.0
5	1438.7	1000.5	383.2	638.6	766.3	276.7	691.8
6	2751.1	1755.0	540.9	901.5	1081.7	48.0	1147.9
7	1137.9	1177.5	361.0	601.7	722.0	25.8	385.1
8	698.1	559.1	172.1	286.9	344.2	14.6	252.4
9	663.6	438.0	136.1	226.8	272.1	15.6	275.1
10	370.6	242.6	75.1	125.2	150.3	7.9	116.9
11	339.7	219.3	67.9	113.2	135.9	7.2	105.7
12	317.1	205.0	63.5	105.8	127.0	6.7	116.4
13	272.3	178.0	55.1	91.9	110.2	5.7	69.3
14	227.6	148.4	46.2	77.0	92.4	5.6	49.0
15	199.4	129.7	40.4	67.3	80.8	4.9	4.6

ცხრილი 3.4-დან გამომდინარე შეგვიძლია დავასკვნათ, რომ ჩვენს მიერ წარმოდგენილი APF სქემა PF-თან მიმართებაში გაცილებით ნაკლებ დროს ანდომებს ყველა მომხმარებლის მომსახურებისათვის. შედარებისთვის შეგვიძლია განვიხილოთ ცხრილში მოყვანილი მნიშვნელობები: მაგალითად CQI(4)-ისათვის PF7-თან შედარებით დაყოვნება შემცირებულია 10%-ით, ხოლო CQI(7)-სათვის PF5-თან მიმართებით შემცირებულია 35%-ით, CQI(13)-თვის კი 40% შემცირებაა დაფიქსირებული PF3 თან მიმართებაში.



**ნახ.3.4. სისტემის რესურსების გამოყენების ეფექტურობის CQI – ზე დამოკიდებულების გრაფიკი**



ნახ.3.4-ზე წარმოდგენილია სისტემის რესურსების გამოყენების მრუდების შედარება CQI-სთან მიმართებაში, რომელიც აჩვენებს სისტემის საშუალო ინფორმაციის გადაცემის სიჩქარის თანაფარდობას მისი თეორიულად შესაძლებელ პიკთან. ცხრილი 2.5-ზე დაყრდნობით შეგვიძლია ვთქვათ, რომ ჩვენს მიერ წარმოდგენილი APF სქემის დროს უფრო ეფექტურად არის გამოყენებული სისტემის ტევადობა. მაგალითისთვის შეგვიძლია ავიღოთ PF მნიშვნელობები, რომლებიც უფრო ნაკლებია CQI(3) -დან CQI(15)-მდე და თითქმის 100%-ით მეტია CQI(5)-ის დროს. რაც შეეხება სხვა სქემებს, PF7-თან მიმართებით CQI(9)-სთვის ნაჩვენებია 30% ზრდა, PF5 ისათვის CQI(14)-ის დროს არის 50% ხოლო PF3-ისთვის 10%-ანი მატებები.

**ცხრილი 3.5. სისტემის ტევადობის ეფექტურობა**

CQI (Ind.)	RRUsage%	PFUsage%	PF07Usage%	PF05Usage%	PF03Usage%	CQIUsage%	PFAUsage%
1	2.0	2.2	2.0	2.0	2.0	9.7	2.1
2	2.8	3.2	10.5	17.5	24.5	31.8	3.0
3	3.3	4.0	12.5	20.8	29.1	37.7	8.2
4	4.0	5.0	15.6	26.1	36.5	47.2	10.3
5	4.6	5.7	17.8	29.6	41.5	53.5	11.8
6	5.2	6.8	19.2	32.1	44.9	57.3	13.0
7	5.9	7.6	21.0	34.9	48.9	62.2	22.3
8	6.5	8.8	22.3	37.1	52.0	65.5	32.7
9	7.1	9.6	25.5	42.4	59.4	75.2	33.9
10	7.8	10.9	29.7	49.6	69.4	88.2	44.6
11	8.4	11.8	30.5	50.9	71.2	90.0	50.9
12	9.1	13.6	30.7	51.2	71.6	88.8	61.4
13	9.7	14.5	31.8	53.0	74.2	91.4	72.9
14	10.3	16.5	33.0	55.0	77.0	93.5	81.8
15	11.0	17.5	33.9	56.6	79.2	95.6	90.8

ჩვენს მიერ გაკეთებულმა მოდელირებულმა სისტემამ გვაჩვენა, რომ წარმოდგენილი APF ალგორითმი აუმჯობესებს სისტემის რესურსებისა და გამტარუნარიანობის ეფექტურობას უკვე არსებულ კლასიკურ სქემებთან შედარებით. იგი ასევე მნიშვნელოვნად ამცირებს მომსახურებისათვის საჭირო დროს, ზრდის სპექტრის ეფექტურობას და ოპტიმალურად ანაწილებს სისტემის რესურსებს. ყოველივე ზემოთ ჩამოთვლილ

გაუმჯობესებებთან ერთად APF სქემა ასევე ხასიათდება მაღალი სამართლიანობით შორს არსებული აბონენტებისათვის, რომელიც საშუალებას იძლევა დროულად მიიღონ მომსახურება ფიჭის საზღვარზე.

### 3.1 დასკვნა მე-3 თავის შედეგების მიხედვით

1. გამოკვლეულია და შედარებულია მე-4 თავის სისტემებში გამოყენებული ე.წ. კლასიკური რადიო პაკეტების დამგეგმავების მუშაობის პრინციპები.
2. შექმნილი ახალი შემთხვევითი განაწილების სქემა, რომლის გამოყენებითაც SINR-ის კარგი მნიშვნელობებისთვის მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის ზრდა ხდება ზედა რანგის მოდულაციისა და მცირე სიჭარბის მქონე კოდირების გამოყენებით, რის შემდეგაც გამოთავისუფლებული ტევადობის გამოყენება შეუძლიათ ცუდი SINR-ის მქონე მომხმარებლებს.
3. წარმოდგენილია რადიო პაკეტების ახალი სქემა სისტემის გამტარუნარიანობისა და სპექტრის ეფექტურობის გაზრდის მიზნით.
4. გამოვიყენეთ ზრდადი მონტე-კარლოს სისტემური მოდელირება, რომლის საფუძველზე შედარებული იქნა სხვადასხვა კლასიკური სქემები შემდეგი მაჩვენებლებისთვის: სისტემის საერთო გადაცემის სიჩქარე, სისტემის სამართლიანობა, მომსახურების საშუალო დრო და ტევადობის ეფექტურად გამოყენება.
5. დავამტკიცეთ, რომ ჩვენს მიერ წარმოდგენილი ახალ გეოლოკაციაზე დაფუძნებული ალგორითმს გააჩნია უკეთესი თანაფარდობა გამტარუნარიანობასა და სამართლიანობას შორის.
6. აბონენტების ადგილმდებარეობის გათვალისწინებით რადიო პაკეტების დამგეგმავის ახალი APF მექანიზმის საშუალებით ხდება სპექტრული ეფექტურობის მნიშვნელოვანი ზრდა სისტემის სამართლიანობის დასაშვები შემცირების ხარჯზე.
7. ნაშრომში ნაჩვენებია ჩვენს მიერ შემუშავებული ახალი APF სქემის პრაქტიკულობა, მნიშვნელობა და ღირებულება. მოდელირებისას, სისტემის

შეფასებისა და ცვლილებების განხორციელებისათვის გამოყენებული იქნა ოთხი პარამეტრის მნიშვნელობები, რომელთა მუდმივი მონიტორინგი აუცილებელია ყოველი იტერაციის დროს. ესენია: სმარტფონების მიერ გაზომილი CQI-ს საშუალო მნიშვნელობები, ერთდროულად კავშრის მქონე აბონენტები რაოდენობა, საერთო სისტემის მონაცემთა გადაცემის სიჩქარე და რაც მთავარია აბონენტების დაშორება საბაზო სადგურიდან. ასევე, მომავლისათვის, სისტემის ელასტიურობის კიდევ უფრო მეტად გასაზრდელად, შესაძლებელია დამატებითი პარამეტრების შემოტანა. მაგალითად, შესაძლებელია ადგილმდებარეობის მიხედვით დავადგინოთ აბონტის რანგი და მისი მომსახურების პრიორიტეტი დამოკიდებული გავხადოდ მასზე. ასევე შესაძლებელია გამოვიყენოთ რადიო პაკეტის დაყოვნების მნიშვნელობა. ალგორითმის ეფექტურობისთვის შესაძლებელია საბაზო სადგურის მიერ დაგროვილი საერთო გადასაცემი ინფორმაციის რაოდენობის მუდმივი მონიტორინგი და მისი გამოყენება პაკეტების დამგეგმავის მექანიზმში.

8. ზემოთ აღნიშნულმა ახალმა მიდგომებმა შესაძლებელია მნიშვნელოვნად გააუმჯობესოს ალგორითმის ეფექტურობა, თუმცა მისმა რეალურმა განხორციელებამ შესაძლებელია სისტემის გამოთვლითი რესურსების მნიშვნელოვანი ზრდა გამოიწვიოს.

## 4 გეოლოკაციის გამოყენება IoT სისტემებში

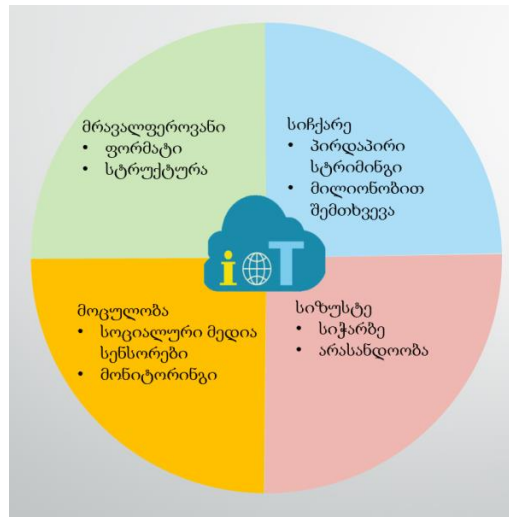
პირველი პრიმიტიული სენსორის - თერმოსტატის გამოგონებიდან საუკუნეზე ცოტათი მეტია გასული. მიუხედავად ამისა, თანამედროვე ცხოვრება წარმოდგენელი ხდება მრავალფუნქციური IoT (Internet of Things) სენსორების გამოყენების გარეშე, რომლებიც ინტეგრირებულია ახალი თაობის თითქმის ყველა მოწყობილობაში. მოძველებულ სისტემებში სენსორების ერთადერთი დანიშნულება იყო გარკვეული პარამეტრების მიწოდება, ხოლო გადაწყვეტილების უშუალო მიმღები და აღმრიცხავი იყო ოპერატორი. შემდეგი თაობის სისტემებში შესაძლებელი გახდა ამ მონაცემების მიხედვით წინასწარ დადგენილი წესების გათვალისწინებით ავტომატური მოქმედების განხორციელება, თუმცა ესეთი მოქმედებების რაოდენობა შეზღუდული იყო გამომთვლელი მანქანებისა და სენსორების სიძვირის გამო. ინტერნეტის ინფრასტრუქტურის განვითარებამ, მოწყობილობების და პროცესორების წარმოების ფასის შემცირებამ შესაძლებლობა მისცა მწარმოებლებს ეწარმოებინათ IoT სენსორებით ინტეგრირებული პროდუქცია, რომლებიც პირდაპირ არიან დაკავშირებული ერთმანეთთან თუ მართვის ცენტრებთან. IoT აქტიურად გამოიყენება თანამედროვე ინდუსტრიაში, რომელსაც შემოკლებით I-IoT-ის უწოდებენ და მისი ყველაზე მნიშვნელოვანი დარგი კი ენერგეტიკაა. IoT მოწყობილობები აქტიურად გამოყენებულია ჯანდაცვის სფეროში, ენერგეტიკისა და სატრანსპორტო სისტემებში, სამხედრო და ძალოვან სტრუქტურებში. ამ სენსორებიდან მიღებული ინფორმაციის დროულად და ეფექტურად დამუშავება შესაძლებლობას გვაძლევს შევამციროთ ხარჯები, გავაუმჯობესოთ მომსახურების ხარისხი, გავზარდოთ უსაფრთხოება და გადავარჩინოთ უფრო მეტი ადამიანი დროულად გაწეული სამედიცინო მომსახურებით. IoT სენსორების მასიური გამოყენებისთვის არსებული რადიო სისტემების სიჩქარე, ტევადობა და დაყოვნება არასაკმარისი აღმოჩნდა და საჭირო გახდა მე-5 თაობის ქსელის შექმნა, რომელშიც

გათვალისწინებული არის თანამედროვე ინდუსტრიის შემდგომ ეტაპზე განვითარებისათვის საჭირო ყველა მოთხოვნა და წინაპირობა. მე-5 თაობის სისტემებში გამოყენებული M-MIMO (Massive Multiple Input Multiple Output) ტექნოლოგიაზე დაფუძნებული რადიო გადაცემები საშუალებას გვაძლევს გავაუმჯობესოთ მოძრავი სენსორების ადგილმდებარეობის დადგენის სიზუსტე და მოვახდინოთ მათი გეოლოკაცია და ვიზუალიზაცია შემდგომი ანალიზისთვის.

IoT-ის მრავალფუნქციური სენსორები თავის მხრივ აგენერირებენ ძალიან დიდი მოცულობის მონაცემებს, რომლებიც მოითხოვენ დამუშავებას და შენახვას რელატიურსა (SQL) თუ არა-რელატიურ მონაცემთა ბაზებში (Big data). ასევე აღსანიშნავია, რომ სათანადო დამუშავებისა და ვიზუალიზაციის მეთოდების გამოყენების გარეშე ეს ინფორმაცია სრულიად გამოუსადეგარია. ამოტომაც, ძალიან მნიშვნელოვანია სხვადასხვა სახის IoT სენსორებიდან მიღებული მონაცემების ეფექტური და სწრაფი დამუშავება, რომელიც თავის მხრივ ძალიან განსხვავდება სხვა, აქამდე არსებული მონაცემებისგან. ამის მთავარი მიზეზია თანამედროვე აპარატურისა და მათში გამოყენებული IoT სენსორების მრავალფეროვნება და მრავალფუნქციურობა. ასევე ამ მოწყობილობების უმეტესობა განლაგებულია გარეთ და იყენებს ნაკლებად საიმედო ენერჯისა თუ კომუნიკაციის წყაროს. ამის და სხვა მრავალი მიზეზების გამო IoT მოწყობილობებისგან მიღებული მონაცემები შესაძლებელია იყოს ქაოტური, არასრული, არალოგიკური ან მცდარი.

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, IoT მოწყობილობების გაზრდილი რაოდენობის გამო, მათ მიერ დაგენერირებული ინფორმაცია იმდენად დიდია, რომ მათი შენახვა დისკზე ან მოძველებული სისტემებით გადაცემა წინასწარი ფილტრაციის გარეშე შეუძლებელი ხდება. ამ მონაცემების დამუშავება მოითხოვს ახალი მეთოდების თუ მიდგომების შემუშავებას, რომლებიც შესაძლებლობას მოგვცემს ეფექტური ანალიზი გაუკეთოს

მიმდევრობით ნიმუშებს (patterns), მოარგოს სხვადასხვა სიტუაციას და დროის მინიმალური დაყოვნებით მოახდინოს მასზე რეაგირება.

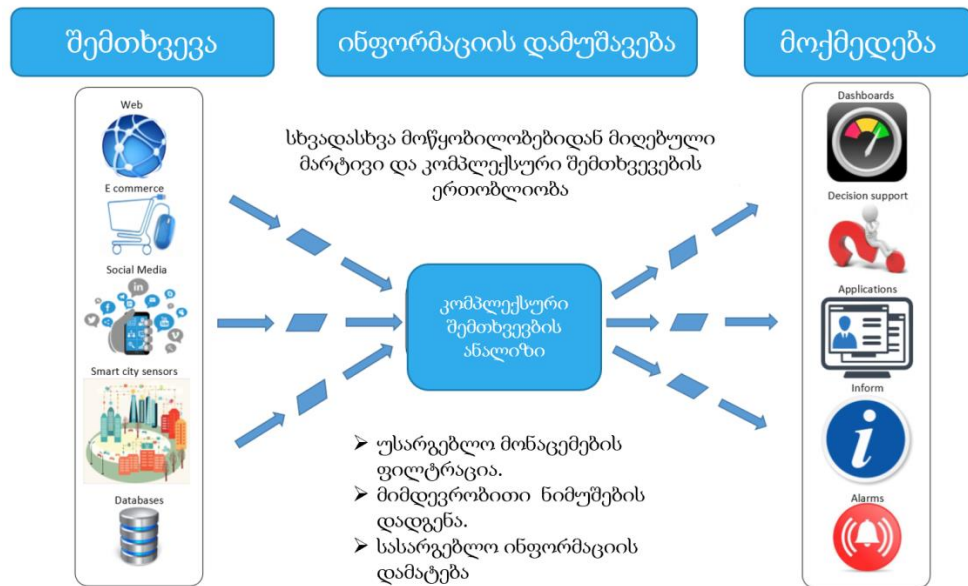


**ნახ. 4.1. IoT მონაცემების მახასიათებლები**

ბოლო კვლევები გვიჩვენებს, რომ CEP (Complex Event Processing) გადაწყვეტილებაზე დაფუძნებულ მეთოდები ძალიან კარგ შედეგებს იძლევა ამ განხრით, თუმცა წამოჭრის სხვადასხვა პრობლემებსაც, რომლებიც თავის მხრივ რთულ ანალიზსა და გამოკვლევას საჭიროებს, რადგანაც CEP მეთოდის გამოყენებით უნდა მოხდეს მონაცემთა ნაკადების მყისიერი კორელაცია წინასწარ დადგენილი წესებისა და კანონების მიხედვით.

რეალურ IoT სისტემებში უმეტეს შემთხვევაში შესაძლებელია ისტორიულ მონაცემებზე დაყრდნობით გარკვეული შემთხვევების პროგნოზირება, ამიტომაც აუცილებელი ხდება CEP-სა და ML (machine learning) მეთოდების გაერთიანება, რომელიც გაითვალისწინებს წარსულში მომხდარ შემთხვევებს და მოახდენს წინასწარ განსაზღვრული წესების ავტომატურ ცვლილებებს. ამ ნაშრომში ჩვენ შევეცდებით ვაჩვენოთ რთული შემთხვევები, როდესაც სტანდარტული CEP მეთოდების გამოყენება შეუძლებელია და აუცილებელი ხდება ახალი მიდგომებისა და გადაწყვეტილებების შემოღება, რათა მყისიერად, ეფექტურად და სწორად

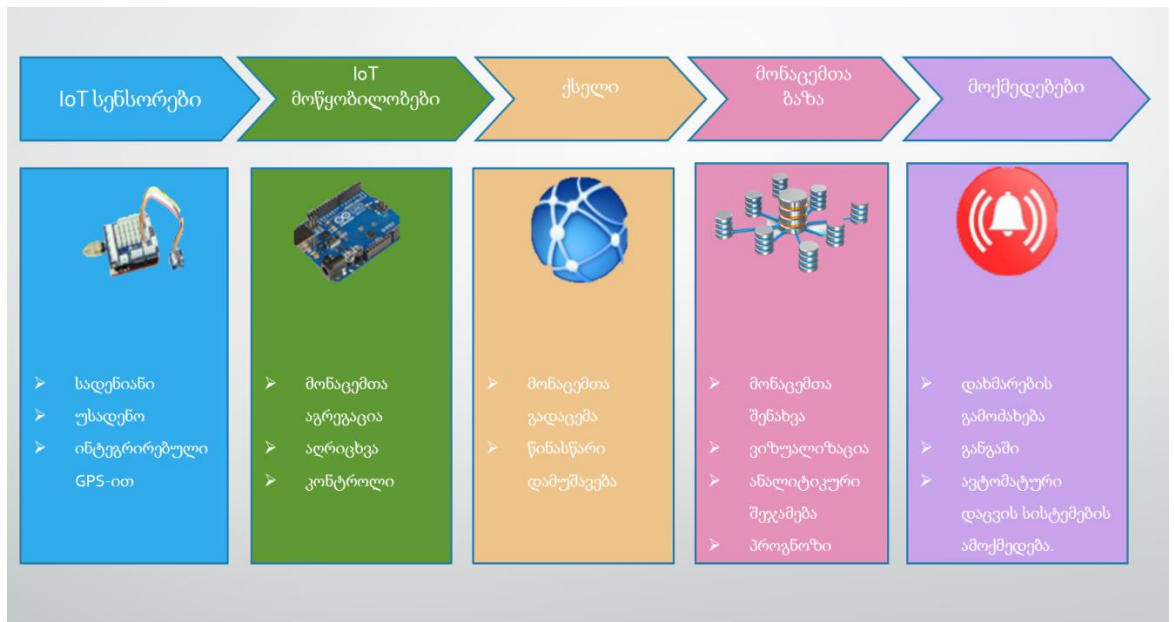
მოვახდინოთ IoT სენსორებიდან მიღებული ნაკადების დამუშავება, შენახვა და ვიზუალიზაცია.



ნახ.4.2. კომპლექსური შემთხვევების დამუშავება

#### 4.1 IoT არქიტექტურა

IoT სისტემა შედგება შემდეგი ნაწილებისგან: **IoT სენსორები და აქტუატორები**, რომლებიც უშუალოდ ანხორციელებენ პარამეტრების გაზომვას თუ მოქმედებას. **IoT მოწყობილობები**, რომლებიც ახდენენ ამ სენსორებისაგან მიღებული ინფორმაციის წინასწარ დამუშავებას და აგრეგაციას. იღებენ მარტივი გადაწყვეტილებებს და ამზადებენ ინფორმაციას ქსელში გადასაცემად. **ქსელი**, რომელიც შესაძლებელია იყოს როგორც ლოკალური, ასევე გლობალური, მობილური ან ქლაუდ სისტემებზე დაფუძნებული სისტემები. **მონაცემთა ბაზა**, რომელშიც ხდება ამ ინფორმაციის საბოლოო დამუშავება, ანალიზი, შენახვა და ვიზუალიზაცია. **მოქმედებები**, რომელიც არის IoT სისტემის საბოლოო ეტაპი.



ნახ.4.3. IoT არქიტექტურა

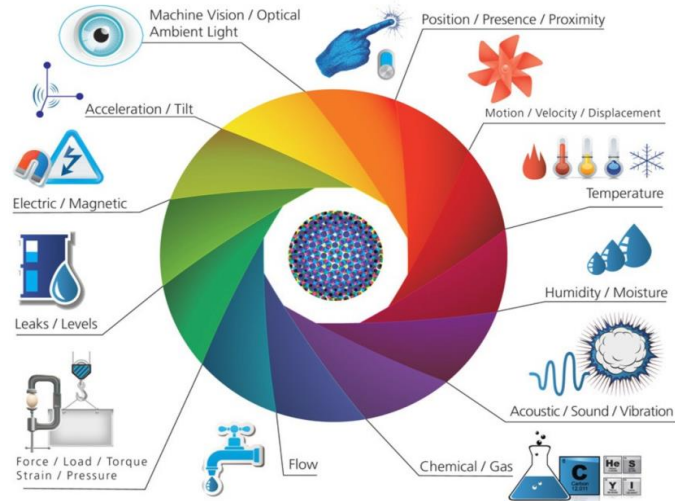
#### 4.2 კომპლექსური შემთხვევების დამუშავების (CEP) მეთოდი

კომპლექსური შემთხვევების დამუშავების მეთოდის აღწერისთვის აუცილებელია განვსაზღვროთ მისი შემადგენელი პარამეტრები [23]:

**მარტივი ან უბრალო ქცევა** არის შემთხვევა სისტემაში რომელიც განსაზღვრავს ამ სისტემის ერთი მდგომარეობიდან მეორე მდგომარეობაში გადასვლას. მაგალითისთვის შესაძლებელია მოვიყვანოთ რომელიმე მომხმარებლის კომენტარი სოციალურ მედიაში, რომელიმე სენსორის პარამეტრის ცვლილება, ოპერატორის მიერ ღილაკზე თითის დაჭერა და ა.შ.

**კომპლექსური ქცევა** შესაძლებელია განისაზღვროს როგორ მარტივი შემთხვევების ერთობლიობა, რომლებიც თავისთავად განსაზღვრადია მარტივი წესების ან განმეორებადი ნიმუშების სახით. მაგალითად: ხანძარი, რომელიც კომპლექსური შემთხვევაა, შესაძლებელია აღმოჩენილი იქნას მარტივი დეტექტორების ( კვამლის და ტემპერატურის) მაჩვენებლების საშუალებით.

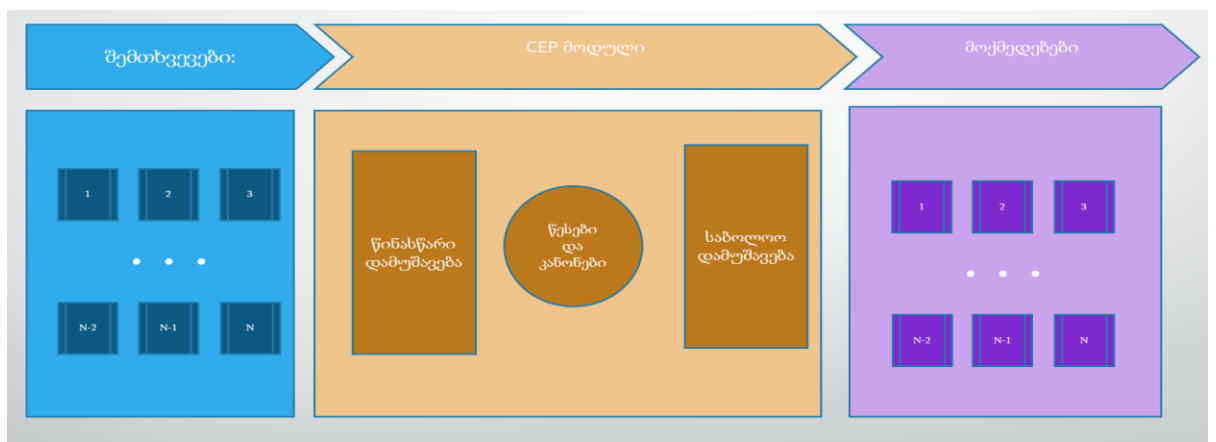




ნახ.4.4. IOT სენსორები

### 4.3 CEP არქიტექტურა

CEP სისტემის არქიტექტურა ნაჩვენებია მე-4 ნახაზზე: სხვადასხვა შემთხვევებიდან მიღებული მარტივი პარამეტრების ერთობლიობა გადაეცემა და წინასწარ მუშავდება CEP მოდულში, სადაც ეს ინფორმაცია ასევე გადის ფილტრაციასა და ემატება სასარგებლო ინფორმაცია წინასწარ განსაზღვრული წესებისა და კანონების მიხედვით. ასევე ხდება მისი შედარება წარსულში მომხდარ განმეორებად ნიმუშებთან, რომლის დასრულების შემდეგ კი იწყება საბოლოო მოქმედებების შესრულება.



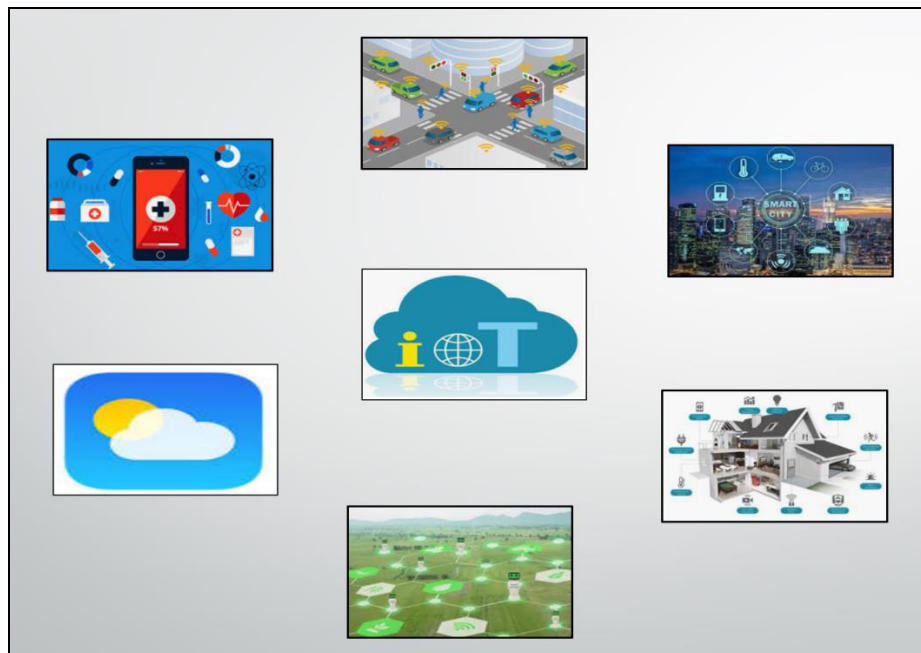
ნახ.4.5. CEP სისტემის არქიტექტურა

#### 4.4 CEP მეთოდის გამოყენება IoT სისტემში

IoT ტექნოლოგიის გამოყენება ექსპონენტურად იზრდება სხვადასხვა სფეროში. ესენია:

- ჭკვიანი სატრანსპორტო სისტემები (ITS)
- ჭკვიანი ქალაქები (Smart Cities)
- ჭკვიანი სახლები (Smart Homes)
- ჯანმრთელობის მონიტორინგი
- ამინდის მონიტორინგი
- სასოფლო სამეურნეო დაცვის სისტემები.

ეს სენსორები აგენერირებენ ძალიან დიდი რაოდენობის მონაცემებს, რომლის მყისიერი დამუშავება და ანალიზი მოძველებული მეთოდებით ძალიან დიდ რესურსებთან იყო დაკავშირებული. ამის გამო აუცილებელი გახდა ძირეული ცვლილებების შეტანა მომხდარიყო ტრადიციული მონაცემთა მოპოვების პროგრამულ უზრუნველყოფებსა და მათ მოხმარებაში.



ნახ.4.6. IOT გამოყენება

#### 4.5 CEP მეთოდის პრობლემები

როგორც ზემოთ ავლინებთ, CEP მეთოდი ძირითადად გამოიყენება სხვადასხვა შემთხვევებისა და წესების კომბინაციების მიხედვით სისტემის არსებული მდგომარეობის დასადგენად. ამ შემთხვევაში, წარსულში მომხდარი შემთხვევების შესახებ ინფორმაცია არ გამოიყენება, რადგანაც CEP მეთოდს არ გააჩნია მეხსიერება და ადრე მომხდარი შემთხვევები არ ინახება. ამის გამო CEP მეთოდის გამოყენებით შესაძლებელია მხოლოდ უკვე მომხდარი შედეგის დადგენა და არ გვაძლევს საშუალებას, რომ წინასწარ გავაკეთოთ პროგნოზი მოსალოდნელი შემთხვევის მოხდენის შესახებ [24]. მაგალითად, ჭკვიან სატრანსპორტო სისტემებში გაცილებით მნიშვნელოვანია მოსალოდნელი ტრაფიკის გადატვირთვის წინასწარ პროგნოზირება მანამდე მომხდარი სხვადასხვა შემთხვევებისა და ქცევების გათვალისწინებით, რაც საშუალებას მისცემს ქალაქის ტრაფიკის ადმინისტრატორებს წინასწარ მოახდინონ მოძრაობის განტვირთვის საჭირო მოქმედებები, ვიდრე უკვე არსებული გადატვირთვის აღმოჩენა, სადაც გაცილებით მეტი მოქმედებებია საჭირო მის განასატვირთად. შემთხვევების წინ მომხდარი ქცევების და მათი მიმდევრობის შედარება ადრე მომხდარ მსგავს მოვლენებთან საშუალებას გვაძლევს წინასწარი პროგნოზირება გაკეთდეს სტიქიური უბედურებების, საგზაო შემთხვევების, სასოფლო-სამეურნეო პრობლემების ან ეპიდემიური ავადმყოფობის გავრცელების შესახებ, რომელიც გაცილებით შეამცირებს ზარალს და გაზრდის სიცოცხლის გადარჩენის ალბათობას.

ასევე, ძალიან მნიშვნელოვანი არის ადრე მომხდარი ისტორიული შემთხვევების აღწერა, მათი მარტივ ქცევებად და მიმდევრობად დაყოფა, რეგისტრაცია და მონაცემთა ბაზაში შენახვა. ეს მონაცემები გამოყენებული უნდა იქნას კომპიუტერული თვისწავლების (ML - Machine Learning) და წინასწარი ანალიზის (PA-Predictive Analysis) მეთოდების გამოყენებისას.

CEP მეთოდის ერთ-ერთი შეზღუდვა არის ის, რომ კომპლექსური შემთხვევის აღმოსაჩენად აუცილებელია სხვადასხვა მარტივი ქცევების

ზუსტი მიმდევრობის დადგენა. ამიტომ არსებობს მაღალი ალბათობა, რომ სისტემამ შეცდომა დაუშვას შემთხვევის რეგისტრაციის დროს მხოლოდ ერთი განსხვავებული მარტივი ქცევის დროსაც. ამიტომ აუცილებელი ხდება მეთოდის ცვლილება და თითოეული ქცევისათვის გარკვეული წონის მინიჭება საბოლოო შედეგის ანგარიშისთვის.

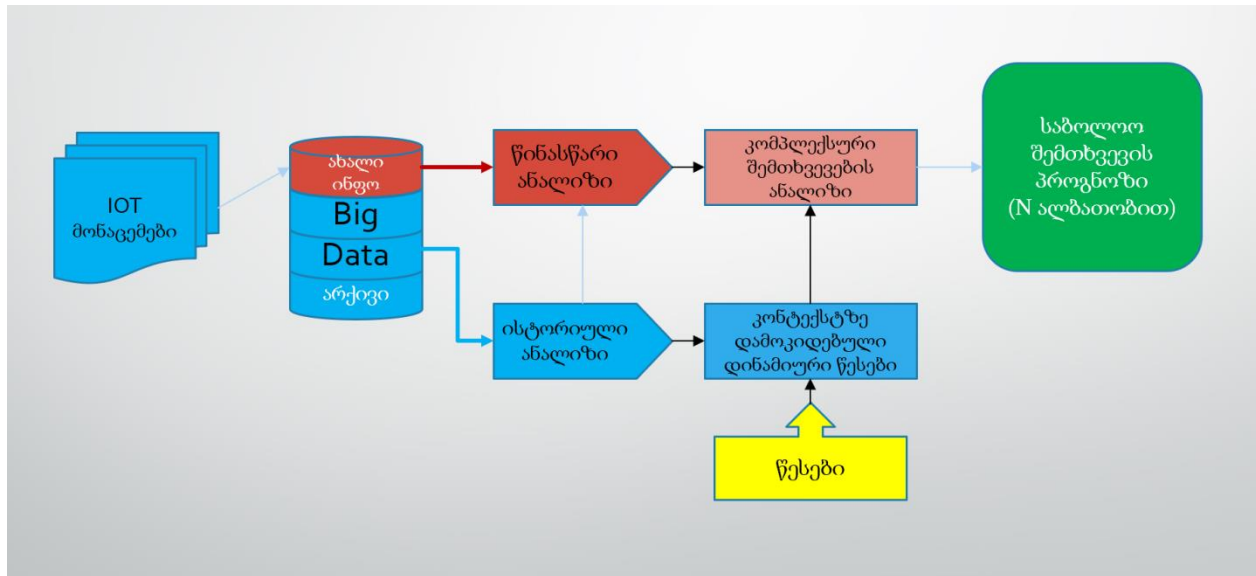
CEP მეთოდი სხვადასხვა შემთხვევების აღმოსაჩენად მოითხოვს წინასწარ დადგენილ წესებს, რომლებიც წარმოადგენენ ერთერთ მთავარ წინაპირობას მისი სწორად ფუნქციონირებისათვის. ტექნიკისა და ცხოვრების მუდმივი მოდერნიზაცია და განვითარება იწვევს ამ დადგენილი წესების მუდმივ ცვლილებას, რომელთა ხელით ცვლილება ძალიან დიდ რესურსებთან და ხარჯებთან არის დაკავშირებული. ამიტომ აუცილებელი ხდება ამ წესების ავტომატური განახლება კომპიუტერული თვისწავლების (ML) მეთოდების გამოყენებით.

IoT სისტემა შეიცავს მილიონობით მოწყობლობას, რომლებიც აგენერირებენ უზარმაზარი მოცულობის დაუმუშავებელ ინფორმაციას. ამ მონაცემების შენახვა მათი მოცულობის გამო, შეუძლებელი იყო ადრე არსებული რელაციურ მონაცემთა ბაზაში და გამოყენებაში იყო მხოლოდ BigData ბაზები. BigData მონაცემთა ბაზას გააჩნია ძალიან კარგი მახასიათებლები არსებული სტატიკური ინფორმაციის შენახვის, მოძებნისა და წაკითხვის დროს, თუმცა შეზღუდული მასში შენახული ინფორმაციის დინამიურად გამოყენებისა და ცვლადი ალგორითმების გამოყენების დროს. ამიტომ აუცილებელია ახალი მოდულების გამოყენება ამ ორი სხვადასხვა მიდგომის საუკეთესო სიმბიოზის დასანერგად.

#### **4.6 IOT ინფორმაციის დამუშავების სტრუქტურა**

IOT მონაცემების პირველ ეტაპზე აუცილებელია მოხდეს მოწყობილობებიდან მიღებული ინფორმაციის მონაცემთა ბაზაში შეყვანა. ეს მონაცემები ძირითადად ფორმატირებულია XML ან JSON სტანდარტების მიხედვით. ფორმატირებული ინფორმაცია ინახება მონაცემთა ბაზაში სადაც ხდება მისი დაარქივება ისტორიული ანალიზისთვის, პარალელურად კი

მიდის მისი წინასწარი ანალიზი, რომელიც თავისთავად იყენებს ძველ ისტორიულ ინფორმაციას კონტექსტზე დამოკიდებული და სტატისტიკურ წესებზე დაფუძნებულ ინფორმაციას.



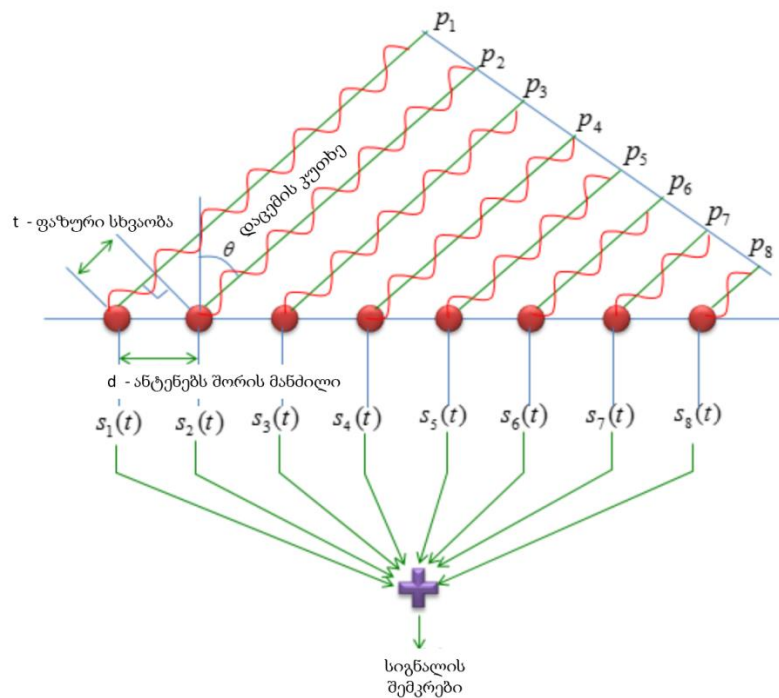
**ნახ.4.7. IOT ინფორმაციის დამუშავების სტრუქტურა**

ამ ნაშრომში ჩვენ აღვწერთ რეალურ დროში IOT მონაცემების ნაკადებისაგან ინფორმაციის მოპოვებისა და დამუშავების პრობლემები. ეს პროცესი ძალიან რთულდება ჰეტეროგენული მოწყობილობების რაოდენობის ექსპონენტური ზრდის გამო. ამის გამო ჩვენ შევიძულებით ახალი მიდგომა CEP- ს მეთოდის საფუძველზე, სადაც ვითვალისწინებთ წარსულში მომხდარ შემთხვევებს, შემოგვაქვს კონტექსტზე დამოკიდებული დინამიური წესები და მაღალი ალბათობით გამოგვყავს საბოლოო შემთხვევის პროგნოზირებული მნიშვნელობა.

#### **4.7 IOT სენსორების ადგილმდებარეობის დადგენა**

ზოგიერთ შემთხვევაში, განსაკუთრებით კი კომპლექსური სენსორების გამოყენების დროს, აუცილებელი ხდება მათში A-GPS მოდულის ინტეგრაცია. თუმცა, როგორც უკვე ავღნიშნეთ გაცილებით იზრდება მათი წარმოების ღირებულება, ენერგოეფექტურობა და ზომები. შესაბამისად, აუცილებელი ხდება ალტერნატიული მეთოდების მოძიება მოძრავი სენსორების ადგილმდებარეობის დადგენისა. ჩვენს ნაშრომში უკვე

განვიხილოთ მობილური ტელეფონების გეოლოკაციის დაგდენის მეთოდები, საიდანაც დავადგინეთ ყველაზე სწრაფი, ეფექტური და ზუსტი საშუალებები.  $T_A + A_{OA}$  მეთოდის<sup>[3]</sup> საშუალებით ლოკაციის დადგენა შესაძლებელია მხოლოდ ერთი სექტორის შემთხვევაში. 5G სისტემაში გამოყენებული 64X64 M-MIMO ტექნოლოგიის დროს მისი სიზუსტე კიდევ უფრო იმატებს და შესაძლებელი ხდება მომხმარებლის ადგილმდებარეობის დადგენა ვერტიკალურ სიბრტყეშიც კი. ამისათვის, საჭიროა გამოვთვალოთ ანტენის სხვადასხვა ელემენტების მიერ მიღებული სიგნალის ტალღებს შორის ფაზათა სხვაობა<sup>[4]</sup>.



ნახ. 4.8. დაცემული კუთხის ანგარიში

ანტენის ელემენტთა შორის მანძილის გათვალისწინებით, საბაზო სადგურიდან აბონენტის მიმართულების დადგენა შესაძლებელია მოხდეს შემდეგი ფორმულით<sup>[25]</sup>:

$$\theta = \arccos \frac{c \cdot t}{d} \quad (4.1)$$

დაცემული კუთხისა და მანძილის ცოდნა საშუალებას გვაძლევს გამოვთვალოთ სიგნალის წყაროს ადგილმდებარეობის კოორდინატები:

$$X = X_1 + T_A * \sin(\theta) \quad (4.2)$$

$$Y = Y_1 + T_A * \cos(\theta) \quad (4.3)$$

სადაც,  $X_1$  და  $Y_1$  არის საბაზო სადგურის კოორდინატები,  $T_A$  - ფიჭიდან მომხმარებლამდე მანძილი ხოლო  $\theta$  კი არის დაცემული კუთხე

მე-5 თაობის ქსელზე დაფუძნებული მაღალი სიზუსტის გეოლოკაციის მექანიზმი საშუალებას მოგვცემს დავადგინოთ მოძრავი ობიექტებისა თუ სენსორების ადგილმდებარეობა ისეთ ადგილებში, სადაც სტანდარტული GPS სიგნალი არ ვრცელდება (მაგ. გვირაბებსა და დახურულ შენობებში). ასევე, გაზრდილი გადაცემის სიჩქარე და შემცირებული დაყოვნება გააუმჯობესებს მონაცემების დამუშავებას, რომელიც ხელს შეუწყობს ინდუსტრიული და ენერგეტიკული IoT მოწყობილობების ხარისხიან მუშაობას [26].

IoT სენსორები შესაძლებელია გამოყენებულ იქნას ქარის გენერატორების ფრთებში, სადაც ეფექტური ენერჯის გამომუშავებისთვის აუცილებელია ოპტიმალური დახრის კუთხის გამოთვლა, რომელიც ქარის სიჩქარეზეა დამოკიდებული. ასევე სენსორები საჭიროა ტურბინებში, რომლებიც გააკონტროლებს მიღებული ენერჯის რაოდენობას და უზრუნველყოფს მის ეფექტურ ინტეგრაციას სხვა გენერატორებსა და ერთიან ენერგოსისტემებში. სხვადასხვა სენსორები კი წინასწარ მოგვაწვდიან სადგურის მდგომარეობის შესახებ ინფორმაციას (კოროზიის, ფრთების დაზიანების, ტურბინის, ინერჯიის მექანიზმის და ა.შ). მე-5 თაობის ქსელი ასევე საშუალებას მოგვცემს განვახორციელოთ უპილოტო დრონების მიერ სადგურების რუტინული შემოწმება და მარტივი ოპერაციების შესრულება.

სენსორების მე-5 თაობის ერთიან სისტემაში ჩართვა გაცილებით გაამარტივებს ჭკვიანი მრიცხველების დაყენებას, რომლის საშუალებით შესაძლებელია ია ენერჯიის ხარჯის ავტომატური შემოწმება და ჩართვა-

გამორთვის კონტროლი. ასევე ენერჯის ხარჯვის ამინდზე, თუ სხვადასხვა შემთხვევებთან კორელაცია საშუალებას მოგვცემს წინასწარ მოვახდინოთ პროგნოზირება საჭირო ენერჯის რაოდენობაზე.

ელექტროენერჯის აგრეგატების გარშემო შესაძლებელია დამონტაჟებული იქნას სხვადასხვა სახის სენსორები, რომლებიც წინასწარ მოგვაწვდიან ტენიანობის, ქიმიური თუ რადიაციული ნარჩენების გაჟონვის, ხანძრის შესახებ ინფორმაციას და საშუალებას მოგვცემს დროულად აღმოვაჩინოთ და თავიდან ავიცილოთ გარემოს დაბინძურება თუ ეკოლოგიური კატასტროფა.

#### **4.8 დასკვნა მე-3 თავის შედეგების მიხედვით**

1. CEP მეთოდი დანერგილია რეაქტიული რეაგირების უზრუნველსაყოფად მხოლოდ და მხოლოდ წინასწარ განსაზღვრული წესების გამოყენებით და არ იყენებს ისტორიული მონაცემებს. ვინაიდან ხშირ შემთხვევაში საჭიროა რეაქტიული რეაგირების პროაქტიული რეაგირებით ჩანაცვლება, ჩვენ შევცვალეთ CEP არქიტექტურა ჰიბრიდული არქიტექტურით. სადაც, ისტორიული მონაცემების მიხედვით გამოყენებულია კომპიუტერული სწავლის (ML) მეთოდი, რომელიც შერწყმულია რეალურ დროის CEP მეთოდთან, რათა უზრუნველყოს პროგნოზირებადი ღონისძიებების დამუშავება. შემოთავაზებული მეთოდის გამოყენება საშუალებას გვაძლევს, რომ CEP მოდულში შევიყვანოთ მარტივი პროგნოზირებული ქცევები და გავაკეთოთ კომპლექსური შემთხვევების პროგნოზი. არსებული პროგნოზირების მეთოდებისაგან განსხვავებით, რომლებიც ეფუძნება სტატიკური მოდელის პარამეტრებს, ჩვენს მიერ შემოთავაზებული ადაპტირებული პროგნოზირების ალგორითმი, რომელსაც დავარქვით ადაპტიური მოძრავი ფანჯრის რეგრესია (Adaptive Moving Window Regression – AMWR) გამოიყენება დინამიური IOT შემთხვევების დროს. ეს მეთოდი იყენებს ფანჯრის მოძრაობის მეთოდს რათა განაახლოს არსებული მოდელი პარამეტრები სისტემისგან მიღებული



მონაცემების მიხედვით. მოძრაობის ფანჯრის ზომა დადგენა ხდება ავტომატურად, იმის გათვალისწინებით, რომ მთავარ მონაცემს აქვს პერიოდულობა, რომელიც შესაძლებელი არ იყოს ზუსტ ზოგიერთი IoT შემთხვევისთვის. ასეთ შემთხვევებში სისტემის სიზუსტე შესამჩნევად ეცემა და საჭიროა ალგორითმის გაუმჯობესება.

2. მეორე ძირითადი გამოწვევა იყო რეალურ დროში მიღებულ ინფორმაციაზე დაყრდნობით სისტემის პროგნოზირებადი პარამეტრების ავტომატური ცვლილებები. ამის გამო, პარამეტრების და წესების ავტომატურად განახლების მიზნით, არსებულ CEP მოდული გავაერთიანეთ კომპიუტერულ სწავლების ML მეთოდთან. შემოთავაზებული მეთოდის გამოყენება აუმჯობესებს გამოყენებული მეთოდის სიზუსტეს. თუმცა, CEP-ს წესების სემანტიკის ცვლილებისას აუცილებელია ალგორითმის შესაბამისად განახლება.

3. მესამე პრობლემა, რომელსაც ჩვენ შევხებით, იყო რეალური შემთხვევების არაპროგნოზირებული მოვლენების ქაოტურობა და მათი მათემატიკური გამოვლენის და ჩაწერის პრობლემები. ჩვენ შევიმუშავეთ ალბათური შემთხვევების გაანალიზების მეთოდი, რომელიც იყენებს ორ სხვადასხვა დონის ანალიტიკურ მიდგომას. პირველი დონე ეფუძნება მიღებულ ინფორმაციას და პასუხისმგებელია ინდივიდუალური მონაცემების ანალიზისთვის, რათა მოახდინოს ნაკადების ინფორმაციის შემოწმება. მეორე ფენა იყენებს ბაიასური ქსელების (BNs) მეთოდს, რომელიც დაფუძნებულია წარსულში მომხდარ შემთხვევებზე და ცდილობს გამოავლინოს კომპლექსური შემთხვევების მოხდენის ალბათობა მაღალი სიზუსტით. ჩვენ აღვწერეთ სრული სისტემა, რომელიც შედგება: მონაცემთა დამუშავებისგან, შენახვისგან და BN-სა თუ CEP მეთოდების გამოყენებული სინთეზური ანალიზისაგან. ჩვენ აღვწერეთ პრაქტიკული პრობლემები, რომლებიც თავს იჩენს დიდი მასშტაბის სისტემებში პირობითი ალბათობის გამოთვლისას და შევეცადეთ მოგვეძებნა ოპტიმალური გადაწყვეტილება.

4. მეოთხე პრობლემა იყო IOT სისტემის დიდი მოცულობა და კომპლექსურობა. ამისათვის ჩვენ შევეცადეთ გამოგვეყენებინა დაჯგუფების და წინასწარი ფილტრაციის მეთოდები, რომლებმაც გაცილებით გაამჯობესეს ინფორმაციის დამუშავების სიჩქარე და სასრებლო ინფორმაციის შენახვის მოცულობა.

5. ამ ნაშრომში აღწერილი მეთოდებმა შესაძლებელია ხელი შეუწყოს აკადემიურ და ინდუსტრიას შორის არსებულ სიცარიელეს, რადგან ყველა შემოთავაზებული გადაწყვეტილება განხორციელებადია და შესაძლებელია მათი გამოყენება რეალურ პრობლემების გადაწყვეტისათვის.

## 5 გეოლოკაციის გამოყენება ფიჭების ავტომატურ დაგეგმარებაში

ფიჭების ავტომატური დაგეგმარების მოძველებულ სისტემებში გამოიყენებული იყო უხეში ძალის მეთოდი, რომელიც ყველა ფიჭისთვის ყველა პარამეტრის შესაძლებელი მნიშვნელობისათვის სიმულაციას საჭიროებდა. რა თქმა უნდა ეს მეთოდი ყველა არსებული ვარიანტისაგან საუკეთესოს არჩევის საშუალებას გვაძლევს, მაგრამ ძალიან არაეფექტური და ხანგრძლივი ხდება დიდი სისტემებისათვის. თუ საერთო ფიჭების რაოდენობა არის  $n$ , ხოლო თითოეული ფიჭისთვის სხვადასხვა შესაძლებელი დახრილობების მნიშვნელობების რაოდენობა არის  $T_i$ , მაშინ უხეში ძალის მეთოდის გამოყენებით საჭირო იტერაციების რაოდენობა [27]:

$$I = \prod_{i=1}^n T_i \approx T^n \quad (5.1)$$

თუ მოცემული ფიჭებისთვის შემოვიტანთ სხვა პარამეტრების ოპტიმიზაციის შესაძლებლობას, მაგალითად გასხივების სიმძლავრეს, არსებული იტერაციების რაოდენობის ჩაწერა შესაძლებელი ხდება შემდეგნაირად:

$$I = \prod_{i=1}^n (T_i * P_i) \quad (5.2)$$

სადაც,  $P_i$  არის მოცემული ფიჭისთვის სიმძლავრის სხვადასხვა შესაძლებელი მნიშვნელობების რაოდენობა. კიდევ უფრო განზოგადებული და მეტი პარამეტრების გათვალისწინებით, მივიღებთ:

$$I = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^p R_{ji} \quad (5.3)$$

სადაც,  $p$  არის რეგულირებადი პარამეტრების რაოდენობა, ხოლო  $R_j$  მოცემული პარამეტრის სხვადასხვა მნიშვნელობების რაოდენობა.

როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ, უხეში ძალის ალგორითმი ნაკლებად ეფექტურია და ძალიან დიდ გამოთვლებს მოთხოვს, მაგალითად, თუ ავიღებთ 1000 ფიჭას, სადაც თითოეულ ფიჭაზე შესაძლებელია 0-დან 9 გრადუსამდე დახრილობის დაყენება, მივიღებთ  $10^{12}$  იტერაციას, რომლის გამოსათვლელადაც ძალიან დიდი რესურსია საჭირო [28]. თუ ასევე გავითვალისწინებთ, რომ თანამედროვე მე-4 და მე-5 თაობის სიტემებში ერთ საბაზო სადგურზე საშუალოდ 15-24 ფიჭაა, მცირე ზომის კლასტერისათვის ამ მეთოდის გამოყენება ძალიან ძვირი, ხანგრძლივი და არა-ეფექტური ხდება.

ავტომატური ფიჭების დაგეგმარების ეფექტურობის გაზრდისათვის აუცილებელია შევამციროთ იტერაციების რაოდენობა. ამისათვის საჭიროა შემუშავებული იქნას მექანიზმები, რომლებიც წინასწარ განსაზღვრავს თუ რომელი მნიშვნელობები გამოიწვევს სისტემის გაუარესებას და მათი უგულებელყოფით მოახდენს იტერაციების რაოდენობის მნიშვნელოვნად შემცირებას, რაც თავის მხრივ გააუმჯობესებს მოდულის მუშაობის ხარისხს და შეამოკლებს გამოანგარიშების დროს.

იტერაციის რაოდენობის შესამცირებლად შეგვიძლია გამოვიყენოთ ორი მეთოდი. პირველი მეთოდი გულისხმობს პრობლემური სადგურების რანკირებას მომსახურების ხარისხის, გადატვირთვების, გათიშვების ან წყვეტების მიხედვით, რის შემდეგაც ხდება ამ საბაზო სადგურსა და მის უშუალო მეზობლებზე პარამეტრების ცვლილება უხეში ძალის გამოყენებით. მეორე მეთოდი კი რანკირებას ახდენს ყველაზე ცუდად დაფარული ადგილების მიხედვით და უხეში ძალის მეთოდს იყენებს ამ პრობლემურ ადგილას მომუშავე ფიჭებზე [29].

რადგანაც, ანტენის დახრილობის ცვლილება ყველაზე მეტ გავლენას ახდენს საბაზო სადგურის დაფარვის არეალსა თუ მის ხარისხზე და მისი დისტანციურად ცვლილება უპრობლემოდ არის შესაძლებელი RET-ის

გამოყენებით, ამიტომ, მისი ოპტიმიზაცია აქტიურად გამოიყენება ACP სისტემებში. დაფარვისა და დატვირთვის რეგულირება შესაძლებელია განხორციელდეს იმ სადგურებზე, რომელთა აღმოაჩენა ხდება წინასწარ მოცემული ზღვრების მიხედვით. ასევე აღსანიშნავია, რომ ქსელის დატვირთვის ცვლილების დროს გასათვალისწინებელია სიგნალის დონის შემცირება, რომელმაც თავის მხრივ დაფარვის დაკარგვა შეიძლება გამოიწვიოს. პარალელურად, აუცილებელია მეზობელი სექტორების ტევადობის ანალიზი, რადგანაც დატვირთვის ცვლილებამ უარყოფითად არ იმოქმედოს მომსახურების ხარისხზე (QoS). მომხმარებლების ადგილმდებარეობა გავლენას ახდენს ფიჭის ინტერფერენციის დონეზე, შესაბამისად, სექტორზე არსებული რესურსების უტილიზაციის დინამიკის გამოთვლა ძალიან რთულდება [30]. ერთი ანტენის დახრილობა იწვევს როგორც ამ სექტორის დაფარვის არეალის ცვლილებას, ასევე გავლენას ახდენს მის გარშემო არსებული ფიჭების ინტერფერენციის დონეზე. ამის გამო აუცილებელი ხდება ერთი ან რამოდენიმე მეზობელი სექტორების ოპტიმიზაციაც, რომლებიც გადაინაწილებენ მოცემული სადგურის ტრაფიკს, ისე რომ საერთო მომსახურების ხარისხი არ გაუარესდეს. ამ ყველაფრის გათვალისწინებით, კლასტერში არსებული ფიჭების პარამეტრის ცვლილების დროს აუცილებელია მის გარშემო არსებული სადგურების სისტემის მთლიანობაში განხილვა.

როგორც ზემოთ ავღნიშნეთ, თითოეული პარამეტრის შეცვლა იწვევს მის გარშემო არსებული ფიჭების დაფარვის ცვლილებას, ამის გათვალისწინებით, მთელი პროცედურის ჩაწერა შესაძლებელი ხდება კლასიკური მრავალცვლადიანი ოპტიმიზაციის განტოლების საშუალებით სადაც, გამოყენებული არის სხვადასხვა დამოუკიდებელი კომპონენტი: დაფარვა, მომსახურების ხარისხი და ტევადობა. სიმარტივისათვის განვიხილოთ სისტემა, სადაც ყველაზე მაღალი პრიორიტეტი არის სიგნალის ინტერფერენციასთან ფარდობის **SIR** დონის გაუმჯობესება,

რადგანაც ის პირდაპირ კავშირშია სპექტრალურ ეფექტურობასთან და ყოველი ცვლილებისათვის მოვახდინოთ მისი მნიშვნელობის მაქსიმიზაცია.

მოცემული კლასტერი დავყოთ 100X100 მეტრის სიგრძე სიგანის კვადრატებად (ბინებად) და გამოვითვალოთ SIR-ის საშუალო მნიშვნელობა  $S_b$  თითოეული ბინისათვის.

$$S_b = \frac{\sum_i^n S(i)}{n} \quad (5.4)$$

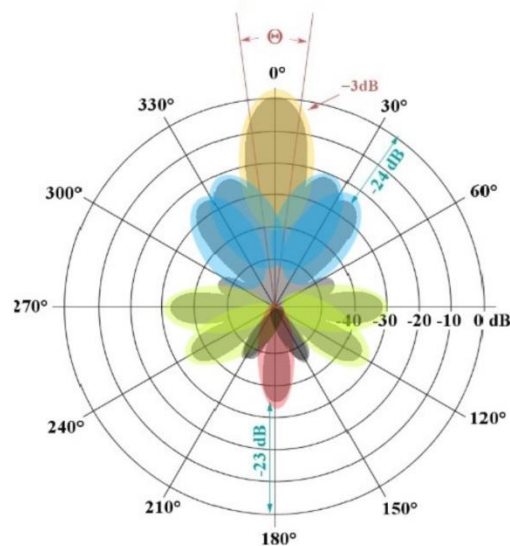
სადაც  $S(i)$  არის  $i$  განხორციელებული ზარის დასრულებისას არსებული SIR-ის აბსოლუტური მნიშვნელობა, ხოლო  $n$  არის ამ ბინში ყველა განხორციელებული ზარის რაოდენობა. სისტემის შესაფასებლად გამოვითვალოდ ყველა ბინის SIR-ის საშუალო მნიშვნელობა:

$$S = \frac{\sum_i^N S_b(i)}{N} \quad (5.5)$$

სადაც,  $N$  არის კლასტერში ასრულებული ბინების რაოდენობა. თითოეული ბინისათვის აღვრიცხოთ განხორციელებული ზარების მომსახურე ფიჭები და დავალაგოთ სიგნალის დონის საშუალო მნიშვნელობების მიხედვით. საუკეთესო მნიშვნელობის მქონე ფიჭა ჩავთვალოთ მთავარ გადამტანად ხოლო დანარჩენები განვიხილოთ როგორც ინტერფერენციის წყაროდ. კლასტერში განხორციელებული ნებისმიერი ფიჭისთვის ანტენის დახრილობა გამოიწვევს სიგნალის დონის შემცირებას ან გაძლიერებას იმ ბინებში, სადაც ამ საბაზო სადგურის სიგნალი ვრცელდება, მიუხედავად იმისა იყო ის მთავარი გადამტანი თუ ინტერფერენციის წყარო. შესაბამისად, თუ ბინში რომელიმე კონკრეტული ფიჭის სიგნალი გაიზარდა, აუცილებელია შევამოწმოთ ამ ბინში განხორციელებული ზარების ყველა სიგნალის დონე და მოვახდინოთ ხელახალი ამ ბინის SIR-ის საშუალო მნიშვნელობის გამოთვლა.

## 5.1 ანტენის დახრილობით გამოწვეული სიგნალის დონის ცვლილების ანგარიში

კუთხეს ანტენის მთავარ მიმართულებასა და ჰორიზონტს შორის ეწოდება ანტენის ტილტი, რომელიც იზომება გრადუსებში. მისი მნიშვნელობა დადებითია თუ ანტენა დახრილია ჰორიზონტის მიმართ და არის უარყოფითი თუ ანტენა ახრილია ჰორიზონტთან მიმართებაში.



ნახ.5.1. ანტენის გამოსხივების დიაგრამა

სიგნალის დონის ცვლილება მოცემული ბინისთვის გამოიანგარიშება შემდეგნაირად:

$$\Delta_i = F(To_i) - F(Tn_i) \quad (5.6)$$

სადაც,  $F$  ანტენის გამოსხივების დიაგრამის დახრილობაზე დამოკიდებულების მაჩვენებელი ფუნქცია,  $To$  ანტენიდან მოცემულ ბინამდე დახრილობის კუთხე ცვლილებამდე, ხოლო  $Tn$  -- კუთხე ცვლილების შემდეგ. გაძლიერება ჰორიზონტალურ სიბრტყეში გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$F(T) = G - \min \left( 12 * \left( \frac{\varphi}{BW_h} \right)^2, Fr \right) - \min \left( 12 * \left( \frac{\theta - T}{BW_v} \right)^2, Sl \right) \quad (5.7)$$

სადაც,  $G$  არის ანტენის გაძლიერება ანუ გეინი,  $BW_h$  და  $BW_v$  არიან ჰორიზონტალური და ვერტიკალური გაშლის კუთხეები სადაც მოქცეულია ანტენის მიერ გამოსხივებული ენერჯის ნახევარი,  $F_r$  არის ფარდობა ანტენის წინ და უკან გაზომილ დონეებს შორის,  $\phi$  არის ჰორიზონტალური კუთხე მოცემულ აზონენტსა და ანტენის პირდაპირ მიმართულებას შორის,  $S_I$  არის გვერდითა ფოთოლის დონე, ხოლო  $\theta$  არის ვერტიკალური კუთხე ტერმინალსა და ანტენის პირდაპირ მიმართულებას შორის, რომლის გამოთვლა შესაძლებელია შემდეგი ფორმულით:

$$\theta = \text{atan} \left( \frac{h_{BS} - h_m}{dist} \right) \quad (5.8)$$

სადაც,  $h_{BS}$  არის ანტენის სიმაღლე,  $h_m$  აზონენტის სიმაღლე, ხოლო  $dist$  არის მანძილი მომხმარებელსა და საბაზო სადგურს შორის. ზემოთ მოცემული ფორმულები გვაჩვენებს, რომ ანტენის დახრილობას მით უფრო მეტი გავლენა აქვს, რაც უფრო ვიწროა ანტენის ვერტიკალური ფოთოლის სიგანე. ასევე აღსანიშნავია ისიც, რომ ანტენის მახასიათებლების მიუხედავად არსებობს ოპტიმალური დახრის კუთხე, რომელიც არ არის დამოკიდებული ფოთოლისა და ბიმის სიგანეზე.

სიგნალის დონის ცვალებადობა ავტომატურად იწვევს SIR-ის მნიშვნელობის ცვლილებას, რომელიც მოცემული ბინისთვის გამოიანგარიშება შემდეგნაირად:

$$S_i = \begin{cases} R_i = Rb_i & S_i + \Delta_i \\ R_i \neq Rb_i & R_i - 10 * Lg \left( 10^{\frac{(Rb_i - Sb_i)}{10}} - 10^{\frac{(R_i)}{10}} + 10^{\frac{(R_i - \Delta_i)}{10}} \right) \end{cases} \quad (5.9)$$

სიგნალის მილევა (PL) დამოკიდებულია მანძილსა და სიხშირეზე, რომელიც ჩვენს შემთხვევაში არის 700მგჰც:

$$P_L = 124.6 + 37.6 \log(d) \quad (5.10)$$

სადაც,  $d$  არის მანძილი კმ-ში. აქედან გამომდინარე მიღებული სიგნალის დონე მობილურის მიმღებზე იქნება:



$$P_r = P_t - P_L + G_h(\varphi) + G_v(\theta) \quad (5.11)$$

სადაც  $P_t$  არის საბაზო სადგურიდან გადაცემული სიმძლავრე, ხოლო  $G_h$  და  $G_v$  არიან ანტენის ჰორიზონტალური და ვერტიკალური გაძლიერებები შესაბამის  $(\varphi)$  და  $(\theta)$  კუთხეების მიმართულებით.

აბონენტები უკავშირდებიან საუკეთესო სიგნალისა და (Signal to Interference Ratio) SIR-ის მქონე საბაზო სადგურებს. სადაც, SIR-ის მნიშვნელობის გამოსათვლელად  $j$  ტერმინალისთვის, რომელიც დაკავშირებულია  $i$  საბაზო სადგურთან შეგვიძლია გამოვიყენოთ შემდეგი ფორმულა [31]:

$$\left(\frac{S}{I}\right)_j = \frac{\frac{P_{t,i} * G_{i,j}}{L_{i,j}}}{\sum_{k \neq i}^n \frac{P_{t,k} * G_{i,k}}{L_{i,k}}} \quad (5.12)$$

თუ რომელიმე ფიჭის დაფარვის არეალში მყოფი აბონენტების სიმჭიდროვე გაცილებით აჭარბებს მის გარშემოარსებული ფიჭების სიმჭიდროვეს, რომელიც გამოწვეულია აბონენტების მოცემულ სადგურთან ახლოს მდებარეობის გამო. რადგანაც, SIR-ის მნიშვნელობა მანძილის უკუპროპორციულია, იგი იწვევს ამ ფიჭის ინტერფერენციის არაპროპორციულ ზრდას.

ავტომატური ფიჭების დაგეგმარების მიერ რეკომენდირებული ცვლილებების გამოსათვლელად მოითხოვს ვერისტიკული მეთოდის გამოყენებას, რაც საშუალებას მოგვცემს ვცვალოთ ანტენის დახრილობა თითოეული სადგურისთვის და მოვახდინოთ ყოველი მომხმარებლისთვის მაქსიმალური SINR-ის მნიშვნელობისათვის და გაუმჯობესდეს საერთო სისტემის ხარისხი. ასევე გვჭირდება კლასიკური გრადიენტულ ასვლის მეთოდი, რომელიც გვაძლევს საშუალებას გვაჩვენოს საუკეთესო მნიშვნელობას სადგურის დაფარვის არეალსა და მის გარეთ [32].

$$I = \sum_{j=1}^w \prod_{i=1}^{b_j} T_i \quad (5.13)$$

სადაც,  $w$  არის ყველაზე ცუდი ბინების რაოდენობა, ხოლო  $b_j$  არის ამ ბინზე გავლენის მქონე ფიჭების რაოდენობა. რათქმა უნდა, იტერაციების რაოდენობა უტოლდება უხეში ძალის მეთოდის რაოდენობას, მაშინ როდესაც ჩვენ კლასტერის ყველა ბინისათვის მოვახდენთ გამოთვლას, მაგრამ უმეტეს წილად მხოლოდ ყველაზე უარესი 10%-ის გაუმჯობესებაც კი საკმარისია.

$$\lim_{w \rightarrow n} \sum_{j=1}^w \prod_{i=1}^{b_j} T_i = \prod_{i=1}^n T_i \quad (5.14)$$

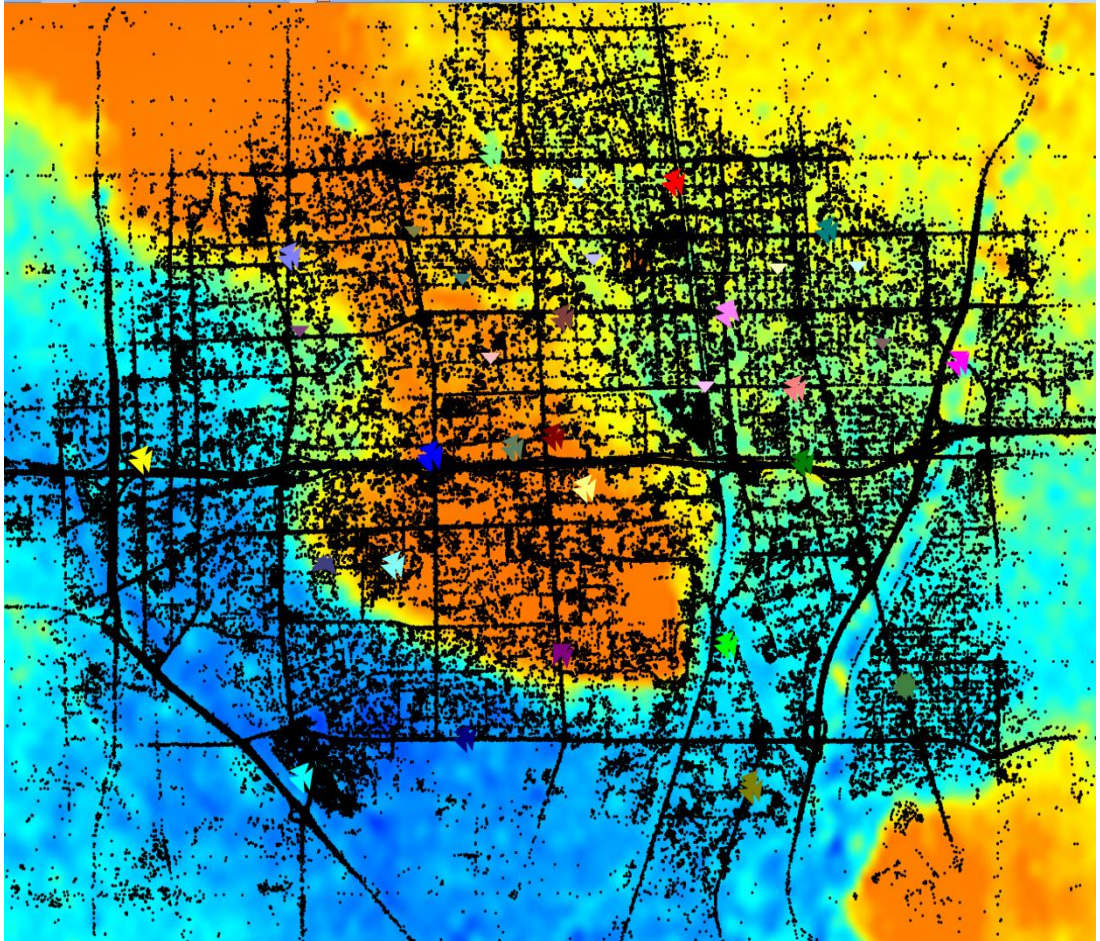
როგორც ზემოთ აღვწერეთ  $\beta(i)$  მაჩვენებელი ასახავს ფიჭის პარამეტრის ცვლილების გავლენას საერთო სისტემის SIR-ზე. გრადიენტული ასვლის მექანიზმის გამოყენება შესაძლებელია, როგორც პროპორციული მარტივი ობიექტების ჯგუფისთვის, რომელიც გამოთვლის თითოეული სადგურისთვის საჭირო ცვლილებებს და გამოიანგარიშებს სისტემის საერთო მომსახურების ხარისხს:

$$\Delta P_{TX}(i) = \begin{cases} -1, & \beta(i) \leq \beta_{min} \\ 0, & \beta_{min} < \beta(i) \leq \beta_{max} \\ 1, & \beta_{max} \leq \beta(i) \end{cases} \quad (5.15)$$

სადაც  $\beta_{min}$  და  $\beta_{max}$  არის ქვემო და ზედა საზღვარი ცვლილებების განხორციელებისათვის.

## 5.2 სიმულაციის აღწერა

სიმულაციის დროს გამოყენებული იქნა ზემოთ აღწერილი მოდელი და პარამეტრები. შერჩეული იქნა კლასტერი, რომელიც შედგება 24 საბაზო სადგურისაგან და 72 ფიჭისგან. ასევე აბონენტების ადგილმდებარეობა და სიგნალის ანათვლები აღებული იქნა 1 დღის განმავლობაში, რომელმაც ჯამში შეადგინა 15998 ჩანაწერი. ასევე გათვალისწინებული იქნა არასტანდარტული რელიეფის არსებობა, რადგანაც საჭიროა სიმულაციის რეალურ პირობებთან მაქსიმალურად მიახლოება.



ნახ.5.2. სიმულაციისთვის განკუთვნილი კლასტერი

სიმულაციისთვის საჭირო დამატებითი პარამეტრები მოცემულია ცხრილში.

ცხრილი 5.1 სიმულაციის პარამეტრები

პარამეტრი	მნიშვნელობა
საბაზო სადგურის სიმაღლე	25-40მ
მობილურის სიმაღლე	1.5მ
ფიჭის რადიუსი	200-800მ
სიგნალის მილევა	$L = 128.1 + 37.6 \cdot \log(d)$
გადაცემის სიმძლავრე	46დბმ
ანტენის გაძლიერება	17დბი
ანტენის ჰორიზონტალური გაშლა	60
ანტენის ვერტიკალური გაშლა	12

ტილტის ცვლილება	0 – 12
ტილტის გაზრდის ბიჯი	1
ტილტის ტიპი	ელექტრონული

თითოეული საბაზო სადგურის არსებული ტილტების მნიშვნელობების ცვლილება განხორციელდა სხვადასხვა იტერაციად. მთავარი მიზანი იყო გადატვირთული ფიჭების დახრა და ტრაფიკის გადანაწილება მეზობელ სადგურებზე. დატვირთვის მნიშვნელობა [35] გამოვითვალეთ ფიჭაში არსებული აბონენტების რაოდენობის ფარდობით მაქსიმალური შესაძლებელი აბონენტების რაოდენობაზე ერთი ფიჭისთვის.

პირველ ეტაპზე მოვახდინეთ შორს მომუშავე სექტორების დახრა, რომლებიც ყველაზე მეტად ინტერფერირებენ დანარჩენ სადგურებზე და აუარესებენ საერთო მომსახურების ხარისხსა და სპექტრულ ეფექტურობას [36]. თუმცა, უნდა გავითვალისწინოთ დაფარვის ფაქტორი იმისათვის, რომ არ მოხდეს მომსახურების სერვისის სრული დაკარგვა.

მეორე ეტაპზე ხდება ყველაზე მეტი ურთიერთგადაფარვის მქონე სადგურების აღმოჩენა და ერთერთი მომუშავე ფიჭის გაძლიერება. ეს პროცესი ხელს უწყობს სადგურებს შორის მკვეთრი საზღვრის გავლებას და ხარისხის გაუმჯობესებას ფიჭის საზღვარზე მყოფი აბონენტებისთვის [37].

მესამე ეტაპზე აღმოვაჩინეთ ყველაზე მეტად დამაბინძურებელ ფიჭებს, რომლებსაც აქვთ ბევრი შემთხვევა, სადაც მათზე გაცილებით უკეთესი სიგნალის მქონე სადგურები მუშაობენ, რაც იმის დასტურია, რომ ეს ფიჭები მხოლოდ და მხოლოდ აუარესებენ მომსახურების ხარისხს [38] და მათი დონის შემცირებით მოხდება მთლიანი სისტემის გაჯანსაღება.

მეოთხე ეტაპზე გადავდივართ უშუალოდ ბინების ანალიზზე და ვიწყებთ მათ რანკირებას გასაუმჯობესებელი პარამეტრის მნიშვნელობების მიხედვით. ჩვენი მიზანი არის სათითაოდ გავანალიზოთ ყველაზე ცუდი ხარისხის მქონე ბინები და უხეში ძალის გამოყენებით დავადგინოთ ოპტიმალური დახრილობის მნიშვნელობები ყველა იმ ფიჭისთვის,

რომლებიც გავლენას ახდენენ მოცემულ არეალში. თითოეული იტერაციის დროს ხდება სხვადასხვა ტილტების დაყენება და მთელი კლასტერის საშუალო მაჩვენებლების გამოთვლა [39].

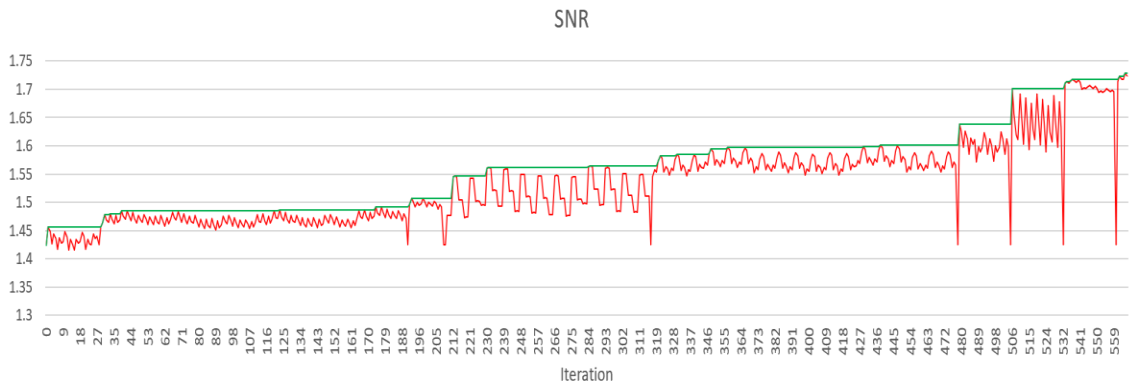
ცხრილი 5.2 იტერაციის მნიშვნელობები

იტერაცია	ცვლილებები	Rsrp	Snr	Bad bins	Dist	Over shooting	Pollution
0	B01C,3;B02A,2;	-102.52	1.76	2273	1.43	16.14	0.52
1	B01C,1;B02A,0;	-102.50	1.83	2453	1.43	16.23	0.52
2	B01C,3;B02A,0;	-102.51	1.80	2467	1.43	16.19	0.52
3	B01C,5;B02A,2;	-102.53	1.78	2483	1.43	16.19	0.52
4	B01C,1;B02A,2;	-102.51	1.79	2473	1.43	16.20	0.52
5	B01C,3;B02A,2;	-102.52	1.76	2488	1.43	16.14	0.52
6	B01C,5;B02A,4;	-102.53	1.81	2468	1.43	16.21	0.52
7	B01C,1;B02A,4;	-102.51	1.83	2459	1.43	16.22	0.52
8	B01C,3;B02A,4;	-102.52	1.80	2474	1.43	16.18	0.52
9	B03A,2;B04A,3;B05A,2;B06B,0;B07A,3;	-102.52	1.76	2273	1.43	16.14	0.52
10	B03A,2;B04A,3;B05A,2;B06B,0;B07A,3;	-102.50	1.83	2453	1.43	16.23	0.52
11	B03A,4;B04A,5;B05A,4;B06B,0;B07A,1;	-102.49	1.95	2402	1.43	16.13	0.52
12	B03A,0;B04A,5;B05A,4;B06B,0;B07A,1;	-102.48	1.95	2397	1.43	16.29	0.52
13	B03A,2;B04A,5;B05A,4;B06B,0;B07A,1;	-102.49	1.91	2414	1.43	16.27	0.52
14	B03A,4;B04A,1;B05A,4;B06B,0;B07A,1;	-102.49	1.95	2399	1.43	16.12	0.52
15	B03A,0;B04A,1;B05A,4;B06B,0;B07A,1;	-102.47	1.95	2394	1.43	16.28	0.52
16	B03A,2;B04A,1;B05A,4;B06B,0;B07A,1;	-102.49	1.91	2411	1.43	16.26	0.52

ამ პროცედურის მიზანია წინასწარ მოცემული პარამეტრის, რომელიც ჩვენ შემთხვევაში არის SINR, მაქსიმიზაცია. ხარისხის მაქსიმიზაციისათვის აუცილებელია თითოეული იტერაციისთვის საშუალო SINR-ის გამოთვლა [40] და მისი შედარება არსებულთან და წინა იტერაციების მნიშვნელობებთან:

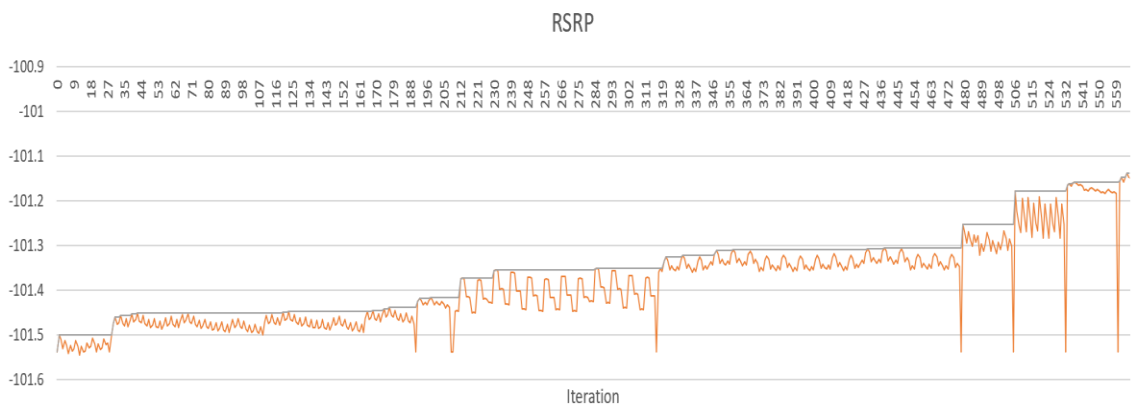
$$S_{max} = \text{Max}(S_i, S, S_p) \quad (5.16)$$

560 იტერაციის შემდეგ მიღებული იქნა საუკეთესო შედეგი, რომელიც ნაჩვენებია ნახ.4-ზე:



**ნახ.5.3. სიმულაციის შედეგი SINR გაუმჯობესება**

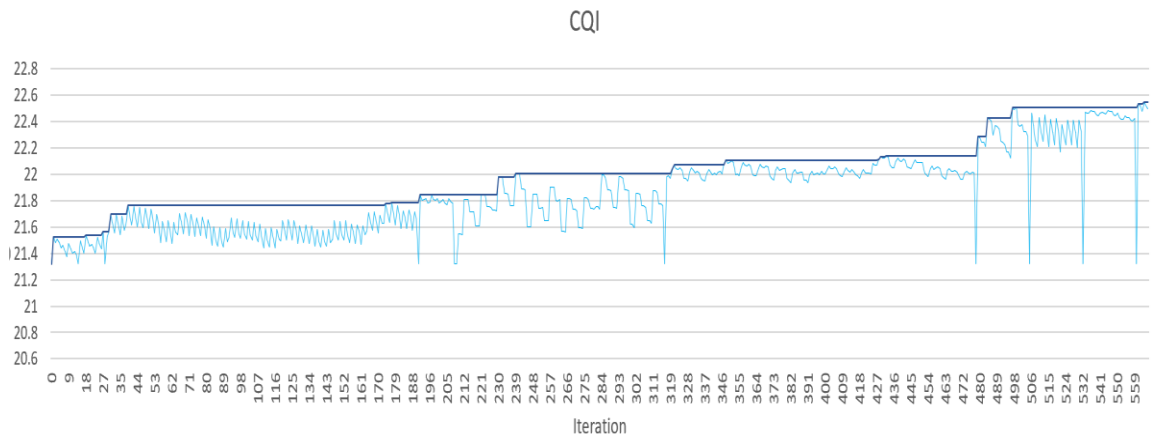
SINR-ის პარალელურად აუცილებელია სხვა მაჩვენებლების მონიტორინგიც. ნახ.5 ზე ნაჩვენებია საშუალო სიგნალის დონის იტერაციებზე დამოკიდებულების გრაფიკი, რომელიც გვიჩვენებს, რომ ქსელის ხარისხთან ერთად შესაძლებელია სიგნალის დონის გაუმჯობესებაც.



**ნახ. 5.4. სიმულაციის შედეგი, სიგნალის დონის გაუმჯობესება**

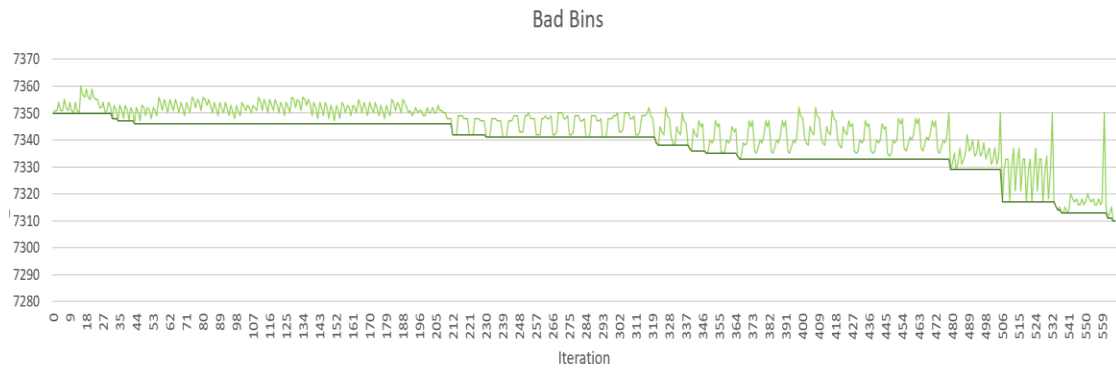
სისტემის სპექტრის ეფექტურობის საზომად შესაძლებელია კიდევ ერთი მაჩვენებლის, არხის ხარისხის ინდიკატორის CQI-ს გამოყენება, რომლის

გაუმჯობესების იტერაციებზე დამოკიდებულების გრაფიკი მოცემულია ნახ.6-ზე.



**ნახ.5.5. სიმულაციის შედეგი: CQI-ის გაუმჯობესება**

ასევე მნიშვნელოვანია დავთვალოთ ცუდი ხარისხის მქონე ბინების რაოდენობა და შევინარჩუნოთ ან შევამციროთ იგი. ნახ.5.7-ზე ნაჩვენებია ცუდი ბინების რაოდენობის იტერაციაზე დამოკიდებულება.



**ნახ.5.6. სიმულაციის შედეგი: ცუდი ბინების რაოდენობა**

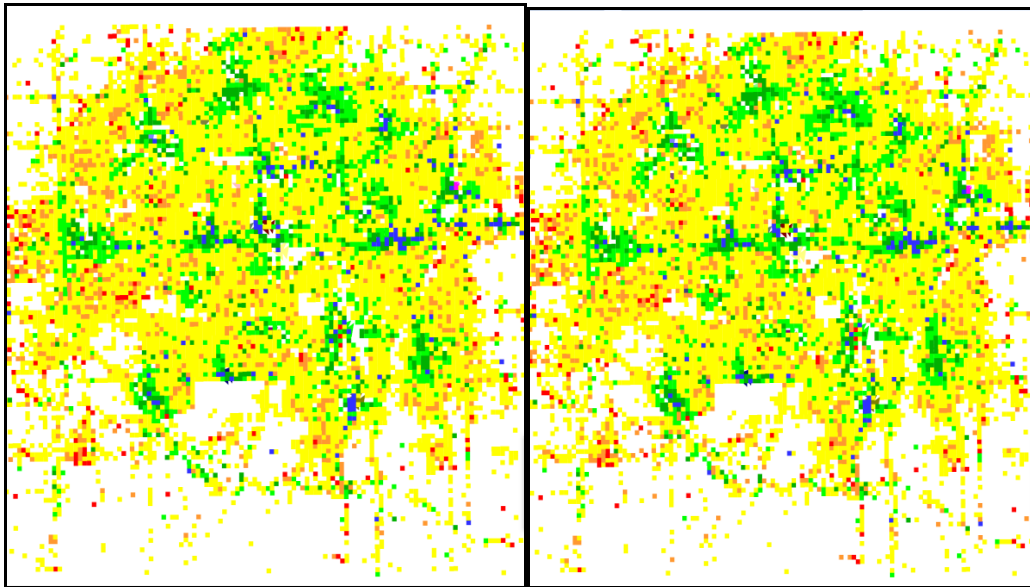
სიმულაციის შედეგმა გვაჩვენა 41%-ით ქსელის ხარისხის გაუმჯობესება, მაშინ როდესაც საშუალო სიგნალის დონის უმნიშვნელო ცვლილების დროს, რაც გულისხმობს სპექტრული ეფექტურობის, გადმოტვირთვის სიჩქარის და მომსახურების ხარისხის გაუმჯობესებას.

**ცხრილი 5.3 სიმულაციის შედეგი**

მაჩვენებელი	Rsrp	Snr	Badbins	Distance	Overshootin	Pollutio
-------------	------	-----	---------	----------	-------------	----------

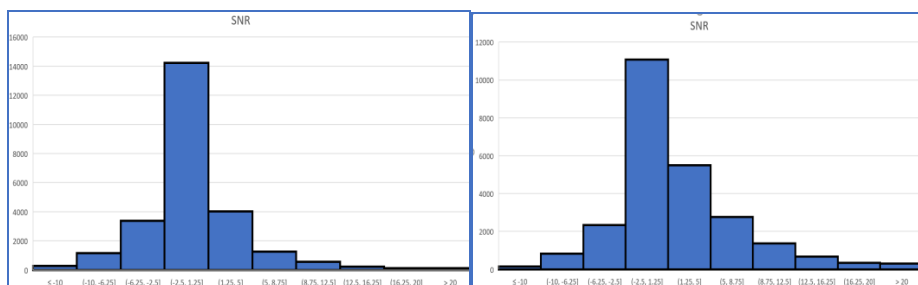
					g	n
არსებული	-102.524	1.756998	2273	1.426268	16.13705	0.516307
სიმულირებულ ი	-102.269	2.487396	2141	1.424926	16.00254	0.516307
გაუმჯობესება	0.25%	41.57%	-5.81%	-0.09%	-0.83%	0.00%

ქსელის გაუმჯობესების ვიზუალიზაციის წარმოდგენა ასევე შესაძლებელია რუკის სახით, სადაც ნაჩვენებია მთელი კლასტერის SINR-ის გეოგრაფიული განაწილება. ნახ.8-ის ერთმანეთთან შედარება საშუალებას გვაძლევს გავიგოთ რა ადგილებში მოხდება გაუმჯობესება თუ გაუარესება.



ნახ.5.7. SIR-ის შედარება ცვლილებამდე და ცვლილების შემდეგ

სიმულაციის შეფასება ასევე შესაძლებელია ჰისტოგრამის მიხედვით სადაც სხვადასხვა მნიშვნელობის მქონე ბინები დაჯგუფებულია 4 დბ-მდე და დათვლილია მათი რაოდენობები.





### ნახ.5.8. ცვლილებების შედარება: ჰისტოგრამა

ნახ.5.8 ზე მოცემული განაწილება გვაჩვენებს, რომ ბინების რაოდენობა, რომელთა SINR-ის მნიშვნელობა 5 dB-ზე მეტია მნიშვნელოვნადაა გაზრდილი, რაც მთლიანი კლასტერის ხარისხის გაუმჯობესებისა და სპექტრული ეფექტურობის გაზრდის უტყუარი ნიშანია.

### 5.3 დასკვნა მე-5 თავის შედეგების მიხედვით

1. ნაშრომში შემუშავებულია ახალი ალგორითმი და ნაჩვენებია მისი გამოყენების მნიშვნელობა სისტემის ხარისხის გაუმჯობესების მიზნით.
2. გაკეთდა გამოთვლის ეფექტურობის დასათვლელი სიმულაცია, რომელმაც აჩვენა, რომ შემოთავაზებულ ალგორითმი მნიშვნელოვნად ამცირებს იტერაციების რაოდენობას.
3. ჩვენს მიერ შემუშავებულმა ალგორითმმა ასევე დაადასტურა, რომ მისი გამოყენებით შესაძლებელია მნიშვნელოვნად გაზარდოს სისტემის სტაბილურობა, შეამციროს გამოთვლებისათვის საჭირო დროის ხანგრძლივობა და მნიშვნელოვნად გააუმჯობესოს პროცესორების დატვირთვა.
4. ნაშრომში ასევე ნაჩვენებია, რომ არსებული ალგორითმები შეზღუდულია დიდი სისტემებისთვის. რის გამოც, მოხდა მათი დაყოფა მცირე კლასტერებად, რათა შესაძლებელი ყოფილიყო მათი პარალელურად გაანალიზება და ალგორითმის მოდულის ეფექტურობის გაზრდა.
5. ფიჭებისა და იტერაციების რაოდენობებს შორის თითქმის ექსპონენტური დამოკიდებულების გამო, აღმოვაჩინეთ, რომ სისტემა განსაკუთრებით სტაბილურია მაშინ, როდესაც მცირე პოლიგონების რაოდენობა არ აჭარბებს 1000x1000.
6. გეოლოკაციის გამოყენება თვით ორგანიზებადი სისტემებისთვის არის ინოვაციური მიდგომა, რომელსაც აქვს უკეთესი სიზუსტე. ალგორითმის

მოქნილობის გაზრდისათვის, შეგვიძლია შემოვიტანოთ დამატებითი ცვლადები: გადაცემა სიმძლავრე, მიმართულება, საბაზო სადგურის სიმაღლე და სხვა. თუმცა, აუცილებელია ავნიშნოთ, რომ დამატებითი პარამეტრების გაანალიზება გაცილებით გაზრდის გამოთვლის დროს.

## დასკვნა

ნაშრომში განხილულია ახალი ალგორითმი და მისი გამოყენების მნიშვნელობა სისტემის ხარისხის გაუმჯობესების მიზნით. შესრულებულია გამოთვლის ეფექტურობის დასათვლელი სიმულაცია, რომელმაც აჩვენა, რომ შემოთავაზებულ ალგორითმი მნიშვნელოვნად ამცირებს იტერაციების რაოდენობას, ასევე დაადასტურა, რომ შემოთავაზებულ ალგორითმს შეუძლია გააუმჯობესოს სისტემის სტაბილურობა, გამოთვლებისათვის საჭირო დროის ხანგრძლივობა და პროცესორების დატვირთვა.

საბოლოო შედეგი შეგვიძლია შემდეგნაირად ჩამოვაყალიბოთ:

1. შემუშავებულია მობილური ტელეფონების მიერ გაზომვების დამუშავების ოპტიმიზირებული მეთოდი, რაც მნიშვნელოვნად აუმჯობესებს პრობლემური ადგილების დადგენის სიზუსტეს.
2. შემუშავებულია ახალი გეოლოკაციაზე დაფუძნებული რადიო პაკეტების დამგეგმავის (Radio Packet Scheduler) ალგორითმი, რომელსაც გააჩნია უკეთესი თანაფარდობა საბაზო სადგურის გამტარუნარიანობასა და რადიო რესურსების სამართლიანი განაწილებას შორის.
3. დადგენილია, რომ IoT სისტემის სენსორებიდან მიღებული ინფორმაციის დაჯგუფებისა და წინასწარი ფილტრაციის მეთოდების გამოყენება მნიშვნელოვნად (25%-30%) აუმჯობესებს სასარგებლო ინფორმაციის დამუშავების სიჩქარეს და ამცირდა მისი მოცულობას.
4. შემუშავებულია ახალი გეოლოკაციის მეთოდი, რომელიც შესაძლებელს ხდის მოძრავი IoT სენსორების ადგილმდებარეობის დადგენას დამატებითი GPS მოდულის გარეშე.

5. შემუშავებულია ფიჭების ავტომატური დაგეგმარების ახალი ალგორითმი, რომელმაც აჩვენა მისი გამოყენების მნიშვნელობა სისტემის ხარისხის გაუმჯობესების კუთხით. კერძოდ, ალგორითმი მნიშვნელოვნად (თითქმის 700-ჯერ) ამცირებს იტერაციების რაოდენობას (373,248-დან 560-მდე), რაც თავის მხრივ გულისხმობს პროცესორების დატვირთვისა და გამოთვლებისათვის საჭირო დროის მნიშვნელოვნად შემცირებას.
6. მობილური კავშირის დიდი სისტემებისათვის ფიჭების ავტომატური დაგეგმარების (ACP) არსებული მეთოდების დროში ხანგრძლივობის გამო შემოთავაზებულია სისტემის დაყოფა მცირე კლასტერებად, რაც შესაძლებელს ხდის მათ პარალელურად გაანალიზებას ახლად შემოთავაზებული ალგორითმის გამოყენებით ეს კი მნიშვნელოვნად ზრდის ACP გამოყენების ეფექტურობას.
7. კვლევის შედეგად დადგენილია, რომ გეოლოკაციის ალგორითმში სმარტფონებიდან მიღებული მონაცემების გამოყენება თვითორგანიზებადი სისტემებისთვის არის ინოვაციური მიდგომა, რომელსაც აქვს ლოკაციის დადგენის უკეთესი სიზუსტე (70%-90%).

## გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხა

1. Federal Communications Commission, “FCC amended report to congress on the deployment of E-911 Phase II services Tier III Service Providers,” Apr. 2005.
2. FCC, “Public Safety and Homeland Security Bureau Seeks Comment on Petitions for Waiver to Deploy 700 MHz Public Safety Broadband Networks,” PS Docket No. 06-229, Aug. 2009.
3. 3GPP TS 32.500, Technical Specification Group Services and System Aspects, Telecommunication Management, Self-Organizing Networks (SON), Concepts and requirements.
4. Belton D., Haddrell T., “Integrated assisted GPS solutions for security applications”, IEE Seminar on Telemetry and Telematics, Apr. 2005.
5. Abraham C., Van Diggelen F., “Indoor GPS Technology”, Jul. 2006.
6. Bryant, R. (2004). Assisted GPS - Using Cellular Telephone Networks for GPS Anywhere.
7. H. H. Loomis, “Geolocation of electromagnetic emitters,” Naval Postgraduate School, Monterey, California, Nov. 2009.
8. ს. გოგობია, ნ. აბზიანიძე, „გეოლოკაციის მეთოდების შედარება LTE ტექნოლოგიაზე დაფუძნებულ სისტემებში“, საერთაშორისო სამეცნიერო ჟურნალი „ინტელექტუალი“, 2020. N39. გვ 133-139
9. D. Barber, “Geolocation of WiMAX subscribers stations based on the timing adjust ranging parameter,” M.S. thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, Dec. 2009.
10. 3GPP TS 38.331, Radio Resource Control (RRC) protocol specification.
11. W. A. Hapsari, “Minimization of Drive Tests Solution in 3GPP”, Communications Magazine IEEE, pp. 28–36, Jun. 2012.
12. Alberio F. M., Stern A., Kos A., “Mobile network measurements using Android”, Mar. 2013.
13. Jarvis L. A., “Geolocation of LTE subscriber stations based on the timing advance ranging parameter”, Dec. 2010

14. Barth U., Kuehn E., "Self-organization in 4g mobile networks: Motivation and vision. In Wireless Communication Systems (ISWCS)", pp 731–735, 2010.
15. Siomina I., Varbrand P., Yuan D., "Automated optimization of service coverage and base station antenna configuration in UMTS networks". pp 16–25, 2006.
16. Pettersen M., Braten L. E., Spilling A.G., "Automatic antenna tilt control for capacity enhancement in UMTS FDD", Vehicular Technology Conference, pp 280–284, Sep. 2004.
17. Beckman C., Lindmark B., "The evolution of base station antennas for mobile communications". Electromagnetics in Advanced Applications, pp 85–92, Sep. 2007.
18. 4G Americas, "Self-Optimizing Networks: The Benefits of SON in LTE", Oct. 2013.
19. Bratu V., "Self-optimization of Antenna Tilt in Mobile Networks", Jun. 2013.
20. Elhadad M.I., El-Rabaie E., Elnaby M., "Enhanced PF Scheduling Algorithm for LTE Downlink System", Mobile Computing Vol. 3 Iss. 1, Feb. 2014.
21. ბასილაშვილი გ. „მომსახურების ხარისხის (QoS) უზრუნველყოფის მეთოდების კვლევა მობილური კავშირის ქსელებში“, ივნ. 2018.
22. G. Basilashvili, S.Gogokhia, "Customized Packet Scheduling Algorithm for LTE Network", Mar. 2018.
23. Stolikj M., "Building blocks for the Internet of Things", Jan. 2015.
24. Adnan A., "Extracting Knowledge from Raw IoT Data Streams", Dec. 2017.
25. ს. გოგოხია, ნ. აბზიანიძე, „5G ტექნოლოგიაზე დაფუძნებული I-IOT სისტემების გაუმჯობესება გეოლოკაციის ახალი მეთოდებით და მათი გამოყენება თანამედროვე ენერჯო სექტორში“, ენერჯია - ენერჯეტიკის თანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები, 2019 N3 (91). გვ. 166-169
26. Conway J., "The Industrial Internet of Things: An Evolution to a Smart Manufacturing Enterprise", Feb. 2015.
27. Gelfand, Izrail Moiseevich, "Calculus of Variations", Dover, Feb. 1963.
28. Devlin, Keith, "What Exactly is Multiplication?" Texas, USA Jan. 2011.

29. Xiang, Limin, "A formal proof of the four color theorem", Apr. 2009.
30. Gogokhia S., Abzianidze N., "Use of Geolocation in ACP Systems", American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences, 2020, №3, v. 66, pp. 14-25.
31. Farhana Afroz, Ramprasad Subramanian, Roshanak Heidary, Kumbesan Sandrasegaran, Solaiman Ahmed, SINR, RSRP, RSSI and RSRQ measurements in Long Term Evolution networks, Aug. 2015.
32. ს. გოგოხია, ნ. აბზიანიძე, „გეოლოკაციის გამოყენება მე-4 და მე-5 თაობის თვით ორგანიზებად სისტემებში“, საქართველოს საინჟინრო სიახლენი, 2020. ტ.90, გვ.11-14
33. Catedra, M. F., Perez-Arriaga, J, "Cell Planning for Wireless Communications", Artech House, Jun. 1999.
34. Mohammad Reza Pasandideh, Automatic Planning of 3G UMTS All-IP Release 4 Networks with Realistic Traffic, Jan. 2011.
35. V.Buenestado, M.Toril, S.Luna-Ramírez, J.M.Ruiz-Avilés, Self-Planning of Base Station Transmit Power for Coverage and Capacity Optimization in LTE, Aug. 2017.
36. O. Sallent, J. Pérez-Romero, J. Sanchez-Gonzalez, R. Agustí, M.A. Diazguerra, D. Henche, and D. Paul. A roadmap from UMTS optimization to LTE self-optimization. IEEE Communications Magazine, 49(6):172–182, 2011.
37. J. Niemelä, T. Isotalo, and J. Lempiäinen. Optimum antenna downtilt angles for macrocellular wcdma network. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2005(5):816–827, 2005.
38. F. Athley and M.N. Johansson. Impact of Electrical and Mechanical Antenna Tilt on LTE Downlink System Performance. In Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring), 2010 IEEE 71st, pages 1 –5, may 2010.
39. 3GPP TS 32.500. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS);LTE;Telecommunication management;Self-Organizing Networks (SON);Concepts and requirements. TS 32.500,version 8.0.0 Release 8, 3rd Generation Partnership Project (3GPP).
40. Gogokhia S, "ACP Algorithm Evaluation and Efficiency Improvement". „Интернаука“, 2021, №21(197)