

ფართოზოლოვანი უკაბელო
ტელეკომუნიკაციური ქსელების გამტარუნარიანობის
კვლევა პოლინგის მეთოდით

ბურკაძე ტატიანა

წარდგენილია დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

თბილისი, 0175, საქართველო

-----, 2013 წ.

საავტორო უფლება © 2013, ბურკაძე ტატიანა ონისიმეს ას

ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი

ჩვენ, ქვემოთ ხელისმომწერი ვადასტურებთ, რომ გავეცანით ტატიანა ბურკაძის მიერ შესრულებულ სადისერტაციო ნაშრომს დასახელებით: „ფართოზოლოგანი უკაბელო ქსელების გამტარუნარიანობის კვლევა პოლინგის მეთოდით“ და ვაძლევთ რეკომენდაციას საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოში მის განხილვას დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად.

თარიღი _____

ხელმძღვანელი:

ბერიძე ჯ. ლ.

რეცენზენტი:

რეცენზენტი:

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

2013 წ.

ავტორი: ბურკაძე ტატიანა

დასახელება: ფართოზოლოვანი უკაბელო ტელეკომუნიკაციური ქსელების გამტარუნარიანობის კვლევა პოლინგის მეთოდით

ფაკულტეტი: ენერგეტიკა და ტელეკომუნიკაცია

ხარისხი: დოქტორი

სსდომა ჩატარებულია: _____ 2013 წ.

ინდივიდუალური პიროვნებების ან ინსტიტუტების მიერ, შემოყვანილი 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 და სხვა რაიმე მეთოდით რეპროდუქცია დაუშვებელია ავტორის წერილობითი ნებართვის გარეშე.

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

რეზიუმე

ამჟამად ხდება უსადენო კავშირის თაობების ევოლუციური ცვლა, რომლის დამახასიათებელი ნიშანია ტრაფიკის დაძვრა მონაცემთა და ვიდეოს გადაცემის მხარეს. შედეგად ხდება მონაცემთა გადაცემის ახალი კონცეფციების შემუშავება უსადენო ქსელებში. ყველა ახალი მიდგომის ბირთვს წარმოადგენს IP-ტექნოლოგია.

ინფორმაციის გადაცემის სიჩქარეები თანამედროვე სატელეკომუნიკაციო ქსელებში, მათ შორის, უსადენოშიც მაღალია (1 მგბიტ/წმ მეტი), ამიტომაც ამ უკანასკნელებს ფართოზოლოვან უსადენო ქსელებს უწოდებენ (Broadband Wireless Network – BWN). დღესდღეობით BWN ორგანიზებულია სტანდარტებით IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.16 (WiMAX) და LTE (Long-Term Evolution). ყველა ეს სტანდარტი (მათი ბოლო ვერსიები) იყენებენ IP-ტექნოლოგიებს. ამასთანავე, თუკი IP-ტექნოლოგიები მონაცემთა გადაცემისთვის შესწავლილია მაღალ მეცნიერულ დონეზე, სალაპარაკო და ვიდეოსიგნალის გადაცემისთვის, განსაკუთრებით ინტერაქტიურ რეჟიმში, არის ბევრი შეუსწავლელი საკითხი.

ასეთ საკითხებს პირველ რიგში განეკუთვნება:

1. ლაპარაკის გადაცემის ხარისხი BWN ქსელებში პაკეტური კომუტაციის მეთოდით;
2. ინფორმაციის გადაცემის ხარისხის დამოკიდებულება ტრაფიკზე კავშირის ქსელებში;
3. ქსელის რესურსების დინამიკური გადანაწილება პაკეტების დაყოვნებების მინიმიზაციისთვის BWN-ში.

სადისერტაციო ნაშრომის შესავალში ჩამოყალიბებულია ნაშრომის აქტუალობა, მოყვანილია საკვლევი საკითხების მოკლე მიმოხილვა, ფორმულირებულია მიზნები და ამოცანები, ძირითადი დებულებები, რომლებიც გამოტანილია დაცვაზე.

პირველ თავში მოცემულია BWN-ის მახასიათებლები. ნაჩვენებია BWN-ის ევოლუცია და მონაცემთა გადაცემის სიჩქარის ზრდის დამოკიდებულება გადაცემის ახალი სიხშირული ზოლების დანერგვასთან. მოყვანილია და გაანალიზებულია BWN დანერგვის ტენდენციები საქართველოში.

მეორე თავში განხილულია მეტყველების გადაცემის ხარისხის დამოკიდებულების საკითხები BWN-ში. ძირითადი ყურადღება ეთმობა მეტყველების სიგნალების მიღების ხარისხის დამოკიდებულებას IP პაკეტების დაყოვნებაზე. ნაჩვენებია ქსელის გამტარუნარიანობის დამოკიდებულება პაკეტების დაყოვნებაზე BWN-ში.

სადისერტაციო ნაშრომში თანამედროვე BWN ქსელებში ინფორმაციის გადაცემის ხარისხის ანალიზი მოყვანილია სტოქასტური პოლინგის მოდელების გამოყენებით - რიგების მოწესრიგებული გამოკითხვით პაკეტური კომუტაციის ქსელებში (მესამე თავი). განსაზღვრულია მომსახურების დროების (დაყოვნების) დამოკიდებულება რიგების დატვირთვაზე.

დისერტაციის მეოთხე თავში გაანალიზებულია MAC-დონის პროტოკოლები WiMAX ქსელებისათვის. ნაჩვენებია WiMAX ქსელების

მართვის მექანიზმების განსხვავებები "სტაციონალურ" და "მობილურ" ვარიანტებში.

ნაშრომის მეხუთე თავში შემუშავებულია მრავალჯერადი შეღწევის პროტოკოლის იმიტაციური მოდელი IEEE 802.16 (WiMAX) სტანდარტებისათვის. მოცემული მოდელი ქსელის სხვადასხვა დატვირთვისას (ტრაფიკის) პაკეტების დასაშვები დაყოვნებების გამოთვლის საშუალებას იძლევა.

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი შედეგები:

1. სისტემატიზირებულია მიდგომები უსადენო კავშირის ძირითად სტანდარტებთან. ჩატარებულია ანალიზი და ურთიერთშედარება BWN-ის ორი მიმართულების - Wi-Fi/WiMAX და UMTS/LTE. ნაჩვენებია, რომ WiMAX და LTE თანაიარსებებენ 2020 წლამდე, თითოეულ მათგანს აქვს თავისი ადგილი და როლი ტელეკომუნიკაციის ტექნოლოგიების საერთაშორისო ბაზარზე.
2. შემუშავებულია მისაღები მეტყველების პაკეტების დაკარგვის და დაყოვნის დროს ხარისხის სუბიექტური და ობიექტური შეფასების მეთოდოლოგია.
3. შემუშავებულია BWN-ის მახასიათებლების შეფასების მეთოდოლოგია პოლინგის სხვადასხვა მეთოდების გამოყენებისას.
4. შემუშავებულია MAC-პროტოკოლების ანალიზის მეთოდები BWN-ის WiMAX "მობილურ" ვერსიაზე გადასვლისას. განსაზღვრულია ხენდოვერის პროცედურათა განსხვავება "სტაციონალურ" და "მობილურ" WiMAX შორის.
5. შემუშავებულია პაკეტების დაყოვნების განსაზღვრის მეთოდოლოგია ქსელის დატვირთვიდან (ტრაფიკიდან) გამომდინარე და შემოთავაზებულია ქსელის რესურსების დინამიკური განაწილების პროცედურა ამ დაყოვნებების მინიმიზაციისათვის.
6. შემუშავებულია MAC-პაკეტების მოსვლის დროის განსაზღვრის ალგორითმი WiMAX-ის ყოველი საბაზო სადგურისათვის
7. დამტკიცებულია, რომ WiMAX ქსელის სიხშირული ზოლის ეფექტური გამოყენება შესაძლებელია QoS ხარისხის მომსახურებისადმი დიფერენცირებული მიდგომით.

Abstract

At the present time there is an evolutionary change of generations of wireless communication, which is characterized by change to transfer of data and video. Consequently, new concepts of information transmission are developed in wireless networks. The core of any new approaches in communications is IP-technology.

Speeds of information transfer in modern telecommunication networks, including wireless, are high (above 1 Mbit/s), so they are known as broadband wireless networks (Broadband Wireless Network - BWN). Today BWN are organized by the family of standards - IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.16 (WiMAX) and LTE (Long-Term Evolution). All of these standards (their latest versions) use IP-based technologies. However, if IP-based technologies for data transfer were studied at a high scientific level, for voice and video, especially online mode, there are many unexplored issues.

These issues primarily include:

1. Voice transfer quality by packet commutation method in BWN;
2. Information transfer quality dependence on the traffic in communication networks;
3. Dynamic allocation of network resources to minimize the packet delay in the BWN.

In the introduction of the thesis work is substantiated its urgency, is given a brief review of the research questions, goals and objectives are formulated and main statements brought forward are described.

The first chapter gives the characteristics of BWN. The evolution of BWN and dependence of transfer speeds increment on the of new frequency bandwidths implementation is given. Are presented and analyzed trends in the implementation of BWN in Georgia.

In the second chapter are described issues of voice transfer quality in the BWN. Main attention is emphasized on dependencies of received voice signals quality on the IP-packet delays. The dependence of the bandwidth of BWN network on packet delays in the network is shown.

In this thesis analyzes of the quality of modern BWN communication networks is carried out by using stochastic models of polling –ordered interrogation of the turn in packet switching networks (Chapter Three). The dependence of service times (delay) on the loading of the turns are defined.

In the fourth chapter of the thesis the MAC-level protocols for networks of WiMAX are analyzed. It is showing differences between control mechanisms of WiMAX networks in the "stationary" and "mobile" versions.

In the fifth chapter of the work the simulation model of multiple access protocol for IEEE 802.16 standards is developed (WiMAX). The given model allows to calculate admissible delays of packages at different loadings (traffic) of a network.

The main results of the thesis:

1. A systematic approach to basic standards of wireless communication. The analysis and comparison of the two directions BWN - Wi-Fi / WiMAX and UMTS / LTE are done. It is shown that WiMAX and LTE will coexist until

2020; each of it has its own place and role in the global market of telecommunication technologies.

2. The technique of subjective and objective assessment of the received voice quality with delays and packet losses. Quantitative evaluations of degradation of the received signals with delays and packet losses are determined.
3. The technique of an estimation of characteristics BWN is developed at use of various methods of polling.
4. The methods for the analysis of MAC protocols in the BWN transition to the "mobile" version of WiMAX are developed. The difference for the handover procedures between "stationary" and "mobile" WiMAX is determined.
5. A method for determining the dependence of packet delays of loading (traffic) network and the proposed procedure for the dynamic allocation of network resources in order to minimize these delays is developed.
6. An algorithm for determination of receiving time of the MAC packets for each base station WiMAX is developed.
7. It is proved that the efficient use of bandwidth WiMAX network is possibly with differentiated approach to quality service QoS.

სარჩევი

შესავალი -----	18
თავი 1. ფართოზოლოვანი უგამტარო ქსელები – მდგომარეობა და მათი განვითარების გზები -----	25
1.1 ფართოზოლოვანი უგამტარო ქსელების ძირითადი ფუნქციები -----	25
1.2 BWN ქსელების ტექნოლოგიების ევოლუცია -----	31
1.2.1. ფიჭური კავშირის ქსელების ტექნოლოგიების ევოლუცია -----	31
1.2.2. BWA ქსელების ტექნოლოგიების ევოლუცია -----	46
1.3 BWN ქსელების ტექნოლოგიების ევოლუცია საქართველოში ----	56
1.4 დასკვნები პირველ თავთან დაკავშირებით -----	61
თავი 2. ინტერნეტ პროტოკოლები (IP) ფართოზოლოვან უგამტარო ქსელებში -----	62
2.1 თანამედროვე ქსელები და პარამეტრები, რომლებიც ზეგავლენას ახდენენ მომსახურების ხარისხზე -----	62
2.2 VoIP ქსელებში მომსახურების ხარისხის განსაზღვრა -----	68
2.3 მომსახურების ხარისხის სუბიექტური შეფასება ლაპარაკის გადაცემის დროს -----	70
2.4 მომსახურების ხარისხის ობიექტური შეფასება ლაპარაკის გადაცემის დროს პაკეტურ ქსელებში -----	71
2.5 ფაქტორების ანალიზი, რომლებიც გავლენას ახდენენ ლაპარაკის ხარისხზე პაკეტურ ქსელებში -----	74
2.5.1 კოდეკების გავლენა პაკეტიზირებული ლაპარაკის ხარისხზე -----	74
2.5.2 სალაპარაკო კოდეკების მახასიათებლები -----	74
2.5.3 დაყოვნებები და ჯიტერი IP ქსელებში -----	76
2.6 პაკეტების დანაკარგები -----	80
2.7 დასკვნები მეორე თავთან დაკავშირებით -----	81
თავი 3. უგამტარო ქსელების მახასიათებლების შეფასება პოლინგის სხვადასხვა მეთოდის დროს -----	82
3.1 პოლინგის სისტემათა კლასიფიკაცია -----	84
3.2 პოლინგის ძირითადი მოდელი -----	89
3.2.1 სტაციონალური რეჟიმი პოლინგის სისტემებში -----	91

3.3	ადაპტური დინამიკური პოლინგი უგამტარო ქსელებში -----	92
3.3.1	ადაპტური დინამიკური პოლინგის პარამეტრები შემთხვევისთვის, როდესაც რადიოფიჭა მუშაობს “ბოლო მილის” რეჟიმში -----	97
3.3.2	ადაპტური დინამიკური პოლინგის პარამეტრები შემთხვევისთვის, როდესაც რადიოფიჭა მუშაობს “მონაცემთა შეგროვების” რეჟიმში -----	100
3.4	დასკვნები მესამე თავთან დაკავშირებით -----	103
თავი 4. MAC-პროტოკოლები BWN-ში-----		104
4.1	MAC-დონის ფუნქციები -----	104
4.2	MAC-დონის არქიტექტურა -----	107
4.3	შეერთებების მართვისა და ორგანიზაციის თავისებურებები -----	110
4.4	MAC-დონის მონაცემების ბლოკები (MAC PDU) -----	114
4.5	MAC-დონის მონაცემების სტრუქტურა და ფიზიკური დონის პაკეტები -----	119
4.6	სამომხმარებლო (სააბონენტო) სადგურის ინსტალაცია ქსელში -----	120
4.7	IEEE 802.16-x სტანდარტების MAC-დონის მართვის სპეციფიკაციები -----	122
4.7.1	მართვა ქსელებში ტოპოლოგიით “წერტილი-მრავალწერტილი” -----	122
4.7.2	მართვის თავისებურებები Mesh-ქსელებში -----	123
4.8	MAC-დონის ფუნქციების რეალიზაციის თავისებურებები WiMAX მობილურ ვერსიაში -----	125
4.9	დასკვნები მეოთხე თავთან დაკავშირებით -----	132
თავი 5. MAC-პროტოკოლის პაკეტების დაყოვნება WiMAX სისტემებში და მათი მინიმიზაციის გზები -----		133
5.1	ზოგადი მონაცემები -----	133
5.2	პაკეტების დაყოვნების ალგორითმის დამუშავება -----	133
5.3	დაყოვნების დროის მახასიათებლები უგამტარო კავშირის ქსელებში დამუშავებული ალგორითმის მიხედვით -----	142
5.4	დასკვნები მეხუთე თავთან დაკავშირებით -----	145
დასკვნა -----		146
გამოყენებული ლიტერატურის სია -----		148

ცხრილების სია

1.1	ფიჭური მობილური კავშირის სისტემების ევოლუცია -----	34
1.2	3G ი 4G ტექნოლოგიების მახასიათებლების შედარებითი მონაცემები -----	46
1.3	ფართოზოლოვანი შეღწევის ქსელების რადიოსიხშირული არხების მახასიათებლები -----	47
1.4	მონაცემები IEEE 802.11 სტანდარტის საბაზო ვერსიების შესახებ -----	48
1.5	IEEE 802.16 სტანდარტების ოჯახი -----	51
1.6	IEEE 802.11 და IEEE 802.16 მოწყობილობების შედარებითი მახასიათებლები -----	55
1.7	Wi-Fi და WiMAX სტანდარტების მახასიათებლები -----	56
2.1	QoS შეფასება R- ფაქტორისა და MOS შეფასებების საფუძველზე -----	72
2.2	საღაპარაკო კოდეკების ტიპები და მათი მახასიათებლები -----	75
2.3	ღაპარაკის ხარისხი სხვადასხვა ტიპის კოდეკებისთვის (R- ფაქტორის და MOS შეფასების მოდელების ბაზაზე) -----	76
4.1	IEEE 802.16-x სტანდარტების კონვერგენციის ქვედონეების მოდიფიკაციები -----	108
4.2	IEEE802.16.e სტანდარტის სპეციფიკური ტერმინები და განსაზღვრებები -----	127

ნახაზების სია

1.1	ფიჭური კავშირის და ფართოზოლოვანი შედწევის ქსელების ელემენტებს შორის ურთიერთქმედების არქიტექტურა -----	28
1.2	UMTS სტანდარტის რელიზების გამოქვეყნების ქრონოლოგია -----	39
1.3	UMTS სისტემის არქიტექტურა (ა) და მომსახურება (ბ) რელიზი 99-ის თანახმად -----	40
1.4	UMTS სისტემის არქიტექტურა (ა) და მომსახურება (ბ) რელიზი 4-ის თანახმად -----	42
1.5	UMTS სისტემის არქიტექტურა (ა) და მომსახურება (ბ) რელიზი 5-ის თანახმად -----	42
1.6	UMTS სისტემის არქიტექტურა (ა) და მომსახურება (ბ) რელიზი 6-ის თანახმად -----	43
1.7	UMTS სისტემის არქიტექტურა (ა) და მომსახურება (ბ) რელიზი 8-ის თანახმად -----	45
1.8	საქართველოს ფიჭური კავშირის აბონენტთა რიცხვის განაწილების დიაგრამა -----	58
2.1	დამოკიდებულება MOS მოდელისა და R- ფაქტორის შეფასებებს შორის -----	73
2.2	ჯამური დაყოვნების სიდიდის ზეგავლენა R- ფაქტორსა და MOS შეფასებაზე -----	79
3.1	ლოდინის საშუალო დროის დამოკიდებულება ზღურბლის სიდიდიდან -----	99
3.2	ლოდინის საშუალო დროის დამოკიდებულება λ -დან ადაპტური მექანიზმით ციკლური გამოკითხვისას -----	103
4.1	საბაზო სადგურის MAC-დონის ფუნქციები პირდაპირი არხით გადაცემის მართვის პროცესში -----	106
4.2	საბაზო სადგურის MAC-დონის ფუნქციები უკუ არხის გადაცემის მართვის პროცესში -----	106
4.3	IEEE 802.16 x-ის MAC-დონის არქიტექტურა -----	107
4.4	შეერთებების იდენტიფიკატორის (CID) სტრუქტურა -----	112
4.5	MAC PDU ბლოკის სტრუქტურა -----	114
4.6	MAC-მონაცემების ბლოკის თავსართის სტრუქტურა -----	115
4.7	MAC-ფრეიმის თავსართის სტრუქტურა ზოლის მოთხოვნისას --	115

4.8	მართვის ქვეთავსართის სტრუქტურა -----	117
4.9	ფრაგმენტაციის ქვეთავსართის სტრუქტურა (FSH) -----	118
4.10	შეფუთვის ქვეთავსართის სტრუქტურა -----	118
4.11	ზედა დონეების მონაცემების პროტოკოლური ბლოკების ადაპტაცია და მათი გადაცემა MAC და ფიზიკურ დონეების გავლით IEEE 802.16.2004 სტანდარტით -----	120
4.12	სამომხმარებლო (სააბონენტო) სადგურის ინსტალაცია პირველადი ჩართვის დროს -----	121
4.13	IEEE 802.16 ქსელების ტოპოლოგია -----	122
4.14	მმართველი შეერთებების სახეები -----	124
4.15	ჩვეულებრივი (ა) და გაფართოებული (ბ) მეზობლობა -----	124
5.1	სუპერკადრის ხანგრძლივობა -----	134
5.2	თითოეული სადგურისთვის პაკეტების შემოსვლის მომენტების განსაზღვრის ალგორითმი -----	135
5.3	ა) სადგურებში პაკეტების არსებობა; ბ) სადგურებიდან პაკეტების შემოსვლის დრო -----	139
5.4	დაყოვნების დროის სივრცულ-დროითი დიაგრამა კადრის გადავსების გარეშე -----	140
5.5	დაყოვნების დროის სივრცულ-დროითი დიაგრამა კადრის გადავსებით -----	141
5.6	დაყოვნების დროის დამოკიდებულება შესავალი დატვირთვის ინტენსივობაზე საინფორმაციო ტაქტების რიცხვის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის (J=1, 4, 8) -----	143
5.7	დაყოვნების დროის დამოკიდებულება შესავალი დატვირთვის ინტენსივობაზე ზოლის ზომების ცვლილებისას ($T_{Req}=0,02; 0,04; 0,05$) -----	143
5.8	დაყოვნების დროის დამოკიდებულება შესავალ დატვირთვის ინტენსივობაზე საინფორმაციო ტაქტების რიცხვის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის (J=20, 37, 49) -----	144

შემოკლებათა სია

1G	First generation technologies	მოდრავი კავშირის ქსელების პირველი თაობის ტექნოლოგია
2G	Second generation technologies	მოდრავი კავშირის ქსელების მეორე თაობის ტექნოლოგია
3G	Third-generation technologies	მოდრავი კავშირის ქსელების მესამე თაობის ტექნოლოგია
4G	Fourth generation technologies	მოდრავი კავშირის ქსელების მეოთხე თაობის ტექნოლოგია
3GPP	Third Generation Partnership Project	მესამე თაობის პარტნიორების პროექტი
3GPP2	Third Generation Partnership Project 2	მესამე თაობის პარტნიორების მეორე პროექტი
AMPS	Advanced Mobile Phone System	სრულყოფილი მობილური სატელეფონო სამსახური
ATM	Asynchronous Transfer Mode	მონაცემთა ასინქრონული გადაცემა
AuC	Authentication Center	აუტენტიფიკაციისა და აბონენტთა შეღწევის კონტროლის ცენტრი
BE	Best Effort	მომსახურება შესაძლებლობისდაგვარად
CDMA	Code Division Multiplex Access	მრავალჯერადი შეღწევა არხების კოდური დაყოფით
CID	Connection Identifier	შეერთების იდენტიფიკატორი
CN	Core Network	საყრდენი ქსელის ბლოკი
CPS	Common Part Sublayer	ძირითადი ქვედონე
CS	Channel Switching	დომენი არხების კომუტაციით
CSD	Circuite Switched Data	მონაცემთა გადაცემა კომუტირებადი არხებით

DAMA	Demand Assigned Multiple Access	მრავალჯერადი შეღწევა მოთხოვნათა განაწილებით
D-AMPS	Digital AMPS	AMPS ციფრული სტანდარტი
DL	Downlink	გადაცემის პირდაპირი მიმართულება
E1	PCM multiplex signal at 2048 kbit/s (European standard)	2048 კბიტ/წმ სიჩქარის მულტიპლექსირებული იკმ სიგნალი (ევროპული სტანდარტი)
EDGE	Enhanced Data for Global Evolution	მონაცემთა გადაცემის მაღალსიჩქარიანი ტექნოლოგია (500 კბიტ/წმ-მდე) არხების კომუტაციით GSM პერსპექტიული ქსელებისათვის
EKS	Encryption Key Sequence	დაშიფრის გასაღების ინდექსის განსაზღვრა
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	სტანდარტების ევროპული კავშირგაბმულობის ინსტიტუტი
EV-DO	Evolution-Data Only	მონაცემთა გადაცემის მომსახურების ევოლუცია
GPRS	General Packet Radio Service	პაკეტური რადიოკავშირის ზოგადი მომსახურება
GSM	Global System for Mobile Communications	მობილური კავშირის გლობალური სისტემა
GTP	GPRS Tunnelling Protocol	GPRS ტექნოლოგიების პროტოკოლი
HLR	Home Location Register	ადგილობრივი აბონენტების რეგისტრი
HSCSD	High Speed Circuit-Switched Data	მონაცემთა გადაცემის მაღალსიჩქარიანი ტექნოლოგია (28,8 ბიტ/წმ-მდე) არხების კომუტაციით GSM ქსელებისათვის

HSDPA	High Speed Downlink Packet Access	მონაცემთა მაღალსიხქრიანი პაკეტური გადაცემა საბაზო სადგურიდან მობილურ ტერმინალამდე
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access	მონაცემთა მაღალსიხქრიანი პაკეტური გადაცემა მობილური ტერმინალიდან საბაზო სადგურამდე
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	ელექტრონიკისა და ელექტროტექნიკის ინჟინერთა ინსტიტუტი
IP	Internet Protocol	ინტერნეტ პროტოკოლი
ISDN	Integrated Services Digital Network	ციფრული ქსელი მომსახურებათა ინტეგრაციით
ITU	International Telecommunication Union	ელექტროკავშირის საერთაშორისო ორგანიზაცია
ISO/OSI	International Standards Organization/ Open System Interconnection	სტანდარტიზაციის საერთაშორისო ორგანიზაცია / ღია სისტემების ურთიერთკავშირი
LTE	Long-Term Evolution	მობილური კავშირის ახალი თაობის სისტემა
MAC	Medium Access Control	გარემოში შეღწევის მართვა
MIMO	Multiple Input – Multiple Output	მრავალი შესასვლელი – მრავალი გამოსასვლელი
MME	Mobility Management Entity	მობილურობის მართვის კვანძი
MMS	Multimedia Messaging Service	მულტიმედიაური მომსახურება
MPEG	Motion Picture Expert Group	ვიდეოინფორმაციის კოდირების სტანდარტების შემმუშავებელი ჯგუფი (ასევე სტანდარტების დასახელებების)
MSC	Mobile Switching Center	მობილური ქსელის კომუტაციის ცენტრი

NMT	Nordic Mobile Telephone	ანალოგური მობილური კავშირის სკანდინავიური სტანდარტი
nrt-PS	Non-Real Time Polling Service	მომსახურებათა გამოკითხვა, რომლებიც არ მოითხოვენ რეალური დროის ხარისხს
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	სიხშირული არხების ორთოგონალური მულტიპლექსირება
PDU	Protocol Data Unit	მონაცემთა პროტოკოლური ბლოკი
PS	Packet Switching	დომენი პაკეტების კომუტაციით
QoS	Quality of Service	მომსახურების ხარისხი
SAE	System Architecture Evolution	სისტემური არქიტექტურის ევოლუცია
SC-FDMA	Single Carrier – Frequency Division Multiple Access	მრავალჯერადი შეღწევა არხების სიხშირული დაყოფით და ერთი გადამტანით
SDU	Service Data Unit	მომსახურებათა მონაცემთა ბლოკები
SFID	Service Flow Identifier	მომსახურებათა ნაკადის იდენტიფიკატორი
PKM	Privacy Key Management	გასაღებთა მართვის პროტოკოლი
PMP	Point-to-multipoint	წერტილი-მრავალწერტილი
rt-PS	Real Time Polling Service	გამოკითხვა რეალურ დროში მომსახურებისთვის
SIM	Subscriber Identity Module	აბონენტის იდენტიფიკაციის მოდული
SMS	Short Message Service	მოკლე შეტყობინებათა გადაცემის მომსახურება
TACS	Total Access Communications System	საყოველთაოდ ხელმისაწვდომი კავშირის სისტემა

TRF-IND	Traffic Indication	ტრაფიკის ინდიკაცია
UCD	Uplink Channel Descriptor	რესურსის ცვლილების მოთხოვნა
UGS	Unsolicited Grant Service	სისშირეთა ზოლის რეზერვირება
UL	Uplink	კავშირის უკუ მიმართულება
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System	მობილური კავშირის უნივერსალური სისტემა
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network	ქსელთან რადიოწვდომის უნივერსალური საბაზისო ბლოკი
VAD	Voice Activity Detection	ლაპარაკის აქტიური პერიოდების აღმოჩენა
VCI	Virtual Channel Identifier	ვირტუალური არხის იდენტიფიკატორი
VoIP	Voice over IP	ბგერა IP-ზე ზედღებით
VPI	Virtual Path Identifier	ვირტუალური მარშრუტის იდენტიფიკატორი
WAP	Wireless Application Protocol	სპეციალურად ადაპტირებულ ინტერნეტ გვერდებთან წვდომა
Wi-Fi	Wireless Fidelity	უსადენო “საიმედლობა”
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access	მსოფლიო ურთიერთქმედება მიკროტალღური წვდომისთვის

შესავალი

ნაშრომის აქტუალობა. ფართოხოლოვანი უგამტარო ქსელები (Broad band Wireless Network - BWN) წარმოადგენენ რადიოკავშირის ქსელების ნაირსახეობას, რომლებიც ახორციელებენ შეტყობინებების მიმოცვლას აბონენტებს/მომხმარებლებს შორის, ასევე უზრუნველყოფენ მათ შედწევას სხვა სატელეკომუნიკაციო ქსელების საინფორმაციო რესურსებთან სიჩქარით 1 მბიტ/წმ და მეტი.

BWN-ს წარმოშობა და საყოველთაო გავრცელება განაპირობა გადასაცემი შეტყობინებების მოცულობისა და გადაცემის სიჩქარის გაზრდის აუცილებლობამ, დაკავშირებულმა ინფორმაციული საუკუნის დაწყებასთან (XX საუკუნის ბოლო მეოთხედი). მეცნიერებისა და ტექნიკის პროგრესი, შრომის ნაყოფიერების ამაღლება კაცობრიობის მოღვაწეობის ყველა სფეროში, წარმოების ზრდა, ადამიანის ცხოვრებაში ინფორმაციული ტექნოლოგიების სულ უფრო მზარდი შეღწევა – ეს ის ფაქტორებია, რომლებიც განაპირობებენ სატელეკომუნიკაციო ქსელებით გადასაცემი ინფორმაციის მოცულობის ზვავისებრივ ზრდას. აქედან გამომდინარე, გადაცემის მაღალი სიჩქარის გარეშე შეუძლებელია მომხმარებელამდე დიდი მოცულობის ინფორმაციის თავისდროული მიტანა. ამიტომ ტელეკომუნიკაციის განვითარებაში ყველაზე მნიშვნელოვანი მიმართულებები გახდნენ მოცულობა და სიჩქარე.

ახალი ეპოქის მოთხოვნილებებს ყველაზე უკეთესად პასუხობს უგამტარო კავშირი, რომელიც უზრუნველყოფს ინფორმაციის მიმოცვლას აბონენტებს შორის ნებისმიერ დროს, მათ ადგილსამყოფლის შეუზღუდავად. რადიოკავშირის მასიური გამოყენების ერთ-ერთ (შეიძლება ითქვას ერთადერთ) ბარიერულ ფაქტორს წარმოადგენს რადიოსიხშირული რესურსის შეზღუდულობა. ეს უკანასკნელი განპირობებულია რადიოტალღების გავრცელების თავისებურებებითა და რადიოსაშუალებების ურთიერთხელშეშლის დაუშვებლობის მოთხოვნილებიდან [1]. უგამტარო ქსელები ამ ბარიერის გადასალახავად მიმართავენ უგამტარო და გამტარიანი კავშირების ერთობლივ გამოყენებას, მათ შორის ფუნქციების ასეთი განაწილებით:

- ✓ გამტარიანი (საკაბელო, ოპტიკურბოჭკოვანი) კავშირები უზრუნველყოფენ შეტყობინებების მიმოცვლას ერთმანეთისაგან დიდ მანძილზე დაშორებულ მცირე ზომის ტერიტორიულ ერთეულებს შორის, სადაც იმყოფებიან მომხმარებლები (ამავე ჯგუფს მიეკუთვნება თანამგზავრული კავშირიც);
- ✓ უგამტარო კავშირი გამოიყენება აბონენტების ურთიერთკავშირისათვის მცირე ზომის ტერიტორიებზე სატრანსპორტო ქსელებში შეღწევის (მიერთების) ჩათვლით.

ტელეკომუნიკაციის უგამტარო ტექნოლოგიებში, რომლებიც, როგორც წესი, ვითარდებიან 1G-დან 4G-მდე (ზოგჯერ მოიხსნება 5G-ც) თაობების სახით, XXI საუკუნის დასაწყისიდან განხორციელდა მკვეთრი გადასვლა ბგერითი ტრაფიკიდან მონაცემებისა და ვიდეო ტრაფიკის გადაცემაზე. დღეისათვის ბგერითი ტრაფიკი უგამტარო კავშირგაბმულობაში შეადგენს მთელ ტრაფიკის 20%. შესაბამისად, ხორციელდება თაობების ევოლუციური ცვლილება 3G თაობამდე (რომელიც უკვე ფუნქციონირებს) და 4G-მდე, რომელიც ჯერ-ჯერობით იმყოფება წინა თაობების ჩანაცვლების პროცესში.

თაობების ევოლუციურ ცვლილებებმა და ტრაფიკის მკვეთრმა გადახრა მონაცემების და ვიდეო გადაცემების მიმართულებით მოითხოვა უგამტარო ქსელებში ინფორმაციის გადაცემის ახალი კონცეფციის შემუშავების აუცილებლობა. ასეთი კონცეფცია გახდა ნებისმიერი სახის (ბგერითი, მონაცემების, ვიდეო) საწყისი ინფორმაციის გადაცემა პაკეტური სახით (ინტერნეტ პროტოკოლის ტექნოლოგია – IP). შესაბამისად, ნებისმიერი თეორიული და პრაქტიკული კვლევები უგამტარო ქსელებში ინფორმაციის გაცვლის დარგში მიმართულია: უგამტარო კავშირით დაფარვის მთელ ტერიტორიაზე გადაცემის მოთხოვნილი ხარისხით და სიჩქარეებით შეღწევისაკენ.

დღეისათვის შექმნილია და კიდევ შემუშავდება IEEE 802.11 - Wi-Fi (Wireless Fidelity) და IEEE 802.16 – WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) სტანდარტის უგამტარო ქსელების აგების სხვადასხვა ვერსიების დიდი რაოდენობა [2, 3]. შემუშავების პროცესში და საერთაშორისო სტანდარტიზაციის ეტაპზე არის BWN-ის უახლესი

სტანდარტი – LTE და მისი უკანასკნელი ვერსია LTE Advanced (Release-10) [4].

ზემოაღნიშნული BWN უახლესი ტექნოლოგიის დანერგვა და ეფექტური ექსპლუატაცია მოითხოვს, როგორც ცალკეულ კვანძებისა და პროტოკოლებისადმი მთლიანად მიდგომის, ასევე ამა თუ იმ დებულებების თეორიული დასაბუთებების შემდგომ სრულყოფას. ყოვლისმომცველ პაკეტურ კომუტაციაზე გადასვლასთან დაკავშირებით ჩნდებიან კითხვები, რომლებიც პრობლემატურია გადასაცემი შეტყობინებების გარკვეული სახეებისათვის, მაშინ როდესაც სხვა სახეებისათვის ისინი შეიძლება იქნან იგნორირებული. მაგალითად, VoIP (Voice over IP) ტექნოლოგიისათვის ყველაზე მნიშვნელოვანია ქსელში პაკეტების დაყოვნება, მაშინ როდესაც მონაცემების გადაცემის დროს დაყოვნება არ წარმოადგენს კრიტიკულ ფაქტორს.

IP ქსელებში პაკეტების დაყოვნების საკითხებზე არსებობს ნაშრომთა დიდი რაოდენობა [6, 7, 8, 9, 10]. მაგრამ მათში პრაქტიკულად არ განიხილება ბგერითი ინფორმაციის გადაცემის ხარისხზე პაკეტების დაყოვნების გავლენის თავისებურებები, და ამ დაყოვნების შემცირების მეთოდები და მიდგომები.

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითად მიზანს წარმოადგენს BWN ქსელებში პაკეტების გავლის პროცესში პაკეტების დაყოვნების შეფასების მეთოდის შემუშავება, მიღებული სიგნალების ხარისხის რაოდენობრივი შეფასების მეთოდის შექმნა პაკეტების დაყოვნებაზე დამოკიდებულებით და BWN ქსელებში პაკეტების დაყოვნების მინიმიზაციის გზების მოძებნა.

სადისერტაციო ნაშრომში დასმული მიზნები ითვალისწინებენ შემდეგი *ამოცანების გადაწყვეტას*:

1. BWN-ში IP ტექნოლოგიით ბგერის გადაცემის ხარისხის ყოველმხრივი ანალიზი. ხარისხის კრიტერიუმების განსაზღვრა, როგორც სუბიექტური, ასევე ობიექტური შეფასებებით.
2. პოლინგის სტოქასტიკური მოდელების გამოკვლევის მეთოდების სისტემატიზაცია და მათი გამოყენება მართვის ცენტრალიზებულ

მექანიზმიან BWN-ში პაკეტების დაყოვნების შეფასებისათვის; BWN-ში ადაპტური დინამიკური პოლინგის გამოყენების კვლევა.

3. გადაცემის გარემოში შეღწევის მართვის MAC (Medium Access Control) დონის პროტოკოლების თავისებურებების ანალიზი WiMAX-ის “მობილური“ რეჟიმში გადასვლისას; ჰენდოვერის (Handover – მართვის გადაცემა) პროცედურის ყოველმხრივი ანალიზი მოძრაობისას კავშირის წყვეტის გარეშე.
4. პაკეტების კადრების დაყოვნების ანგარიშის მეთოდის დამუშავება ქსელში დატვირთვისთან (ტრაფიკთან) დამოკიდებულებაში; ქსელის რესურსების დინამიკური გადანაწილების რეკომენდაციების განსაზღვრა პაკეტების მინიმალური დაყოვნების მიღწევის მიზნით.

კვლევის მეთოდები. ნაშრომში დასმული ამოცანების გადასაწყვეტად გამოყენებულია: ციკლური გამოკითხვის სტოქასტიკური სისტემების გამოკვლევის მეთოდები; ალბათობის თეორიის მეთოდები; მასობრივი მომსახურების სისტემების თეორია; იმიტაციური მოდელირება.

სამეცნიერო სიახლე. ნაშრომში ჩატარებული კვლევებისა და მიღებული შედეგების სამეცნიერო სიახლე მდგომარეობს შემდეგში:

1. სისტემატიზირებულია მიდგომები უგამტარო კავშირის ძირითად სტანდარტებთან; მოყვანილია ორი მიმართულების - Wi-Fi/WiMAX და UMTS/LTE ანალიზი და შეჯერება. ნაჩვენებია, რომ WiMAX და LTE თანაარსებობას გააგრძელებენ 2020 წლამდე, თითოეულ მათგანს ექნება რა საკუთარი ადგილი და როლი მსოფლიოს ტელეკომუნიკაციური ტექნოლოგიების ბაზარზე.
2. დამუშავებულია პაკეტების დაყოვნებისა და დაკარგვის პირობებში მიღებული ლაპარაკის ხარისხის შეფასების მეთოდის; მიღებულია შემოსული სიგნალების ხარისხის გაუარესების რადენობრივი შეფასებები პაკეტების დაყოვნებისა და დაკარგვისას.
3. დამუშავებულია BWN მახასიათებლების შეფასების მეთოდის პოლინგის სხვადასხვა მეთოდის გამოყენებისას.

4. დამუშავებულია MAC-პროტოკოლების ანალიზის მეთოდები BWN-ის WiMAX-ის “მობილურ“ რეჟიმზე გადასვლისას.
5. დამუშავებულია პაკეტების დაყოვნების ქსელის დატვირთვაზე (ტრაფიკზე) დამოკიდებულების განსაზღვრის მეთოდთა და შემოთავაზებულია ქსელის რესურსების დინამიკური გადანაწილების პროცედურა ამ დაყოვნებათა მინიმიზაციისათვის.

პრაქტიკული ღირებულება და შედეგების რეალიზაცია.

მიღებული შედეგები საშუალებას იძლევიან შეფასდეს პაკეტების დაყოვნება (და, შესაბამისად, მიღებული ბგერითი სიგნალების ხარისხი) WiMAX (Wi-Fi) ქსელის დატვირთვის (ტრაფიკის) მიხედვით, რაც შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ქსელის რესურსების (მათ შორის გამტარუნარიანობის) დინამიკური გადაწყობისათვის გადატვირთვების პირობებში. ნაშრომის მასალების საფუძველზე შეიძლება ფორმულირებულ იქნეს ტრაფიკის მართვის კონკრეტული რეკომენდაციები WiMAX-ის კონკრეტულ ქსელებისათვის.

ნაშრომში მიღებული შედეგები შეიძლება გამოყენებული იქნეს LTE ქსელების აგებისას, კერძოდ ამ ქსელებში დასაშვები/არ დასაშვები დაყოვნებების განსაზღვრის ნაწილში.

სადისერტაციო ნაშრომში მიღებული შედეგები ამჟამად გამოიყენება საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სასწავლო პროცესში.

ნაშრომის აპრობაცია. ნაშრომის ძირითადი შედეგები მოხსენებულ და განხილულ იქნა სხვადასხვა დროს გამართულ სემინარებზე და კონფერენციებზე:

1. პირველ და მეორე თემატურ სემინარზე (თბილისი, სტუ, 2011-2012);
2. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე “Computing and Computational Intelligence: Proceedings of the 3rd International Conference on COMPUTATIONAL INTELLIGENCE (CI’09)” (Tbilisi, Georgia, 2009);
3. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე “ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები“ (ქუთაისი, საქართველო, 2010);

4. აკადემიკოს ივერი ფრანგიშვილის დაბადების 80 წლისთავისადმი მიძღვნილ საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე “საინფორმაციო და კომპიუტერული ტექნოლოგიები, მოდელირება, მართვა“ (თბილისი, საქართველო, 2010);
5. სტუ-ს მართვის ავტომატიზირებული სისტემების კათედრის შექმნის 40 წლისთავისადმი მიძღვნილ საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე (თბილისი, საქართველო, 2011).

პუბლიკაციები. დისერტაციის შედეგები ასახულია რეცენზირებად ჟურნალებში გამოქვეყნებულ 7 ნაშრომში.

დაცვაზე გამოტანილი **ძირითადი დებულებები.**

1. ახალი მიდგომა BWN-ის კლასიფიკაციისადმი.
2. BWN IP-ქსელებით ბგერის გადაცემის შეფასებების სუბიექტური და ობიექტური მეთოდები პაკეტების დაყოვნებისა და დაკარგვის შემთხვევებში.
3. WiMAX ქსელის მართვის MAC-პროტოკოლის ცვლილების ანალიზის მეთოდი ქსელის “სტაციონალური“-დან “მობილურ“ რეჟიმში გადასვლისას.
4. ქსელის დატვირთვაზე (ტრაფიკზე) დამოკიდებულებით პაკეტების დაყოვნების (დაკარგვის) განსაზღვრის და ამ დაყოვნებების მინიმიზაციისათვის ქსელის რესურსების დინამიკური გადაწყობის მეთოდი.

სადისერტაციო ნაშრომის მოცულობა და სტრუქტურა. ნაშრომი შედგება შესავალის, ხუთი თავისაგან, დასკვნისა და გამოყენებული ლიტერატურის სიისაგან.

პირველ თავში აღწერილია ძირითადი სტანდარტები და უგამტარო კავშირის აგების სისტემები. გაანალიზირებულია 2000 წლიდან BWN-ის ორი მიმართულებით - LAN და MAN უგამტარო ქსელების განვითარების და UMTS/LTE ქსელების შექმნის გზები. მოყვანილია ორივე მიმართულების დახასიათება და განსაზღვრულია მათი თანაარსებობის პრინციპები მობილური კავშირის ფარგლებში.

მეორე თავი ეძღვნება BWN IP-ქსელებით ბგერითი ინფორმაციის გადაცემის ხარისხის შეფასების მეთოდიკას. ძირითადი ყურადღება ეთმობა ადრესატის მიერ მიღებული სიგნალის ხარისხის ქსელში

სიგნალების პაკეტების გავლის დაყოვნებაზე დამოკიდებულების გამოვლენას. შემოთავაზებულია მიღებული სიგნალების ხარისხის შეფასების სუბიექტური და ობიექტური მეთოდები პაკეტების დაყოვნების (დაკარგვის) შემთხვევებში.

მესამე თავში მოყვანილია BWN IP-ქსელებში პაკეტების დაყოვნების ანალიზი ცენტრალიზებული გამოკითხვის (პოლინგის) მექანიზმის მეთოდით. აღნიშნული მეთოდი, რომელიც წარმატებით გამოიყენება IP-ქსელებით მონაცემების გადაცემისათვის, არასაკმარისადაა შესწავლილი ბგერითი ინფორმაციის გადაცემისათვის (VoIP). შემოთავაზებულია BWN-ში ადაპტური დინამიკური პოლინგი, რაც იძლევა ქსელის მუშაობის ეფექტურობის მნიშვნელოვან ამაღლებას რიგების მარტივ ციკლურ გამოკითხვასთან შედარებით.

მეოთხე თავი ეძღვნება WiMAX სისტემის ქსელების MAC-დონის პროტოკოლებს. განსაზღვრულია MAC-დონის ფუნქციები გადაცემის მიმართულებებისათვის, როგორც “ზევით“ (uplink), ისე “ქვევით“ (downlink). ასევე განსაზღვრულია MAC-ქვედონების ფუნქციები და მექანიზმები. გაანალიზებულია MAC-დონის ფუნქციების თავისებურებები WiMAX ქსელების “სტაციონალური“ რეჟიმიდან “მობილურ“ რეჟიმში გადასვლის დროს.

ნაშრომის **მეხუთე თავი** ეძღვნება მრავალჯერადი შეღწევის პროტოკოლის იმიტაციური მოდელის შემუშავებას WiMAX 802.16 სტანდარტისათვის. შემოთავაზებული მოდელი საშუალებას იძლევა გამოთვლილ იქნას პაკეტების დაყოვნება ქსელის სხვადასხვა დატვირთვის (ტრაფიკის) შემთხვევაში. ნაშრომში მოყვანილია დაყოვნების დროის რეალური მახასიათებლები, როგორც შემავალი დატვირთვის ინტენსივობის და პაკეტების სუპერკადრების ზომების ფუნქცია.

დასკვნაში მოყვანილია სადისერტაციო ნაშრომში მიღებული ძირითადი შედეგები.

თაზო 1. ფართოზოლოვანი უგამტარო ქსელები – მდგომარეობა და მათი განვითარების გზები

1.1. ფართოზოლოვანი უგამტარო ქსელების ძირითადი ფუნქციები

ფართოზოლოვანი უგამტარო ქსელების ან უშუალოდ BWN (Broadband Wireless Network) სოციალური დანიშნულება განისაზღვრება იმით, რომ უზრუნველყოფენ:

- ✓ პირველ რიგში აბონენტებს შორის პერსონალურ კავშირს ნებისმიერ დროს და ნებისმიერი ადგილმდებარეობის შემთხვევებში; ამასთანავე შეტყობინების მიმოცვლა შესაძლებელია აბონენტის გადაადგილების პროცესშიც (მობილური კავშირი);
- ✓ მეორეს მხრივ პერსონალურ შეღწევას (მიერთებას) სხვადასხვა ელექტრონულ ინფორმაციულ რესურსებთან მათ შორის ინტერნეტთან და ინფორმაციის ფართომავწყებელ (Broadcasting) წყაროებთან.

BWN-ქსელებით რეალიზებადი ელექტროკავშირის სახეები უზრუნველყოფენ დღისათვის არსებული ყველა სახის შეტყობინებების გადაცემას: ბგერითი და ვიდეოშეტყობინებები (უძრავი და მოძრავი), მონაცემები, ტექსტი, ფაქსიმილური შეტყობინებები და სხვ. თანამედროვე BWN-ში შეტყობინებების მატერიალურ მატარებლებს წარმოადგენენ მხოლოდ ციფრული ფორმის სიგნალები, რაც განპირობებულია მათი მთელი რიგი ტექნოლოგიური უპირატესობებით. ამიტომ მასალის შემდგომი გადმოცემა ორიენტირებული იქნება ინფორმაციის გადაცემისა და დამუშავების ციფრულ მეთოდებზე [11].

კავშირის სხვადასხვა სახეს შეესაბამება გადაცემული ციფრული ნაკადების სხვადასხვა სიჩქარე - ათეული კბიტ/წმ-დან ბგერითი შეტყობინებებისათვის და ათეულ მგბიტ/წმ-მდე ვიდეო და მონაცემების შეტყობინებებისათვის. თანამედროვე BWN-ში რადიოსიხშირული სპექტრის გამოყენების ეფექტურობა ფასდება გადაცემის ხვედრითი სიჩქარით - ბიტ/წმ/ჰც, რაც რაოდენობრივად წარმოადგენს 1 ჰც

სისწორულ ზოლში გადაცემული ბიტების რაოდენობას წამში. ეს სიდიდე დღეს ერთიდან რამდენიმე ბიტის ტოლია. აქედან წარმოდგება მოთხოვნილება BWN-ის რადიო არხების ფართოზოლოვანობისადმი - ერთეული და ათეული მგჰც.

ქსელის კვანძების ტერიტორიული განთავსების ხასიათისა და რადიოდაფარვის ზონის ზომების მიხედვით BWN იყოფა ოთხ კატეგორიად:

- ✓ პერსონალური უგამტარო ქსელები (Wireless Personal Area Network - WPAN). მათი დანიშნულებაა გამტარიანი კავშირის შეცვლა აბონენტის უშუალო შეღწევის საზღვრებში (სამუშაო მაგიდა, ოთახი): პირობითად მიღებულია, რომ პერსონალური შეღწევის მანძილი (Personal Operating Space - POS) შეადგენს არაუმეტეს 10 მეტრს. PAN-ის ტიპური მაგალითია უგამტარო ქსელი პერსონალური კომპიუტერის ელემენტების შესაერთებლად (კლავიატურა, თაგვი, პრინტერი, გარნიტურა) ან საყოფაცხოვრებო მულტიმედია ქსელი (ციფრული ფოტოაპარატი, ვიდეოპლერი, ვიდეოკამერა) [11, 12];
- ✓ ლოკალური უგამტარო ქსელები (Wireless Local Area Network - WLAN). დანიშნულებაა უგამტარო კავშირის განხორციელება ზონაში რადიუსით 100 მ-მდე. ასეთი LAN-ების ტიპური მაგალითებია ოფისების, სასტუმროების, აეროპორტების და სხვა ქსელები [11, 12, 13];
- ✓ მუნიციპალური/ქალაქის უგამტარო ქსელები (Wireless metropolitan Area Network-WMAN). დანიშნულებაა უგამტარო კავშირის ორგანიზება დიდი ქალაქების ადმინისტრაციული ზონების (კვარტალი, რაიონი) ან დასახლებული პუნქტებისათვის. დაშორება MAN-ის კვანძებს შორის შეიძლება იყოს ათეული მეტრიდან რამდენიმე კილომეტრამდე. MAN-ის ტიპური მაგალითი შეიძლება იყოს მსხვილი საწარმოს უგამტარო ქსელი ობიექტების ტერიტორიული დაშორებით [13].
- ✓ ფიჭური მობილური კავშირის ქსელები. მათი დანიშნულებაა იმ მომხმარებლების მობილური კავშირით უზრუნველყოფა,

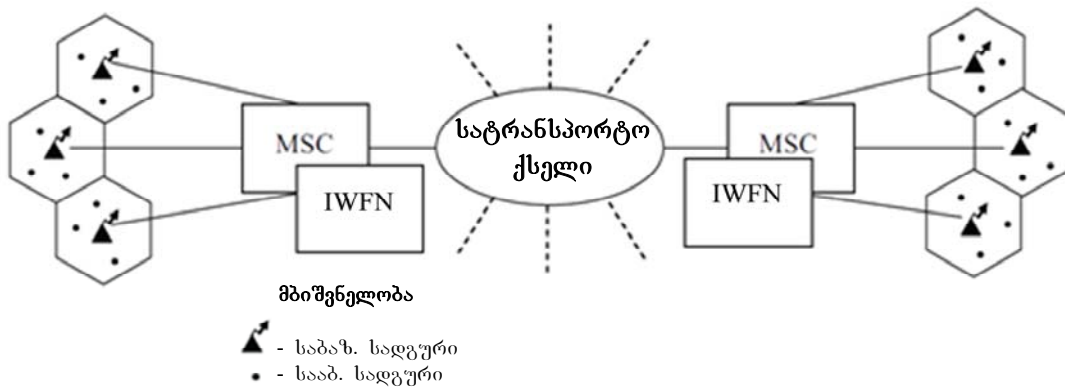
რომლებიც გადაადგილდებიან რეგიონალური ან ნაციონალური მასშტაბის ტერიტორიაზე სიჩქარით 120 კმ/წმ-მდე. სტრუქტურულად ქსელი შედგება მიმღებ-გადამცემი კვანძებისაგან (საბაზო სადგურები) და საკომუტაციო მოწყობილობისაგან, რომელთა დანიშნულებაა მოძრავი ობიექტის მიმდინარე ადგილმდებარეობის განსაზღვრა და უწყვეტი კავშირის ორგანიზება აბონენტთან მისი მომსახურების ერთი ზონიდან მეორეში გადაადგილების პირობებში. რადიოდაფარვის ზონა იყოფა ფიჭებად. ქსელის კვანძებს (საბაზო სადგურებს) შორის მანძილი შეადგენს ასეულობით მეტრიდან რამდენიმე კილომეტრამდე - მსხვილ ქალაქებში და რამდენიმე ათეულ კილომეტრს სოფლად. ჩამოთვლილი ქსელების ზომებისა და დანიშნულების განსხვავება აქტუალურს ხდის მათ ტერიტორიულ თავსებადობას, ე.ი. მცირე ზომის ქსელების განთავსებას დიდი ზომის ქსელების ტერიტორიაზე [13, 14, 15].

ქსელების ტერიტორიული შეთავსებადობის ერთ-ერთ აუცილებელ პირობას წარმოადგენს სხვადასხვა იერარქიული დონის ქსელების რადიოელექტრონული საშუალებების ელექტრომაგნიტური თავსებადობა [16].

BWN, როგორც ისეთი ტერიტორიულად განცალკევებული ქსელების სისტემოტექნიკა, რომლებიც მრავალ კვანძებს შორის იყენებს საერთო სიხშირულ არხს, ვითარდება ორი მიმართულებით:

1. ერთიან სიხშირულ-ტერიტორიულ გარემოსთან (medium) მრავალჯერადი შეღწევის უზრუნველყოფა მომსახურების ზონაში განლაგებულ კვანძებს შორის შეტყობინების მიმოცვლისათვის; ეს მიმართულება დამახასიათებელია ისეთი ქსელების ნაირსახეობებისათვის, როგორებიცაა PAN, LAN, MAN;
2. ერთიან სატრანსპორტო სისტემაში კვანძების მრავალჯერადი შეღწევის უზრუნველყოფა ინფორმაციის მიმოცვლისათვის მცირეზომიან ტერიტორიულ კვანძებთან. ეს მიმართულება უპირველესად მობილური კავშირის ქსელებისთვისაა დამახასიათებელი.

ფიჭური კავშირისა და BWA ქსელებისათვის დამახასიათებელია გარკვეული ტერიტორიის (ფიჭის) ფარგლებში ფიქსირებული (გადაადგილებადი) ან მოძრავი სააბონენტო (Mobile Station) სადგურებისა და ამ სადგურებთან რადიონტერფეისებით დაკავშირებული სტაციონალური საბაზო სადგურების (Base Station - BS) ერთობლიობა (ნახ. 1.1).



ნახ. 1.1. ფიჭური კავშირის და ფართოზოლოვანი შეღწევის ქსელების ელემენტებს შორის ურთიერთქმედების არქიტექტურა

სხვადასხვა ქსელების საბაზო სადგურები სააბონენტო (სამომხმარებლო) სადგურებიდან მიღებულ ინფორმაციას მობილური კავშირის კომუტაციის ცენტრების (Mobile Services Switching Center – MSC - მობილური კავშირის ქსელებში) ან ურთიერთქმედების ფუნქციონალური კვანძების (Interworking Function Mode – IWFN - ფართოზოლოვანი შეღწევის ქსელებში) გავლით გადასცემენ სატრანსპორტო ქსელს (და პირიქით).

კომუტაციის ცენტრები და ურთიერთქმედების კვანძები უზრუნველყოფენ შეტყობინებების ტრანსპორტირებას მისამართების მიხედვით, მონაცემების ნაკადების მართვას, ქსელის ბილინგის ელემენტებთან ურთიერთქმედებას, აგრეთვე მომხმარებლების შეღწევას შიდასაქსელო მომსახურებებთან.

კვანძების მობილურობის ფაქტორი წარმოადგენს იმის საფუძველს, რომ ქსელი მიკუთვნებულ იქნას სამიდან ერთ-ერთ ნაირსახეობას: ფიქსირებული კავშირის (შეღწევის) ქსელები, გადაადგილებადი შეღწევის ქსელები და მობილური კავშირის ქსელები (მობილური შეღწევის). ყველა ამ ნაირსახეობისათვის

დამახასიათებელია მცირე ზომების მომსახურების ტერიტორიალური ზონები და ერთიანი სატრანსპორტო ქსელი მათი ურთიერთკავშირის უზრუნველსაყოფად. BWN მობილური კავშირის ძირითადი მნიშვნელოვანი განსხვავება ფიქსირებული ქსელებისაგან მდგომარეობს იმაში, რომ აუცილებელია უზრუნველყოფილი იქნას უწყვეტი კავშირი აბონენტთან მისი მომსახურების ერთი ზონიდან მეორეში გადაადგილების დროს.

ფიჭური კავშირის თანამედროვე ქსელების არქიტექტურა და ფუნქციური შესაძლებლობები საშუალებას აძლევს აბონენტს გადაადგილდეს მომსახურებით დაფარვის ზონაში სიჩქარით (5-120) კმ/სთ, კავშირის სეანსის შეწყვეტის გარეშე.

მობილური კავშირის უწყვეტობა აბონენტის ერთი ფიჭიდან მეორეში გადაადგილების დროს მიიღწევა აბონენტის სატრანსპორტო ქსელთან მიერთების წერტილის ცვლილებით, ორი ტიპის კომუტაციური პროცესებით:

- ✓ ჰენდოვერი (Handover), რომელიც შეესაბამება სააბონენტო სადგურის გადაადგილებას მეზობელი სადგურების საზღვრების გავლით; ამ გადაადგილების დროს ხდება შედწევის საბაზო სადგურის შეცვლა;
- ✓ როუმინგი, შეესაბამება სააბონენტო სადგურის გადაადგილებას ორი ისეთი მომსახურების ტერიტორიის საზღვრის გავლით, რომლებსაც ემსახურება სხვადასხვა MSC ან ურთიერთქმედების კვანძი (IWF).

სააბონენტო სადგურების რადიორხებთან შედწევის რადიოინტერფეისების თავისებურებები განსაზღვრავენ ქსელური რესურსების გამოყენებისა და საბაზო სადგურებსა და სააბონენტო სადგურებს შორის შეტყობინებების მიმოცვლის წესს. ეს ყველაფერი კი შეადგენს მრავალჯერადი შედწევის ტექნოლოგიას.

ფიჭური კავშირის ძირითადი მიზნობრივი ფუნქცია - “კავშირი ნებისმიერ დროს და ნებისმიერ ადგილას” განსაზღვრავს მრავალჯერადი შედწევის ისეთი მეთოდების გამოყენებას, როგორებიცაა FDMA (Frequency Division Multiple Access – მრავალჯერადი შედწევა სიხშირული დაყოფით), TDMA (Time Division Multiple Access –

მრავალჯერადი შეღწევა დროითი დაყოფით) და CDMA (Code Division Multiple Access – მრავალჯერადი შეღწევა კოდური დაყოფით). ეს მეთოდები დამახასიათებელია კონტროლირებადი შეღწევის ქსელებისათვის.

BWA ქსელებში მრავალი სადგურის მიერ რესურსის ერთობლივი გამოყენება ხორციელდება სხვა მიზნობრივ ფუნქციასთან შესაბამისობით: “ქსელის კვანძების კავშირში შესვლის უზრუნველყოფა ნებისმიერ დროს, წარმოქმნილი მოთხოვნების შესაბამისად“, რაც გულისხმობს ქსელის მხრიდან სააბონენტო მოწყობილობის მუდმივი კონტროლის არარსებობას, და აბონენტების ქსელში ჩართვას აუცილებლობის შემთხვევაში. ასეთ ქსელებში უმეტესად გამოიყენება მრავალჯერადი შეღწევის შეჯიბრებითი მეთოდები, ისეთი როგორცაა DAMA (Demand Assigned Multiple Access – მრავალჯერადი შეღწევა მოთხოვნისგანაწილების მიხედვით), CSMA (Carrier Sense Multiple Access – მრავალჯერადი შეღწევა გადამტანის კონტროლით) და სხვ.

BWA ტექნოლოგიებში მრავალჯერადი შეღწევის მეთოდების ზოგად თავისებურებას წარმოადგენს ქსელის კვანძების ერთობლივი მუშაობის უზრუნველყოფისადმი ორი მიდგომის გამოყენება:

- ✓ შეტყობინებების გადაცემის განმავლობაში კვანძის მიერ არსთან ერთპიროვნული შეღწევა, კავშირის არსების დაკავებულების წინასწარი ტესტირების შედეგებიდან გამომდინარე (Carrier Sense Multiple Access - CSMA); შეტყობინებების გადაცემა ხორციელდება მაშინ, როდესაც ტესტირება გამოავლენს არსის დაუკავებლობას. ეს მეთოდი არ გამორიცხავს ურთიერთხელშეშლებს (კვანძებმა შეიძლება ტესტირება დაიწყონ ერთდროულად ან გარკვეული დროითი დაძვრით და აღმოაჩინონ არსის დაუკავებლობა და დაიწყონ გადაცემა). მაგრამ მეთოდი მნიშვნელოვნად ამცირებს ურთიერთხელშეშლების ალბათობას ტესტირების მეთოდის გამოყენებლების მეთოდებთან შედარებით.
- ✓ არსთან რამდენიმე კვანძის ერთობლივი შეღწევა. ამ შემთხვევაში გამოიყენება ორთოგონალური სიგნალების ერთობლიობა (მაგ. ორთოგონალური სიხშირეების მიხედვით, რაც რეალიზებულია

ტექნოლოგიაში OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiple Access).

მეზობელ ფიჭებში სააბონენტო და საბაზო სადგურებს შორის ელექტრომაგნიტური შეთავსებადობა უზრუნველყოფილია სხვადასხვა ფიჭების არხების სიხშირული განცალკევებით. სიხშირეთა განმეორებითი გამოყენების (*Frequency reuse*) შესაძლებლობა მიღწეულია ფიჭების ტერიტორიული განცალკევებით, რომლებიც გამოიყენებენ ერთი და იგივე სიხშირულ არხებს.

12. BWN ქსელების ტექნოლოგიების ევოლუცია

12.1. ფიჭური კავშირის ქსელების ტექნოლოგიების ევოლუცია

დღისათვის ფიჭური კავშირი ყველაზე მეტადაა გავრცელებული მობილური კავშირების ყველა სახეებს შორის, ამიტომ ჩვეულებრივად მობილურ ტელეფონს უწოდებენ უბრალოდ ფიჭურ ტელეფონს, თუმცა მობილურ ტელეფონებს, გარდა ფიჭურისა, წარმოადგენენ თანამგზავრული ტელეფონები, რადიოტელეფონები და მაგისტრალური კავშირის აპარატები.

თანამედროვე მობილური ტელეფონი – ეს არა მარტო მოწყობილობაა კავშირგაბმულობისათვის, როგორც ის იყო მისი შექმნის საწყის ეტაპზე. დღეს ის პრაქტიკულად წარმოადგენს მრავალფუნქციურ სისტემას, რომელშიც გაერთიანებულია მოწყობილობათა დიდი რაოდენობა. თანამედროვე ტელეფონის საშუალებით შესაძლებელია შეტყობინებათა გაგზავნა, გადაღებული და გადაცემული იქნას საკმაოდ მაღალ ხარისხის ფოტოსურათები, მოვისმინოთ მუსიკა, ვნახოთ ფილმები, წავიკითხოთ ელექტრონული წიგნები, ვიმუშაოთ ინტერნეტქსელში. და რაც ძალიან მნიშვნელოვანია, მობილური ტელეფონის საშუალებით შეიძლება განხორციელებულ იქნას საბანკო ანგარიშსწორება და გადასახადები, ანუ მობილური ტელეფონი გამოყენებულ იქნას როგორც საგადასახადო ტერმინალი.

რადიოსატელეფონო კავშირის პირველმა სისტემამ, რომელიც სთავაზობდა მომსახურებას ყველა მსურველს, ფუნქციონირება დაიწყო 1946 წ-ს სენტ-ლუისში (აშშ) [17]. მაგრამ მასზე გაზრდილ

მოთხოვნილებასთან ერთად წარმოიქმნა პრობლემები. მათ შორის მთავარს წარმოადგენდა სისშირული რესურსის შეზღუდულობა: ფიქსირებული სისშირეების რაოდენობა გარკვეულ სისშირულ დიაპაზონში არ შეიძლება უსაზღვროდ გაიზარდოს, ამიტომ რადიოტელეფონები ერთმანეთთან ახლო მუშა სისშირული არხებით წარმოქმნიან ურთიერთ ხელშეშლებს.

ამ პრობლემის გადაწყვეტა აპარატულ დონეზე შესაძლებელი გახდა მხოლოდ 70-ან წლებში, როდესაც შესაძლებელი გახდა ერთი და იგივე სისშირის განმეორებით გამოყენება ურთიერთ ხელშეშლების გარეშე სხვა ფიჭაში (ინგ. *cell* – უჯრედი, ფიჭა). აქედან წარმოიშვა დასახელება “ფიჭური კავშირი“. ფიჭური კავშირის პრინციპების განვითარება მიმდინარეობდა მსოფლიოს სხვადასხვა ქვეყნებში სხვადასხვა მიმართულებით.

ფიჭური კავშირის ტექნოლოგიების განვითარება, როგორც წესი, დაკავშირებულია სისტემის ყველა შემადგენლის ცვლილებასთან, კერძოდ იცვლება მიწოდებული მომსახურების სახეები, ქსელის სტრუქტურული კომპონენტების შესაძლებლობები, ქსელური არქიტექტურა და სხვ.

განვითარების პროცესის მიხედვით არჩევენ ოთხ თაობას (ეტაპს):

I-თაობა (I Generation - 1G) - XX-საუკუნის 80-იანი წლები;

II-თაობა (II Generation - 2G) - XX-საუკუნის 90-იანი წლები და XXI-საუკუნის დასაწყისი;

III-თაობა (III Generation - 3G) - XXI-საუკუნის დასაწყისი, დასრულების პერსპექტივით XXI საუკუნის 20-იანი წლების დასაწყისში.

IV-თაობა (IV Generation - 4G) - მიეკუთვნება ახლანდელ (მიმდინარე) პერიოდს, დასრულების პერსპექტივით XXI საუკუნის 30-იანი წლების დასაწყისში.

ჩამოთვლილ თაობებს წინ უსწრებდა მობილური კავშირის წინა ისტორია, რომელსაც ნულოვან თაობასაც უწოდებდნენ (0G). მობილური კავშირის იდეებს საფუძველი ჩაეყარა XX საუკუნის 40-50 წ.წ., მაგრამ ტექნიკური რეალიზაცია შეუძლებელი იყო მეარტანიანი მიკროელექტრონული ბაზის შექმნამდე (80-იანი წლების დასაწყისამდე). მობილური კავშირის განვითარების არხებით ფაქტორს წარმოადგენენ

საკითხები, დაკავშირებული რადიოსიხშირული რესურსების გამოყოფასთან ექსპერიმენტული და კომერციული მოხმარებისათვის. მობილური კავშირის განვითარების ქრონოლოგია მოყვანილია ცხრ. 1.1.

1G ქსელებში აბონენტებისადმი მიწოდებული მომსახურებები შემოიფარგლებოდა მხოლოდ ბგერითი (სატელეფონო) შეტყობინებებით. გამოყენებული სისტემების ტიპის მიხედვით, თითოეულ ფიჭას მიეკუთვნებოდა რამდენიმე ათეული სიხშირული არხი გატარების ზოლით 25-30 კჰც, რომლებზეც შეტყობინებების გადაცემა ხდებოდა ანალოგური მეთოდებით. მრავალჯერადი შეღწევა რეალიზებული იყო არხების სიხშირული დაყოფის მეთოდით - FDMA. მობილური კავშირის გამოყენება დაიწყო 1981 წელს, კომერციულ ექსპლუატაციაში სატელეფონო მობილური კავშირის გაუმჯობესებული სისტემის (Advanced Mobile Phone System-AMPS) გაშვებით (აშშ). შემდეგ ჩრდილოეთ ევროპის ქვეყნებში (შვეცია, ნორვეგია, დანია და ირლანდია) დაინერგა სისტემა NMT-450 (Nordic Mobile Telephone).

კავშირგაბმულობისა და სიგნალების დამუშავების სფეროებში უახლესი ტექნოლოგიებისა და სამეცნიერო აღმოჩენების გამოყენებამ 80-იანი წლების ბოლოსათვის შესაძლებელი გახადა ფიჭური კავშირის განვითარების – მეორე თაობის სისტემების შექმნა, რომელიც ეყრდნობოდა სიგნალების დამუშავების ციფრულ მეთოდებს.

2G სისტემებს მიეკუთვნება ის სისტემები, რომლებიც უზრუნველყოფენ ბგერითი შეტყობინებებისა და დაბალი სიჩქარის მონაცემების ნაკადების გადაცემას ციფრული რადიოსიგნალებით. სიხშირულ არხებთან შეღწევის ტიპიურ ხერხს 2G სისტემებში წარმოადგენს მრავალჯერადი შეღწევა დროითი დაყოფით - TDMA [21].

ასეთ სისტემებს მიეკუთვნებიან:

- ✓ Global System for Mobile Communication (GSM) - ყველაზე გავრცელებული მეორე თაობის (2G) სისტემა. იგი გამოიყენება მსოფლიოს 200-ზე მეტ ქვეყანაში. მისი შექმნა დაიწყო (ევროპაში) 1989 წ., ხოლო კომერციული ექსპლუატაცია – 1991 წ. GSM არხების სიხშირული ზოლის სიგანე შეადგენს 200 კჰც.

ფიჭური მობილური კავშირის სისტემების ევოლუცია

სისტემა	წელი	სისტემის მოკლე დახასიათება
1	2	3
თაობა 0G		
MTS	1946	მობილური სატელეფონო კავშირი (Mobile Telephone Service). ნახევრად დუბლექსური რადიოკავშირის საოპერაციო კლასის სისტემა PSTN-ში ჩართვის შესაძლებლობებით (25 არხი, სიხშირე 150 მგჰც).
AMTS	1965	გაუმჯობესებული MTS (Advanted MTS). ნახევრადდუბლექსური რადიოკავშირის პორტატიული სისტემა, გამოიყენებოდა იაპონიაში, სიხშირული დიაპაზონი 900 მგჰც.
IMTS	1969	მობილური სატელეფონო კავშირის გაუმჯობესებული სისტემა (Improved MTS)-ნახევრადდუბლექსური კავშირის ორდიაპაზონიანი სისტემა PSTN-ზე გასვლით. (9 არხი დიაპაზონში 35-44 მგჰც, 11 არხი დიაპაზონში 152-158 მგჰც და 12 არხი დიაპაზონში 454-460 მგჰც. მომსახურების ზონის რადიუსი 60-100 კმ.
თაობა 0.5 G		
PALM	1971	Public Automated Land Mobile - მობილური კავშირის ავტომატიზირებული მიწისპირა ქსელი PSTN-ზე გასვლით. პირველი ციფრული სისტემა მმართველი შეტყობინებებისა და ანალოგური ბეგერითი სიგნალების გადასაცემად.
ARD	1971	AutoRadiioPulehin - საავტომობილო ნახევრადდუბლექსური (შემდგომში დუბლექსური) კავშირის სისტემა, საოპერაციო კლასის, მომსახურების ზონით 30 კმ-მდე, 80 არხი დიაპაზონში 150 მგჰც.
თაობა 1G		
NMT	1979	Nordic Mobile Telephone – სკანდინავიური ორდიაპაზონიანი მობილური სატელეფონო კავშირის სისტემა, საოპერაციო კლასის, დიდი ზომების ტერიტორიების დასაფარავად, 450 და 900 მგჰც.
AMPS	1981	Advented Mobile Telephone System – მობილური კავშირის გაუმჯობესებული სისტემა სიხშირულ დიაპაზონში 825-890 მგჰც (600 არხი, არხის სიგანე 30 მგჰც, საბაზო სადგურის სიმძლავრე - 45 ვტ, საავტომობილო გადასატანი სადგურის -12 ვტ, გადასატანი აპარატის -1 ვტ).
TACS	1983	Total Aaccess Communication System - საერთო სარგებლობის ანალოგური რადიოკავშირის სისტემა დიაპაზონში 900 მგჰც (APS-ის ევროპული ვერსია).
Mobitex	1983	მონაცემების უგამტარო გადაცემის საერთოშედწევადი რადიოკავშირის ქსელი - მონაცემების გადაცემა საერთო შედწევით, ორმხრივი პეიჯერული კავშირის ქსელური სამსახურით, GMSK-მოდულაციით.
Data Tac	1990	მონაცემების უგამტარო გადაცემის ორდიაპაზონიანი სისტემა, Mobitel-ის ტიპის, არხის სიგანე 25 კჰც, სიხშირეების დიაპაზონი 403-433 მგჰც და 806-870 მგჰც, გამტარუნარიანობა 19,2 კბიტ/წმ.

ცხრილი 1.1. (გაგრძელება)

1	2	3
		თაობა 2G
PHS	1990	Personal Handy-phone System - იაპონური რადიოკავშირის სისტემა პორტატიული ტელეფონებით, TDMA-TDD, სიხშირული დიაპაზონი 1880-1930 მგჰც, მონაცემების გადაცემის სიჩქარე 32 კბიტ/წმ.
GSM	1991	Global System for Mobile communications - ფიჭური მობილური კავშირის ოთხდიაპაზონიანი სისტემა (FDMA-TDMA), 850, 900, 1800, 1900 მგჰც, MSK მოდულაცია, არხის სიგანე 200 კჰც.
Digitel AMPS	1991	AMPS-ის ციფრული ვარიანტი, FDMA, სიხშირული დიაპაზონი 825-890 მგჰც, მოდულაცია $\pi/4$ -DQPSK, არხის სიგანე 30 კჰც.
PDC	1992	Personal Digital Cellular - პერსონალური ციფრული ფიჭური კავშირის სტანდარტი, TDMA, სიხშირული დიაპაზონი 800 მგჰც, არხის სიგანე 25 კჰც, გამოიყენება მხოლოდ იაპონიაში.
cdmaOne	1995	პირველი სისტემა CDMA-შედწევით, სპექტრის პირდაპირი გაფართოებით, ცნობილია ასევე როგორც სტანდარტი IS-95 ან TIA-EIA-95. სიხშირული დიაპაზონი 800 მგჰც, არხის სიგანე 1,25 მგჰც. მოდულაცია BPSK/QPSK.
CSD	1997	Circuil Switched Data - ტექნოლოგია მონაცემების გადაცემისათვის არხების კომუტაციით, დასაწყისში დამუშავებული GSM-სათვის.
		თაობა G 2,5
WIDEN	1996	Wideband Integrated Dispach Enhanced Network - ფართოზოლოგანი ინტეგრირებული გაუმჯობესებული დისპეტჩერული ქსელი (4 არხი სიგანით 25 კჰც, გამტარუნარიანობა 100 კბიტ/წმ).
GPRS	2000	General Pocket Radio System - მონაცემების პაკეტური გადაცემის გაუმჯობესებული სისტემა GSM-თვის (სიხშირული ზოლი 200 კჰც, მაქსიმალური გამტარუნარიანობა 171,2 კბიტ/წმ).
HSCSD	2000	High-Speed Circuit Switched Data - მონაცემების მაღალსიჩქარიანი გადაცემის გაუმჯობესებული სისტემა არხების კომუტაციით, თავსებადი GSM-თან. გადაცემის მაქსიმალური სიჩქარე 5,6 კბიტ/წმ (ხარისხი მაღალი, ვიდრე GPRS).
		თაობა 2,75 G
cdma 2000	2000	Cdma One სტანდარტის 3G ევოლუციური ვარიანტი (გადაცემის სიჩქარე გაზრდილია 2,4 მგბიტ/წმ-მდე, დღისათვის გააჩნია რამდენიმე ვარიანტი (რელიზი).
EDGE	2003	Eduanced Data rates for GSM-evolution - მონაცემების გადაცემის გაუმჯობესებული ციფრული ტექნოლოგია GSM მობილური კავშირისათვის (TDMA, 8 - PSK მოდულაცია, მონაცემების გადაცემის მაქსიმალური სიჩქარე 384 კბიტ/წმ-მდე, არხის სიგანე 200 კჰც).

ცხრილი 1.1. (გაგრძელება)

1	2	3
		თაობა 3 G
UMTS	1999	Universal Mobile Telecommunication System – WCDMA ტექნოლოგიის მობილური კავშირის უნივერსალური სისტემა (სისშირეების დიაპაზონი 850, 1900, 2100 მგჰც, არხის სიგანე 5 მგჰც, მონაცემების გადაცემის სიჩქარე 2,0 მგბიტ/წმ-მდე).
1xEV-DO	2000	cdma2000-ის გაუმჯობესებული ვერსია (IS-856) (გადაცემის მაქსიმალური სიჩქარე მიმართულებით “ქვევით” - 307 კბიტ/წმ, მიმართულებით “ზევით” - 153 კბიტ/წმ).
FOMA	2001	Freedom of Mobile Multimedia Access – პირველი W-CDMA 3G მომსახურება იაპონური სავაჭრო მარკით NTT DoCoMo (W-CDMA/FDD, სისშირული დიაპაზონები 1920-1980 მგჰც, 2110-2170 მგჰც).
GAN/UNA	2006	Generic Access Network - საერთო შეღწევის ქსელი, რომელსაც ადრე უწოდებდნენ ახალი ლიცენზირებულ მობილური შეღწევის სისტემას. იგი უზრუნველყოფს GSM და GPRS მობილურ მომსახურებებს არალიცენზირებულ სისშირულ დიაპაზონებში.
		თაობა 3,5 G
HSDPA	2006	High Speed Downlink Packet Access - მონაცემების მაღალსიჩქარიანი პაკეტური გადაცემის გაუმჯობესებული ტექნოლოგია W-CDMA სისტემებისათვის, გადაცემის მიმართულებისათვის “ქვევით”. გადაცემის სიჩქარე 14,4 მგბიტ/წმ-მდე.
		თაობა 3.75 G
HSUPA	2007	High Speed Uplink Packet Access - მონაცემების გადაცემის მაღალსიჩქარიანი პაკეტური გადაცემის გაუმჯობესებული ტექნოლოგია W-CDMA სისტემებისათვის, გადაცემის მიმართულებით, “ზევით” გადაცემის სიჩქარე 5,76 მგბიტ/წმ-მდე
		თაობა 4 G
ახალი ტექნოლოგიების ფართო გამოყენება – MIMO, MultiCarrier CDMA - (MC-CDMA), OFDMA, UWB და პროგრამულად რეკონფიგურირებადი რადიო (Software Defined Radio).		

- ✓ ციფრული AMPS (Digital AMPS - AMPS). მისი დამუშავება დაიწყო 1981 წ. აშშ-ში, 1G ანალოგიური AMPS-ის გასაუმჯობესებლად. D-AMPS-ის კომერციული ექსპლუატაცია დაიწყო 1990 წ. სისშირული ზოლის სიგანე შეადგენს 30 კჰც. AMPS სისტემებმა შეცვალა იაპონიაში და აშშ-ში ფართოდ გავრცელებული AMDS-სისტემები.

2G-ს მიაკუთვნებენ ასევე არხების კოდური დაყოფის პრინციპით მომუშავე პირველ სისტემას CDMA, (აშშ). ამ სისტემამ პირველი

ტესტური გამოცდა გაიარა 1989 წ., ხოლო კომერციულ ექსპლუატაციაში შევიდა 1995 წ. მიწოდებული მომსახურების ჩამონათვალთა და გადაცემის სიჩქარის მიხედვით IS-95 შეესაბამება 2G-ს, მაგრამ მასში გამოყენებული მრავალჯერადი შეღწევის მეთოდი ფართოდ გამოიყენება შემდგომი თაობის (3G) სისტემაში. ამავე დროს 2G-ს “ეპოქაში” CDMA გამოიყენებოდა მომხმარებლების მხოლოდ 1%-ის მიერ (ეს აქცენტირებულია CDMA-ს მეორე თაობის პირობით დასახელებაში cdmaOne) [22].

GSM ქსელის შესაძლებლობები მონაცემების გადაცემა/მიღების მხრივ ერთობ შეზღუდულია: GSM სისტემაში გამოიყენება არხების დროითი გაყოფის პრინციპი მრავალჯერადი შეღწევით TDMA. ეს ნიშნავს, რომ ერთ 200 კჰც სიგანის ვიწროხოლოვან არხში, ერთდროულად მოთავსებულია კავშირის რამდენიმე მონაწილე, ინფორმაცია (როგორც ბგერა, ისე SMS) გადაიცემა მოკლე პაკეტებით და ერთ ნაკადში შეიძლება “შერეულად” გადაიცეს კავშირის სენსის სხვადასხვა მონაწილის პაკეტები დროითი დაყოფით. ეს არის ფუნდამენტალური შეზღუდვა, რომელიც დაკავშირებულია GSM ქსელების ფუნქციონირების პრინციპებთან და მათი გაუმჯობესება არსებულ ქსელებთან და სამსახურებთან შეთავსებადობის დაკარგვის გარეშე შეუძლებელია. უფრო მარტივია აიგოს ახალი ქსელი თანამედროვე მოთხოვნების მიხედვით.

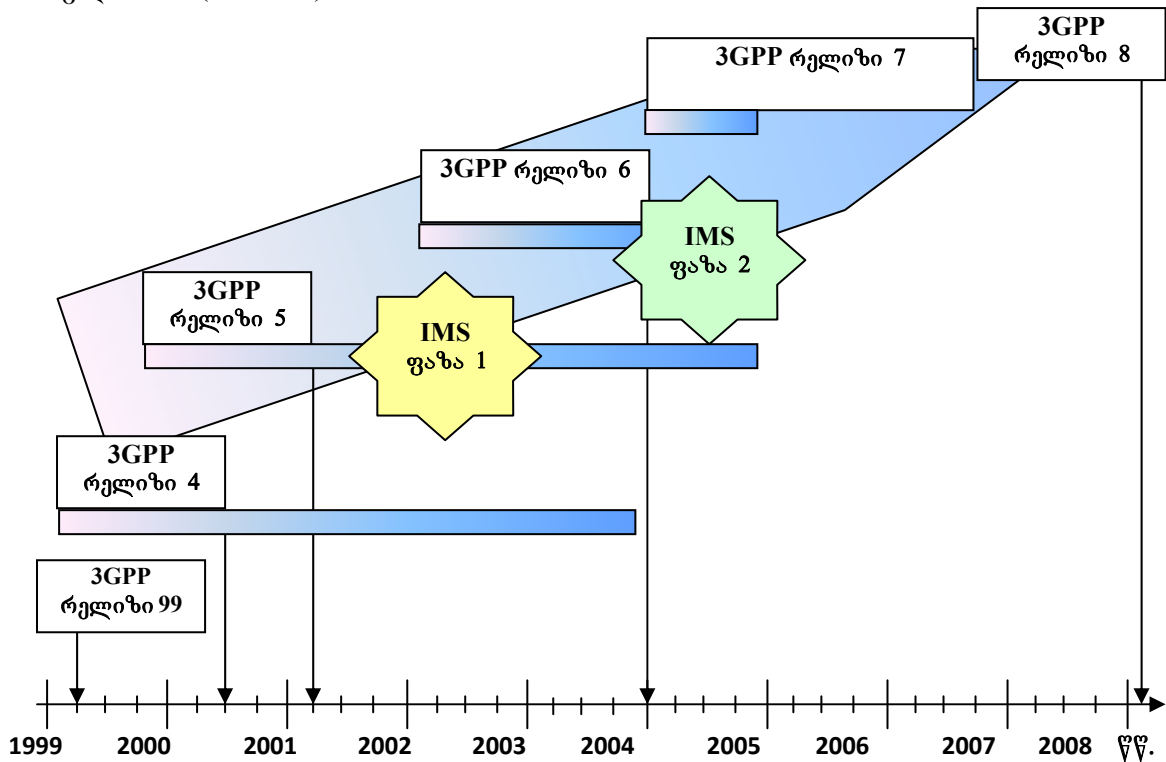
ამ პრინციპიდან გამომდინარე 1999 წელს დაიწყო სამუშაოები 3G თაობის ქსელებზე. 3G სტანდარტი შემუშავებულია ელექტროკავშირგაბმულობის საერთაშორისო კავშირის (International Telecommunication Union, ITU) მიერ და ეწოდება IMT-2000 (International Mobile Telecommunications 2000). IMT-2000 სტანდარტის თანახმად მესამე თაობის მობილური კავშირის ქვეშ იგულისხმება ინტეგრირებული ქსელი, რომელიც უზრუნველყოფს მონაცემების გადაცემის შემდეგ სიჩქარეებს: მაღალი მობილურობის აბონენტებისათვის (120 კმ/სთ-მდე) – არანაკლებ 144 კბიტ/წმ, დაბალი მობილურობის (3 კმ/სთ-მდე) აბონენტებისათვის – 384 კბიტ/წმ, უძრავი აბონენტებისათვის მოკლე მანძილზე – 2,048 მგბიტ/წმ [23].

მესამე თაობის მობილური ქსელები აიგება მონაცემების პაკეტური გადაცემის საფუძველზე. 3G მუშაობს დეციმეტრული დიაპაზონის სიხშირეებზე, როგორც წესი 2 გგჰც-ს ფარგლებში. 3G ქსელებში უზრუნველყოფილია ორი საბაზო მომსახურების მიწოდება: მონაცემების გადაცემა და ბგერითი ინფორმაციის გადაცემა. ისინი საშუალებას იძლევიან ორგანიზებულ იქნას ვიდეოსატელეფონო კავშირი, მობილური ტელეფონებით ფილმებისა და ტელეპროგრამების მიღება და ა.შ. მსოფლიოში ყველაზე მეტად გავრცელებულია ორი სტანდარტი: UMTS და CDMA 2000 [24, 25].

UMTS ტექნოლოგია (Universal Mobile Telecommunications System — მობილური ელექტროკავშირის უნივერსალური სისტემა) შექმნილია GSM (ევროპული სტანდარტის ფიჭური კავშირის) მეორე თაობის ქსელების მოდერნიზაციის მიზნით, და ფართოდ განვითარდა არა მარტო ევროპაში, არამედ მსოფლიოს სხვა რეგიონებშიც. UMTS-ის სტანდარტიზაციის სამუშაოებს კოორდინაციას უწევს 3GPP (Third Generation Partnership Project - 3G საპარტნიორო პროექტი). UMTS ტექნოლოგიაში უზრუნველყოფილია ქსელის თითოეული აბონენტისათვის უფრო ფართო არხის გამოყოფა: GSM-გან განსხვავებით, UMTS ქსელი თითოეული ტელეფონისათვის სამუშაოდ გამოყოფს 5 მგჰც სიგანის არხს. სტანდარტის სპეციფიკაციის თანახმად, UMTS გამოიყენებს სიხშირეთა შემდეგ სპექტრს: 1885 მგჰც — 2025 მგჰც მონაცემების გადასაცემად რეჟიმში “მობილური ტერმინალიდან საბაზო სადგურისაკენ – uplink” და 2110 მგჰც — 2200 მგჰც – მონაცემების გადასაცემად რეჟიმში “საბაზო სადგურიდან ტერმინალისაკენ - downlink“ [26, 27].

3GPP მუშა ჯგუფი გეგმავდა UMTS სისტემისათვის გამოეცა ტექნიკური სპეციფიკაციების (რელიზების) რეგულარული კრებულები, რომლებშიც ასახული იქნებოდა 3GPP მუშა ჯგუფების კვლევებისა და ტექნიკური წინადადებების დასკვნითი შედეგები UMTS ქსელის სხვადასხვა ფუნქციონალური მიმართულებებისა და ქვესისტემებისათვის [28].

UMTS სტანდარტის განვითარება ასახული იყო რამდენიმე რელიზში (ნახ. 1.2).



ნახ. 1.2. UMTS სტანდარტის რელიზების გამოქვეყნების ქრონოლოგია

GSM სტანდარტის გაუმჯობესება დაკავშირებულია EDGE ტექნოლოგიის (GSM/EDGE Radio Access Network) გამოყენებისთან რადიოშელწევის ქსელებში GERAN ტექნოლოგიასთან ერთად, რომელიც განიხილება როგორც 2G სისტემის განვითარების ალტერნატივა 3G სისტემის პარალელურად.

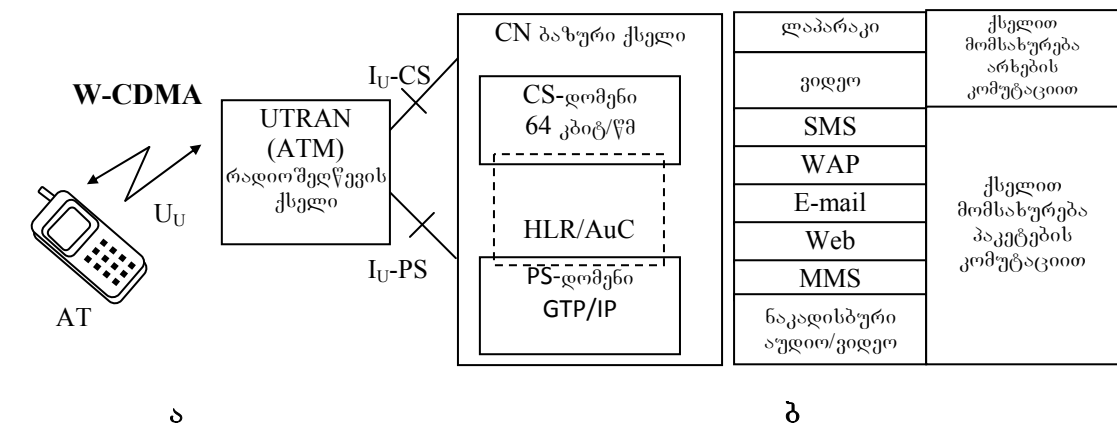
UMTS-ის GSM-დან ძირითად განსხვავებას წარმოადგენს მონაცემების გადაცემის საეთერო სივრცის აგება GERAN-ის საერთო რადიოშელწევის ქსელის პრინციპებით. ეს საშუალებას იძლევა განხორციელებულ იქნას UMTS-ის შეპირაპირება ინტეგრალური მომსახურების ციფრულ ქსელებთან ISDN, Internet ქსელთან, GSM ქსელებთან და სხვა UMTS ქსელებთან [29].

რელიზი 99 იყო პირველი დაგეგმილი კრებულებიდან, რომლის მომზადება დასრულდა 1999 წლის ბოლოს.

რელიზი 99. ამ რელიზში UTRAN რადიოშელწევის ქსელის ელემენტებს შორის სატრანსპორტო ქსელის შესაქმნელად

გამოყენებული იქნა მონაცემების ასინქრონული გადაცემის ტექნოლოგია (ATM- Asynchronous Transfer Mode).

კიდევ ერთი მნიშვნელოვანი მომენტი, სისტემა UMTS დაფუძნებულია დომენებზე, რომლებიც უზრუნველყოფენ საპაკეტო კომუტაციას საბაზო ქსელში (CN - Core Network) ქვესისტემისათვის GPRS და საქსელო დომენებზე, რომლებიც უზრუნველყოფენ არხების კომუტაციას GSM ქსელების უკანასკნელი ვერსიის ქვესისტემებთან მუშაობის დროს (ნახ. 1.3) [30].



- U_U – რადიონტერფეისის მომხმარებლების კავშირისათვის UMTS სისტემასთან
- UTRAN (Universal Terrestrial Radio Access Network) – უნივერსალური საბაზო ბლოკი რადიონტერფეისისათვის ტერიტორიალური დონის UMTS ქსელთან
- ATM (Asynchronous Transfer Mode) – მონაცემების ასინქრონული გადაცემა
- CN (Core Network) – საყრდენი ქსელის ბლოკი
- CS – დომენი არხების კომუტაციით
- PS – დომენი პაკეტების კომუტაციით
- I_U – ინტერფეისი UTRAN-ის CN-თან შესაერთებლად
- HLR (Home Location Register) – ადგილობრივი აბონენტების ადგილსამყოფლის რეგისტრი
- AuC (Authentication Center) – აბონენტთა აუტენტიფიკაციისა და კონტროლის ცენტრი
- GTP (GPRS Tunneling Protocol) – GPRS-ის ტუნელირების პროტოკოლი
- WAP (Wireless Application Protocol) - ინტერნეტის სპეციალურად ადაპტირებულ ვერსიებთან შედეგად
- MMS (Multimedia Messaging Service) - მულტიმედიაური მომსახურება

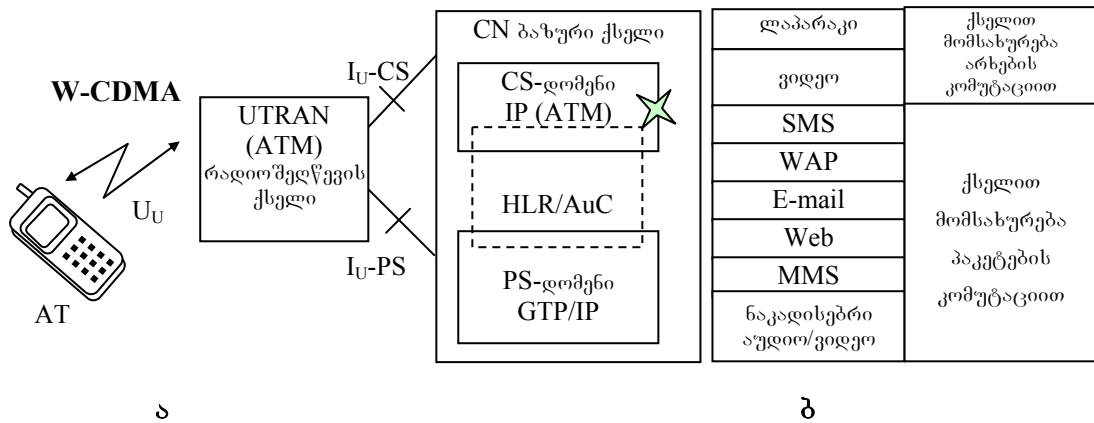
ნახ. 1.3. UMTS სისტემის არქიტექტურა (ა) და მომსახურებები (ბ) რელიზი 99-ის თანახმად

და მესამე მომენტი, მობილური კავშირის ქსელებში ინერგება ბგერის გადაცემის უახლესი ტექნოლოგიური მიღწევა - VoIP (Voice over IP) [31]. W-CDMA ქსელები დაშენდებიან არსებულ GSM ქსელებზე, თანაც ისინი პარალელურად მუშაობენ. სააბონენტო ტერმინალი ავტომატურად გადაირთვება ქსელებს შორის [28, 32].

რელიზი 4. ამ რელიზში ყველაზე მთავარი სიახლე იყო საბაზო სადგურის არხების კომუტაციის (CS - Channel switching) დომენის გადატანა გადაცემის საპაკეტო ტექნოლოგიაზე და საბაზო ქსელის აგება IP, ATM ტექნოლოგიების საფუძველზე (ნახ. 1.4) [33]. ამასთან დაკავშირებით, შემოტანილ იქნა გარემოს რაბები, მართვის ცენტრისა და მოძრავი კავშირის კომუტაციის MSC სერვერი და სიგნალიზაციის რაბი (SGW MGW).

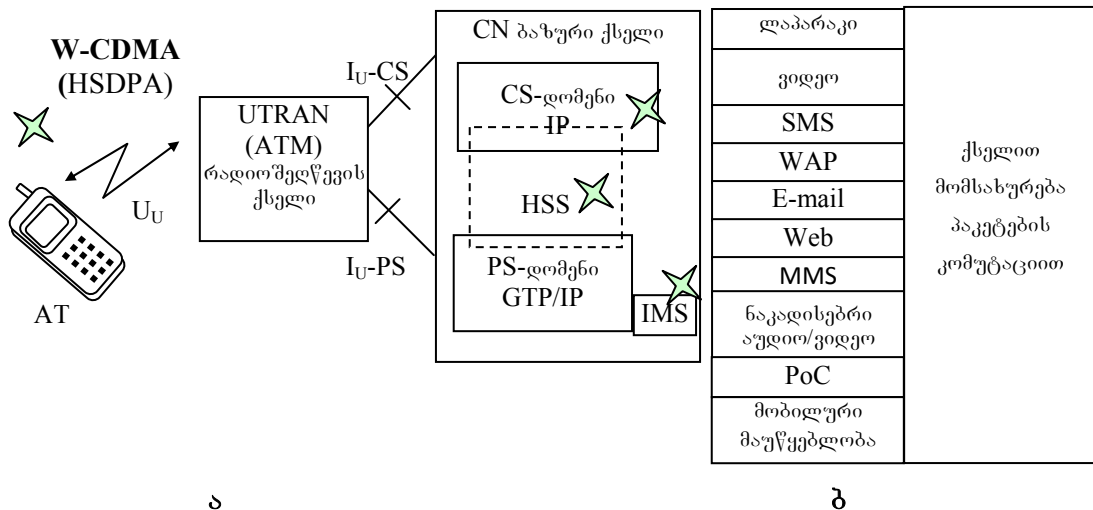
ორგანიზებულ იქნა მონაცემების გაცვლის სამსახურის დამოუკიდებელი არქიტექტურა არხების კომუტაციის დომენისათვის, აგრეთვე ნაკადური აუდიო/ვიდეო მომსახურების გაწევის შესაძლებლობა, MMS და სხვა მულტიმედიაური მომსახურებები. ასეთი მიდგომა საშუალებას იძლევა გამოყენებულ იქნეს უნივერსალური IP ქსელები და შეიქმნას მომსახურების გარემო, კომუტაციის მოწყობილობებისაგან დამოუკიდებლად. ასევე რეალიზებულია მონაცემების მაღალ სიჩქარეებზე გადაცემის უზრუნველყოფა 2 მგბიტ/წმ-მდე. სამუშაოები რელიზ 4-თან დაკავშირებით შეჩერებულ იქნენ 2001 წ. მარტში.

სამუშაოები CDMA 2000 სტანდარტიზაციასთან დაკავშირებით კოორდინირებულია საერთაშორისო ჯგუფის 3GPP2 (Third Generation Partnership Project 2) მიერ. EV-DO (Evolution-Data Only) — მონაცემების გადაცემის ტექნოლოგია გამოიყენება, CDMA 2000 სტანდარტის ფიჭური კავშირების ქსელებში. ტექნოლოგია CDMA 2000 1x EV-DO შექმნილ იქნა ადაპტური მოდულაციის გამოყენებით, რომელიც საშუალებას იძლევა გავზარდოთ არხის გამტარუნარიანობა, მონაცემების გადაცემის სრულყოფილ მიზნით. მონაცემების გადაცემის სიჩქარემ EV-DO rel.0-ში მიაღწია 2,4 მგბიტ/წმ. ამ ტექნოლოგიამ უპირატესი გავრცელება მიიღო ჩრდილოამერიკის კონტინენტზე, აგრეთვე აზია - წყნარი ოკეანის რეგიონში [26, 28, 32].



ნახ. 1.4. UMTS სისტემის არქიტექტურა (ა) და მომსახურებები (ბ) რელიზი 4-ის თანახმად

რელიზი 5. ამ რელიზში CS დომენის არხების კომუტაციისათვის ATM ტექნოლოგია შეცვლილია IP ტექნოლოგიით. CN საბაზო ქსელის შემადგენლობაში ჩართულია ახალი PS დომენი (ნახ. 1.5), რომელსაც ეწოდება (ნახ. 1.5) IMS (IP Multimedia Subsystem) [34].



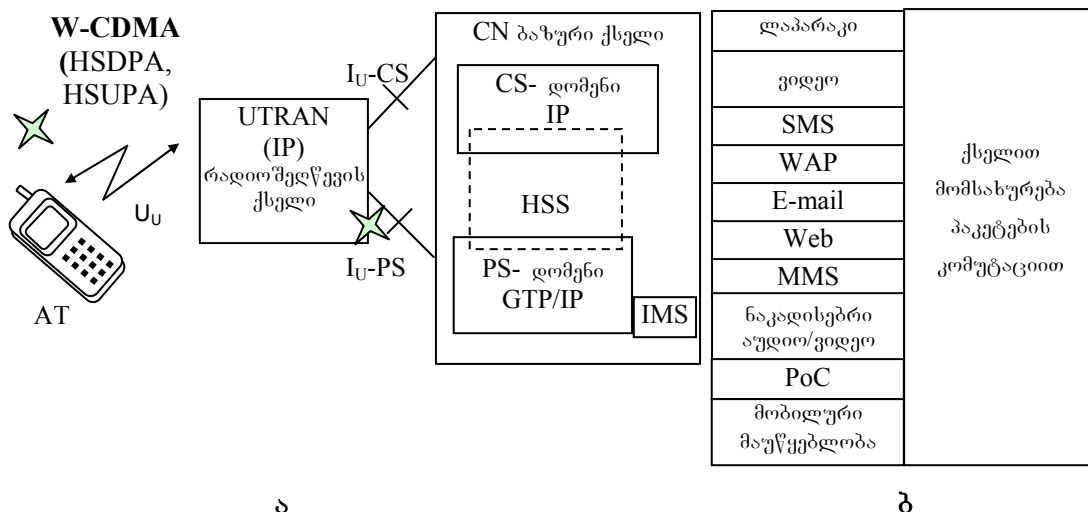
PoC (Push to Talk over Cellular) - სერვისის სახე ფიჭურ კავშირში "დააწეპი და ელაპარაკე"

ნახ. 1.5. UMTS სისტემის არქიტექტურა (ა) და მომსახურებები (ბ) რელიზი 5-ის თანახმად

ამ სიახლეებმა მიგვიყვანეს რეალური დროის ტრაფიკისა და მონაცემების დაყოფილად გადაცემის მეთოდის სრულ უარყოფამდე და ქსელში მომსახურების მიწოდების ერთიან - პაკეტური კომუტაციის პრინციპებზე გადასვლასთან. კიდევ ერთი სიახლე, რომელიც დაკავშირებულია მონაცემთა ბაზის HLR და აუტენტიფიკაციისა და კონტროლის მოწყობილობათა AuC ფუნქციების ინტეგრაციასთან, ადგილობრივი აბონენტების ერთიან სერვერში (Home Subscriber Server –

HSS). ეს სერვერი შეიცავს ინფორმაციას თითოეული აბონენტის შესახებ (გაწერილი ადგილობრივი ქსელის მონაცემთა ბაზაში) გამოძახებებისა და მონაცემების გადაცემის სეანსების მართვისათვის. რელიზ 5-ის ძალიან დიდი მიღწევაა W-CDMA ტექნოლოგიის საფუძველზე მაღალსიხარიანი შეღწევის რეჟიმის დამუშავება ინფორმაციის გადაცემისათვის ხაზში „ქვევით“ (High Speed Downlink Packet Access – HSDPA). რეჟიმმა HSDPA შესაძლებელი გახადა მონაცემების გადაცემის სიჩქარე გაზრდილიყო 10 მგბიტ/წმ-მდე. სამუშაოები რელიზ 5-თან დაკავშირებით შეჩერებულ იქნენ 2002 წ. მარტში [35].

რელიზი 6. ამ რელიზმა რადიოშეღწევის UTRAN ქსელში ATM ტექნოლოგიის ნაცვლად შემოიტანა IP ტექნოლოგია. ამ რელიზში ასევე მიიღო შემდგომი განვითარება HSDPA რეჟიმმა (ნახ. 1.6) და ფორმულირებული იქნა პირველი ფაზის მოთხოვნები მონაცემების მაღალსიხარიანი გადაცემის რეჟიმისათვის ხაზში „ზევით“ HSUPA (High Speed Uplink Packet Access). სამუშაოები რელიზ 6-ის განვითარებასთან დაკავშირებით შეჩერებულ იქნენ 2004 წ. ბოლოსთვის [36].



ნახ. 1.6. UMTS სისტემის არქიტექტურა (ა) და მომსახურებები (ბ) რელიზი 6-ის თანახმად

CDMA 2000 სტანდარტიზაციაში ასევე მოხდა ცვლილებები. მონაცემების გადაცემის სიჩქარემ CDMA 2000 1x EV-DO rev.A მიაღწია 3,1 მგბიტ/წმ.

რელიზი 7. ამ რელიზში შევიდა მრავალსიხვიანი ადაპტური ანტენების გამოყენების საკითხები, რომლებიც დაფუძნებულია MIMO (Multiple Input, Multiple Output – მრავლობითი შესავალი, მრავლობითი გამოსავალი) ტექნოლოგიაზე და გამტარუნარიანობის გაზრდის შესაძლებლობის რადიოქვესისტემებზე. ასევე წარმოდგენილი იყო HSUPA ტექნოლოგიის განვითარების მეორე ფაზა და E-IMS (Enhanced IMS) სრულყოფილი ქვესისტემა. ამ ქვესისტემის დანერგვამ მასთან ფიქსირებული ფართობოლოვანი მონაცემთა გადაცემის ქსელების შეღწევის (Fixed Broadband Access) შესაძლებლობა შექმნა [37, 38]. მართვის მექანიზმისა და მომსახურების გარანტირებული ხარისხის პრინციპის საფუძველზე რგოლში „დამაბოლოებელი მომხმარებელი - დამაბოლოებელი მომხმარებელი“ უზრუნველყოფილ იქნა მომსახურების QoS ხარისხი UMTS ქსელებში, რომლებიც იყენებენ HSDPA/HSUPA/Enhanced IMS ტექნოლოგიას [39, 40, 41].

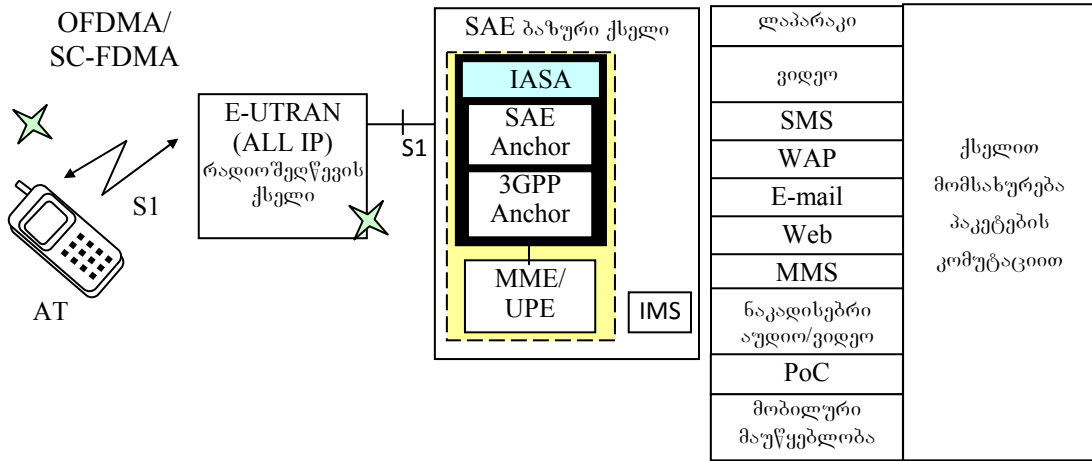
სამუშაოები რელიზ 7-ის განვითარებასთან დაკავშირებით შეჩერებულ იქნენ 2007 წ. შუაში.

რელიზი 8. მოცემული რელიზი ითვლება საბაზოდ LTE (Long-Term Evolution) სისტემისათვის, რომელიც შეიძლება მიეკუთვნოს 3.9G თაობას. ეს სისტემა სრულადა IP-ზეა აგებული (All IP). ამ რელიზშია დაფიქსირებული W-CDMA ტექნოლოგიიდან უფრო პროგრესულ OFDMA ტექნოლოგიაზე გადასვლა. OFDMA ტექნოლოგია (ნახ. 1.7) და SC-FDMA (Single Carrier – Frequency Division Multiple Access, რაც ნიშნავს მრავლობით შეღწევას ერთი გადამტანი სიხშირით) საშუალებას იძლევა გავზარდოთ გამტარუნარიანობა ხაზით „ქვევით“ 100 მგბიტ/წმ-მდე და ხაზით „ზევით“ - 60 მგბიტ/წმ-მდე, ერთ არხით სიხშირული ზოლის სიგანით - 20 მგჰც.

LTE-ში ასევე შესაძლებელი გახდა მონაცემთა პაკეტების გადაცემის დაყოვნების დრო შემცირებულიყო 10 მწმ-მდე შედარებით 80 მწმ-ისა HSDPA ტექნოლოგიაში და გამარტივებულიყო ქსელის არქიტექტურა [42]. არსებული სისტემები 3GPP (GSM და WCDMA/HSPA) და 3GPP2 (CDMA2000 1xRTT, EV-DO) ინტეგრირებულია LTE სისტემასთან

სტანდარტული ინტერფეისის გამოყენების ხარჯზე, რომელიც უზრუნველყოფს ოპტიმიზირებულ მობილურობას [43, 44].

სამუშაოები რელიზ 7-ზე შეწყვეტილ იქნენ 2009 წ. შუაში.



ა

ბ

SAE (System Architecture Evolution)
MME (Mobility Management Entity)

- სისტემური არქიტექტურის ევოლუცია
- მობილურობის მართვის კვანძი

ნახ. 1.7. UMTS სისტემის არქიტექტურა (ა) და მომსახურებები (ბ) რელიზი 8-ის თანახმად

რელიზი 9. LTE ქსელებში გათვალისწინებულია მასობრივი საშიშროების სისტემის მიერ ახალი მომსახურებების მიწოდება. ეს სისტემა გადასცემს განგაშის სიგნალებს მასობრივი საფრთხეების (Public Warning System – PWS) - მიწისძვრის, ცუნამის და სხვა შემთხვევებში, მიაწვდის აბონენტების ადგილსამყოფელის განსაზღვრის მომსახურებას (Location Base Services – LBS), მომსახურებას M2M „მანქანა-მანქანა“ ქსელების საფუძველზე.

რელიზი 10. ფორმულირებულია ძირითადი მოთხოვნები, რომლებიც უნდა დააკმაყოფილოს სრულყოფილმა LTE Advanced სისტემამ. ეს მოთხოვნები ეხება მობილური კავშირების 4G თაობის სტანდარტებს [43]:

- ✓ მონაცემების გადაცემის მაქსიმალური სიჩქარე ხაზში „ქვევით“ 1 გგბიტ/წმ-მდე, ხაზში „ზევით“ - 500 მგბიტ/წმ-მდე;
- ✓ სრული თავსებადობა და ურთიერთკავშირი LTE-თან და 3GPP (GERAN/UMTS) სტანდარტების სხვა სისტემებთან.

ცხრილში 1.2 შეგვიძლია ქრონოლოგიური რიგით დავაკვირდეთ როგორც 3GPP და ასევე 3GPP2 სტანდარტებში მონაცემების გადაცემის სიჩქარეების ზრდას. ბრძოლა მონაცემების გადაცემის სიჩქარეების ზრდისთვის ძირითადად იმისთვის მიმდინარეობს, რომ მობილური კავშირების აბონენტებისათვის შესაძლებელი იყოს ინტერნეტ ქსელებში მაღალსიჩქარიანი შეღწევა, აგრეთვე მათი უზრუნველყოფა მულტიმედიაური მომსახურების ფართო სპექტრით.

ცხრილი 1.2

3G და 4G ტექნოლოგიების მახასიათებლების შედარებითი მონაცემები

ტექნოლოგია	ბაზარზე გამოჩენის წელი	მონაცემების გადაცემის სიჩქარე ხაზით “ქვევით“ (DL)	მონაცემების გადაცემის სიჩქარე ხაზით “ზევით“ (UL)
3G/UMTS/WCDMA (ზოლის სიგანე 5 მგჰც)	2001 წ.	384 კბიტ/წმ	384 კბიტ/წმ
UMTS/HSDPA	2005 წ	7,2 მგბიტ/წმ	384 კბიტ/წმ
UMTS/HSUPA	2007 წ	7,2 მგბიტ/წმ	5,8 მგბიტ/წმ
UMTS/HSPA+	2009 წ	42 მგბიტ/წმ	11,5 მგბიტ/წმ
3G/CDMA 2000 1x (ზოლის სიგანე 1,25 მგჰც)	2000 წ	153 კბიტ/წმ	153 კბიტ/წმ
CDMA 1xEV-DO Rel. 0	2002 წ	2,4 მგბიტ/წმ	153 კბიტ/წმ
CDMA 1xEV-DO Rev.A	2006 წ	3,1 მგბიტ/წმ	1,8 მგბიტ/წმ
4G/LTE/SAE (Rel.8,9) (ზოლის სიგანე 20 მგჰც-მდე)	2011 წ	100 მგბიტ/წმ	58 მგბიტ/წმ
4G/LTE-Advanced (Rel.10)	>2011-2012	1 გგბიტ/წმ	500 მგბიტ/წმ

1.2.2. BWA ქსელების ტექნოლოგიების ევოლუცია

BWA ქსელები გამოჩნდა ორ ათეული წლით გვიან ვიდრე ფიჭური კავშირის ქსელები. ეს იმით აიხსნება, რომ მობილური ტელეფონებისა და პერსონალური კომპიუტერების ფართო გავრცელებამ გამოიწვია სამომხმარებლო მოთხოვნების გაზრდა უგამტარო კავშირებზე, მოკლე მანძილებზე (ერთეული და ათეული მეტრი). BWA-ში გამოყენებული ტერიტორიული ზონების მცირე ზომები და, შესაბამისად, გადასაცემი სიგნალების დაბალი დონეები

შესაძლებლობებს იძლევა სისშირეების განმეორებითი გამოყენებისა ისეთ სისშირულ დიაპაზონებში, რომლებიც განკუთვნილია სამრეწველო, სამეცნიერო და სამედიცინო (Industrial, Scientific, Medical - ISM) გამოყენებისათვის, კერძოდ სისშირულ დიაპაზონში 2,4-2,48 მგჰც [47, 48, 49].

შეტყობინებების გადაცემის სიჩქარე და შესაბამისად, სისშირულ არხების გადაცემის ზოლი, განისაზღვრება ქსელის დანიშნულებით. მაგალითად:

- ✓ ლოკალურ უგამტარო ქსელებში (WLAN), როგორც პერსონალურ კომპიუტერებს შორის სადენიანი ქსელის ალტერნატივაში, მონაცემთა გადაცემისთვის საჭირო სიჩქარე აღწევს რამდენიმე გგბიტ/წმ;
- ✓ პერსონალურ უგამტარო ქსელებში (WPAN), რომლებიც ცვლიან გამტარიან კავშირებს საყოფაცხოვრებო და მულტიმედიური დანიშნულების ხელსაწყოებს შორის, გადაცემის სიჩქარეებია - ათეული კბიტ/წმ-დან აუდიო შეტყობინებებისათვის, ათეულ მგბიტ/წმ-მდე - ვიდეოშეტყობინებებისათვის.

BWA ქსელების რადიოარხების მახასიათებლების მიმოხილვითი მონაცემები (მათ შორის სპექტრალური ეფექტურობა) მოყვანილია ცხრ. 1.3-ში.

ცხრილი 1.3.

ფართოზოლოვანი მოღწევის ქსელების რადიოსისშირული არხების მახასიათებლები

BWA-ს ნაირსახეობა	გამოყენებული ტექნოლოგია	სისშირული დიაპაზონი	გატარების ზოლი, მგჰც	გადაცემის სიჩქარე, მგბიტ/წმ	მაქსიმალური სპექტრალური ეფექტურობა ბიტ/ჰც
WLAN	Wi-Fi	ISM	22	1 . . . 54	2.45
WPAN	Bluetooth	ISM	1	0.7	0.7
	WiMedia	ISM	15	11 . . . 55	3.66
	ZigBee	ISM	2	0.25	0.125
WMAN	WiMax	2 ... 11 გგჰც	20	75	3.75

სადღეისოდ ინტერნეტთან წვდომის და მულტიმედიური მომსახურების მიწოდების თვალსაზრისით ყველაზე პერსპექტიულია: Wi-Fi (Wireless Fidelity) და WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access). ეს ტექნოლოგიები გამოიყენება ინტერნეტთან (მონაცემთა ურთიერთგაცვლის არხთან) მისაერთებლად. მაგრამ, ამის მიუხედავად თითოეული ამ ტექნოლოგიებიდან მიმართულია სრულიად განსხვავებული ამოცანების შესრულებაზე.

IEEE-ში (Institute of Electrical and Electronics Engineers) WLAN სტანდარტები იქმნებოდა 802 კომიტეტის, რომელიც პასუხისმგებელია ლოკალური (LAN) და საქალაქო (MAN) ქსელების სფეროში სტანდარტიზაციაზე (802 LAN/MAN Standards Committee), მუშა ჯგუფის (Work Group – WG) 802.11 მიერ. IEEE კომიტეტის ფარგლებში 802 მუშა ჯგუფი WG 802.11 დაკავებულია WLAN სტანდარტების შემუშავებით, და შესაბამისი სტანდარტები ცნობილია როგორც IEEE 802.11 სტანდარტები. საწყისი (საბაზო) სტანდარტი IEEE 802.11 მიღებულ იქნა 1997 წელს. შემდგომში ის განუწყვეტლივ განიცდიდა გაუმჯობესებას, რასაც შეესაბამება ვერსიები, რომლებსაც ემატებოდა ასოები *a*-დან *x*-მდე [16]. მოკლე ცნობები სტანდარტის ვერსიების შესახებ წარმოდგენილია ცხრილში 1.4

ცხრილი 1.4

IEEE 802.11 სტანდარტის ბაზური ვერსიების ცნობები

სტანდარტის ვერსია	დამტკიცების თარიღი	სიხშირული დიაპაზონი, გჰჰც	მონაცემების გადაცემის სიჩქარე, (max), მგბიტ/წმ	კავშირის სიშორე, მ
802.11, ბაზური (legacy)	1997	2.4	2	-
802.11a	1999	5	54	~30
802.11b	1999	2.4	11	~30
802.11g	2003	2.4	54	~30

Wi-Fi - ეს არის IEEE 802.11 სტანდარტის სარეკლამო სახელწოდება. Wi-Fi სისტემა მოქმედებს მოკლე მანძილებზე, ჩვეულებრივად რამდენიმე ასეულ მეტრზე, ამიტომ ფართოდ გამოიყენება ლოკალურ ქსელებში. ქსელთან წვდომის უზრუნველსაყოფად გამოიყენება სიხშირეთა არალიცენზირებული დიაპაზონი.

უგამტარო ლოკალური კავშირის მოთხოვნადობა (მომხმარებლის თვალსაზრისით) განსაზღვრავს WLAN-ის ადგილს თანამედროვე უგამტარო ტელეკომუნიკაციებში. WLAN-ის უმნიშვნელოვანეს სამომხმარებლო თვისებას, აბონენტთა მოსახერხებელი ურთიერთკავშირის უზრუნველსაყოფასთან ერთად, აბონენტთა სატრანსპორტო ქსელებთან წვდომის უზრუნველყოფა წარმოადგენს. კერძოდ, უკანასკნელით აიხსნება ინგლისურენოვანი ტერმინის “ცხელი წერტილის” (hotspot) გამოყენება, საზოგადოებრივი ადგილებში WLAN-ის გაშლით Internet-ში შესაღწევად [50].

Wi-Fi იყენებს QoS (Quality of Service) მექანიზმს, რომელიც გავს Ethernet-ში გამოყენებულს, რომლის დროსაც პაკეტები იღებენ განსხვავებულ პრიორიტეტებს. ასეთი მიდგომა ყოველი შეერთებისთვის ერთნაირი QoS გარანტიას არ იძლევა [51].

Wireless MAN ქსელები შედარებით ახალი კლასია, რომელიც ძირითადად გამოიყენება სხვადასხვა გეოგრაფიულ ზონებში განლაგებული ქსელების ჯგუფის გამაერთიანებლად ერთ დიდ ქსელში. თავდაპირველად სტანდარტები ორგანიზებული იყო ფიქსირებული ფართოზოლოვანი შედწვევისათვის, შემდგომში შეიქმნა სხვა ვერსიები, მაგალითად, სეანსური და გადაადგილებადი შედწვევის უზრუნველსაყოფად, სულ ბოლოს კი სტანდარტებში გათვალისწინებული იქნა საბოლოო მომხმარებლის მობილურობის ყველა ასპექტი.

ფიქსირებული და სეანსური შედწვევა გულისხმობს, რომ მომხმარებლის მოწყობილობა ქსელის კვანძების მიმართ იმყოფება ერთსა და იმავე ადგილზე მუდმივად, ან უცვლელია კავშირის ერთი სეანსის განმავლობაში. გადაადგილებადი შედწვევის დროს დასაშვებია მომხმარებლის მოწყობილობის გადაადგილება დაბალ სიჩქარით

(10 კმ/სთ-მდე), შეზღუდული ტერიტორიის ფარგლებში, კავშირის სეანსის შეუწყვეტავად. მობილური შედწევა უზრუნველყოფს კავშირს 120 კმ/სთ-მდე სიჩქარით მოძრავი მომხმარებლის მოწყობილობასთან, მომსახურების ესტაფეტურ გადაცემის შესაძლებლობას კავშირის სეანსის შეუწყვეტავად.

მომხმარებლის საბოლოო მოწყობილობის მობილურობის ყველა შესაძლო ვარიანტის დაკმაყოფილების წყალობით. WiMAX-ის განაწილებული ქსელები გახდნენ ფიჭური მობილური კავშირის ქსელების უშუალო კონკურენტები. WiMAX ქსელების დანიშნულებაა შემდეგი ამოცანების გადაწყვეტა:

- ✓ უგამტარო შედწევის უზრუნველყოფა დიდ მანძილებზე და “ბოლო მილის” პრობლემის გადაწყვეტა;
- ✓ ტელეკომუნიკაციური მომსახურების მიწოდება მონაცემების მაღალი სიჩქარით გადაცემით (მულტიმედია, ვიდეოტელეფონია და სხვა);
- ✓ შედწევის წერტილების მხარდაჭერა გეოგრაფიულ მდებარეობასთან მიბმის გარეშე და პირდაპირი ხედვის არარსებობის დროს (NLOS – Non Line of Site);
- ✓ Wi-Fi შედწევის წერტილების ჩართვა და მომსახურება;
- ✓ სხვა სახის ქსელებთან ურთიერთქმედება.

WiMAX სტანდარტი დაფუძნებულია IP-პროტოკოლზე და უზრუნველყოფს როგორც მონაცემების გადაცემას, ასევე ტრადიციულ ბგერითი სიგნალების გადაცემას (მომსახურებას). ამასთანავე გააჩნია დიდი ეფექტურობა NLOS პირობებში (OFDM-ის გამოყენებით).

WiMAX - სატელეკომუნიკაციო ტექნოლოგიაა, რომელიც შემუშავებულია დიდ მანძილებზე, უნივერსალური უგამტარო კავშირის მოსაწოდებლად ფართო სპექტრის მოწყობილობათათვის (მუშა სადგურებიდან და პერსონალური კომპიუტერებიდან დაწყებული მობილურ ტელეფონებამდე).

WiMAX იყენებს მექანიზმს, რომელიც დაფუძნებულია კავშირის დამყარებაზე საბაზო სადგურსა და მომხმარებლის მოწყობილობას შორის. თითოეული შეერთება დაფუძნებულია დაგეგმარების

სპეციალურ ალგორითმზე, რომელსაც შეუძლია QoS პარამეტრების გარანტირება ყოველი შეერთებისთვის.

2001-2005 წ.წ. დამუშავებული იქნა IEEE 802.16 ოჯახის სტანდარტების ოთხი ვერსია (მათი მოკლე დახასიათება მოყვანილია ცხრილში 1.5 [1]. პირველი მათგანი აღწერდა ფიქსირებული შეღწევის ქსელების მოწყობილობების მახასიათებლებს შემთხვევისათვის “წერტილი-მრავალწერტილი”, სისშირულ დიაპაზონში (10-66) გგჰც. ეს სტანდარტი დამტკიცებული იქნა 2001 წლის დეკემბერში. რადიოკავშირი სისშირის ამ დიაპაზონში მოითხოვს გადამცემსა და მიმღებს შორის პირდაპირი ხედვის არსებობას, რაც მნიშვნელოვანი ნაკლოვანებაა მისი გამოყენების დროს ქალაქის მჭიდრო დასახლების პირობებში.

ცხრილი 1. 5.

IEEE 802.16 სტანდარტი

სტანდარტი	802.16	802.16.a	802.16.d	802.16.e
მუშა სისშირეების დიაპაზონი	10-66 გგჰც	2-11 გგჰც	2-11 გგჰც	2-11 გგჰც
კავშირის პირობები	პირდაპირი ხედვა	პირდაპირი ხედვის არარსებობა	პირდაპირი ხედვის არარსებობა	პირდაპირი ხედვის არარსებობა
მობილობა	ფიქსირებული	ფიქსირებული და სენსური	ფიქსირებული, სენსური და გადაადგილებადი	მობილური
გადაცემის რეჟიმი	ერთი გადამტანი	ერთი გადამტანი	ერთი გადამტანი	ერთი გადამტანი მრავალრეჟიმიანი OFDMA
მოდულაცია	QPSK, 16QAM და 64QAM	QPSK, 16QAM და 64QAM	QPSK, 16QAM და 64QAM	QPSK, 16QAM და 64QAM
მონაცემების გადაცემის სიჩქარე	32-134 მგბიტ/წმ	1-75 მგბიტ/წმ	1-75 მგბიტ/წმ	1-15 მგბიტ/წმ
არხის სიგანე	20, 25 და 28 მგჰც	ცვლადი 1.25-დან 20 მგჰც-მდე	ცვლადი 1.25-დან 20 მგჰც-მდე	ცვლადი 1.25-დან 20 მგჰც-მდე
ფიზიკური დონის სპეციფიკაცია	Wireless MAN-SC	Wireless MAN-SCa Wireless MAN-OFDM Wireless MAN-OFDMA	Wireless MAN-SC WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM WirelessMAN-OFDMA	Wireless MAN-SC WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM WirelessMAN-OFDMA

გიგაჰერცული სიხშირული დიაპაზონის სპექტრულ-ეფექტური ტექნოლოგიების (OFDM, სივრცით-დროითი კოდირება, ადაპტური ანტენები) გამოჩენამ მიზანშეწონილი გახდა WiMAX-თვის სიხშირული სპექტრის ახალი დიაპაზონების გამოყოფა, რის შემდეგაც დამუშავდა სტანდარტის ახალი ვერსია IEEE 802.16.a (ან IEEE 802.16-2003).

მოცემული სტანდარტი აღწერდა ფიქსირებული და სენსური შეღწევის WirelessMAN ქსელების მოწყობილობების მახასიათებლებს, სიხშირულ დიაპაზონში 2-11 გგჰც, გადამცემსა და მიმღებს შორის პირდაპირი ხედვის არარსებობის პირობებში [1].

სტანდარტი IEEE 802.16.d ვერსიამ გააერთიანა ორი წინა ვერსია და უზრუნველყო გადაადგილებადი შეღწევა WirelessMAN ქსელებში. მისი მოწყობილობა გათვლილი იყო 2-11 გგჰც დიაპაზონში ფუნქციონირებისათვის, პირდაპირი ხედვის არარსებობის (NLOS) პირობებში.

2004 წლის ივლისში მოწონებული იქნა სტანდარტი IEEE 802.16-2004, რომელიც წარმოადგენდა IEEE 802.16.a სტანდარტის შესწორებულ ვერსიას. მან შეცვალა სტანდარტის ადრე არსებული ვერსიები – 802.16, 802.16.a და 802.16 Rev.d. დღეისათვის სტანდარტი IEEE 802.16-2004 აღწერს ფართოზოლოვან უგამტარო შეღწევას სისტემებისათვის დიაპაზონში 2-11 გგჰც. ის განსაზღვრავს გადაცემის გარემოსთან შეღწევის კონტროლის (MAC) და ფიზიკურ დონეებს, რაც უზრუნველყოფს მრავალრიცხოვანი სხვადასხვა ოპერატორების ქსელების ურთიერთქმედებას.

მესამე თაობის ქსელებთან, ამ დროსთვის წამოწყებულმა კონკურენციამ განაპირობა, ტექნოლოგიური გადაწყვეტილებების მოძიების აუცილებლობა, რომლებიც უზრუნველყოფდნენ საბოლოო მომხმარებლის მობილურობას. IEEE 802.16.e (IEEE 802.16-2005) სტანდარტის “მობილური” ვერსია 2005 წ. დეკემბერში გამოვიდა. მისთვის საბაზო გახდა წინა IEEE 802.16-2004 ვერსია, დამატებებითა და ცვლილებებით, რომლებიც უზრუნველყოფდნენ მობილურ შეღწევას [52].

მობილური WiMAX ორიენტირებულია მომხმარებლებთან მუშაობაზე, რომლებიც გადაადგილდებიან 120 კმ/სთ-მდე სიჩქარით.

მობილურობა გულისხმობს როუმინგის ფუნქციის არსებობას და საბაზო სადგურებს შორის ე.წ. “უნაკერო” გადართავს აბონენტის მოძრაობისას (როგორც ეს მობილური ოპერატორების ქსელში ხდება). კერძო შემთხვევებში მობილური WiMAX შეიძლება გამოყენებული იქნას ფიქსირებულ მომხმარებელთა მომსახურებისთვისაც.

WiMAX ფორუმში მონაწილე მოწყობილობების მწარმოებლების მიერ მოწოდებულია IEEE 802.16 სტანდარტების დანერგვის სამეტაპიანი კონცეფცია. ამ კონცეფციის რეალიზაცია დაიწყო IEEE 802.16.d (802.16.a) სტანდარტების ქსელების აგებით, რომლებიც უზრუნველყოფდნენ ფიქსირებულ უგამტარო შეღწევას საერთო სარგებლობის სადგურებითა და მომხმარებლის გარე ანტენებით. ამავე ეტაპზე ხდება WiMAX ქსელთან IEEE 802.11.a (Wi-Fi) მოწყობილობების მქონე საერთო შეღწევის მომხმარებლების მიერთება [53, 54].

მეორე ეტაპი გულისხმობს WiMAX ქსელებთან Wi-Fi პერსონალური მომხმარებლების სადგურების მიერთებას შეღწევის კოლექტიური წერტილების გავლით ტრანზიტის გარეშე. WiMAX ტექნოლოგიით მომუშავე პერსონალური მოწყობილობების ქმედება, აგრეთვე მუშაობა შეღწევის კოლექტიური წერტილებით უზრუნველყოფილი უნდა იქნას სენსური და გადაადგილებადი რეჟიმების პირობებში. ამისათვის პორტატული მოწყობილობები აღიჭურვება IEEE 802.16-2004 სტანდარტის მოდემით, რომლებიც ან “დედა” პლატაზე რეალიზდება ან წარმოდგება PCMCIA ბარათის სახით.

მოსალოდნელი მომსახურების სახეების ჩამონათვალი ამ დროს შემდეგია:

- ✓ მონაცემების გადაცემა: მაღალსიხქარიანი შეღწევა ინტერნეტში, e-mail, ფაილების გადაცემა;
- ✓ სატელევიზიო პროგრამების მიღება, ვიდეო მოთხოვნით და ნაკადური ვიდეო;
- ✓ ბგერის პაკეტური გადაცემა რეალურ დროში (VoIP, ნაკადური აუდიო რეალურ დროში);

- ✓ ვიდეო რეალურ დროში: ვიდეოკონფერენცია, ვიდეოკაეშირი, ქსელური თამაშები, ნაკადური ვიდეო.

Wi-Fi ქსელები საწყის ეტაპზე არ განიხილებოდნენ WiMAX-ის პირველადი ვერსიების კონკურენტად, რადგან WiMAX მოიაზრებოდა მხოლოდ “ბოლო მილის” პრობლემის გადასაწყვეტად და MAN ქსელების ფიქსირებული საბოლოო მომხმარებლებისათვის. ამ სცენარით ეს სტანდარტები (Wi-Fi და WiMAX) ერთმანეთს ავსებდნენ და მათი მოწყობილობების მასსიათებლები იძლეოდა სხვადასხვა დანიშნულების ქსელების აგების შესაძლებლობებს სხვადასხვა პირობებისათვის (ცხრ. 1.6).

WiMAX-ის დანერგვის მე-3 ეტაპი გულისხმობს ქსელების აგებას მომსახურების მიწოდებით მობილური აბონენტებისათვის. ამ მომენტიდან ჩნდება IEEE 802.11 და IEEE 802.16 ქსელების აგების კონკურენტული ვარიანტები.

დღეისათვის 802.16 ქსელების ძირითად ამოცანას წარმოადგენს ქსელური დონის უზრუნველყოფა 802.11 ლოკალური ქსელებსა და რეგიონალურ (WAN) ქსელებს შორის, რომლებშიც შემდგომში იგეგმება დამუშავებაში მყოფი IEEE 802.20 სტანდარტების გამოყენება.

IEEE-ს ვერსიით BWA-ს ძირითადი სტანდარტების ჩამონათვალში შესულია: IEEE 802.15 (Bluetooth) – პერსონალური ქსელებისათვის, Wi-Fi – ლოკალური ქსელებისათვის და WiMAX. ამ ჩამონათვალს ასრულებს დამუშავების ეტაპზე მყოფი სტანდარტი IEEE 802.20 - გათვალისწინებული გლობალური ქსელების შესაქმნელად [55].

ელექტრონიკისა და ელექტროტექნიკის ინჟინერთა ინსტიტუტმა 2011 წლის აპრილში დაამტკიცა IEEE 802.16.m სტანდარტი, რომელიც ცნობილია როგორც WirelessMAN-Advanced და WiMAX-2 [56]. ეს სტანდარტი აკმაყოფილებს მეოთხე თაობის სტანდარტის მოთხოვნებს. IEEE 802.16.m იძლევა უსადენო ქსელების გამტარუნარიანობის რამდენჯერმე გაზრდის საშუალებას. ასე, ახალი თაობის ქსელებში სასადგურო მოწყობილობებს შეუძლიათ მიიღონ მონაცემები 1გბიტ/წმ-მდე სიჩქარით, ხოლო მობილურ გაჯეტებს და პორტატულ

კომპიუტერებს 100 მგბიტ/წმ-მდე. იმავდროულად შენარჩუნებულია უკუთავსებადობა არსებულ WiMAX მოწყობილობებთან. არსებული ცხრილი 1.6.

IEEE 802.11 და IEEE 802.16 მოწყობილობების მახასიათებლების შედარება

	IEEE 802.11	IEEE 802.16
დაფარვის რადიუსი	<ul style="list-style-type: none"> ✓ მონაცემების გადაცემა ზონაში რადიუსით 100 მ-მდე; ✓ გათვალისწინებულია დაფარვის ზონის გაზრდა დამატებითი საანტენო მოწყობილობებით. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ფიჭის ტიპური რადიუსი (7-10) კმ, პოტენციალური 50 კმ-მდე. ✓ არ არსებობს შეღწევის “დაფარული” წერტილების პრობლემა
დაფარვის არხები	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ქსელები ოპტიმიზირებულია მონაცემების გადაცემისათვის შენობის ფარგლებში 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ მონაცემების გადაცემა შენობის გარეთ, დიდ მანძილებზე, პირდაპირი ხედვის არარსებობის პირობებშიც. ✓ გათვალისწინებულია: OFDM/OFDMA-ს გამოყენება გადამტანების სხვადასხვა რიცხვით; ადაპტური მოდულაციის გამოყენება; SMART-ანტენების გამოყენება.
მასშტაბურობა	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ფიქსირებული სისშირული ზოლის სიგანე (20 მგჰც) ✓ აბონენტის რიცხვის ზრდით მონაცემების გადაცემის სიჩქარე მცირდება არაწრფივად. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ სისშირული ზოლის სიგანე 1.5 და 20 მგჰც-მდეა (მარტივდება ქსელის დაგეგმარება); ✓ აბონენტის რიცხვის ზრდით მონაცემების გადაცემის სიჩქარე მცირდება წრფივად.
მონაცემების გადაცემის სიჩქარე	<ul style="list-style-type: none"> ✓ მონაცემების გადაცემის სიჩქარეა 54 მგბიტ/წმ არხის სისშირული ზოლისათვის 20 მგჰც (სპექტრალური ეფექტურობა 2.7 ბიტ/წმ/ჰც) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ მონაცემების გადაცემის სიჩქარეა 75 მგბიტ/წმ, არხის სისშირული ზოლისათვის 20 მგჰც. (სპექტრალური ეფექტურობა 3.8 ბიტ/წმ/ჰც)
ხარისხის ოპციები (QoS)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ QoS ოპციები არ ხორციელდება (დამუშავებულია IEEE 802.11.e სპეციფიკაციაში) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ QoS ხორციელდება ბგერასა და ვიდეოსათვის.

WiMAX (IEEE 802.16.e) მობილური ქსელები უზრუნველყოფენ თეორიულ გამტარუნარიანობას 40 მგბიტ/წმ-მდე. სასადგურო კომპიუტერზე მონაცემთა გადაცემისას სიჩქარე კი 75 მგბიტ/წმ აღწევს.

შესაძლებელია სიტუაცია, როდესაც ახლანდელი ფიჭური პროტოკოლების სანაცვლოდ მოვლენ უგამტარო კავშირის ოჯახის პროტოკოლები 802.11/16 (იხ. ცხრ. 1.7), ან სულ მცირე, ისინი შექდებენ 3G/4G ქსელებთან თანაარსებობას [57].

802.11 და 802.16 სტანდარტების მახასიათებლები მოცემულია ცხრილში 1.7.

ცხრილი 1.7.

Wi-Fi და WiMAX სტანდარტების მახასიათებლები

ტექნოლოგია	სტანდარტი	გამოყენება	გამტარუნარიანობა	მოქმედების რადიუსი	სიხშირეები, გგჰც
Wi-Fi	802.11a	WLAN	54 მგბიტ/წმ-მდე	300 მ-დე	5,0
Wi-Fi	802.11b	WLAN	11 მგბიტ/წმ-მდე	300 მ-დე	2,4
Wi-Fi	802.11g	WLAN	54 მგბიტ/წმ-მდე	300 მ-დე	2,4
Wi-Fi	802.11n	WLAN	450 მგბიტ/წმ-მდე (პერსპექტივაში 600 მგბიტ/წმ-მდე)	300 მ-დე	2,4 - 2,5 ან 5,0
WiMAX	802.16d	WMAN	75 მგბიტ/წმ-მდე	25-80 კმ	1,5-11
WiMAX	802.16e	Mobile WMAN	40 მგბიტ/წმ-მდე	1-5 კმ	2.3-13.6
WiMAX	802.16m	WMAN, Mobile WMAN	1 გგბიტ/წმ-მდე (WMAN), 100 მგბიტ/წმ-მდე (Mobile WMAN)	-	-

1.3. BWN ქსელების ტექნოლოგიების ევოლუცია საქართველოში

საქართველოში ფიჭურმა კავშირგაბმულობამ განვითარება დაიწყო 1996 წლიდან, როდესაც ოპერატორმა "მეგაკომი" გაუშვა პირველი თაობის AMPS სისტემა. შემდგომ მან შეწყვიტა თავის მოღვაწეობა.

ერთი წლის შემდგომ, მეორე თაობის ციფრული სისტემის GSM 900-ის მეშვეობით, თავისი მომსახურების გაწევა დაიწყო ერთდროულად ორმა კომპანიამ "ჯეოსელი" და "მაგთიკომი". ეს ორი წარმატებული კომპანია მალე ითვისებს ახალ ტექნოლოგიებს. თავიდან ეს იყო GSM 1800, ხოლო შემდგომ UMTS და HSDPA. თითოეული ამ კომპანიის ქსელი ფარავს საქართველოს დასახლებული ტერიტორიის 98%.

2007 წლიდან საქართველოს ტერიტორიაზე GSM 1800 სისტემის თავისი ქსელი გაშალა კომპანიამ "მობიტელი". საქართველოში ის ცნობილია "ბილაინი"-ს სახელწოდებით. მალევე მან დაიწყო მესამე თაობის მომსახურებათა შეთავაზება.

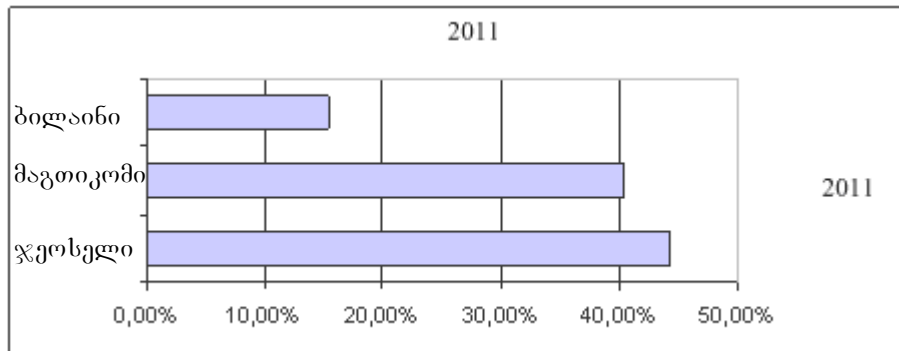
ფიჭური კავშირის აბონენტთა რაოდენობა 2010 წლის 3,98 მილიონიდან გაიზარდა 4,43 მილიონამდე 2011 წელს, ხოლო ფიჭური აბონენტების სიმკვრივე (აბონენტების თანაფარდობა ქვეყნის მოსახლეობასთან) იმავე პერიოდში გაიზარდა 89,7%-დან 99,1%-მდე. აბონენტთა რაოდენობა განისაზღვრება აქტიური SIM-ბარათების რაოდენობით.

ლიდერია კომპანია ჯეოსელი. 2011 წელს აბონენტთა საერთო რაოდენობის 44,3% ეკუთვნოდა ჯეოსელს, 40,3% - მაგთიკომს და 15,4% - ბილაინს [58] (იხ. ნახ. 1.8).

კომპანია "სილქნეტი", რომელიც შედის "სილქ როუდ გრუპის" ქართული კორპორაციის შემადგენლობაში, მობილური კავშირის ბაზარზე შემოვიდა 2011 წლის დეკემბერში და წლის ბოლოსთვის მისი აბონენტების რიცხვი შეადგენდა 1782 აბონენტს.

ინტერნეტ მომხმარებელთა რიცხვი საქართველოში 2011 წელს, 2010 წელთან შედარებით გაიზარდა 49%-ით, და შეადგინა 1 მილიონ 637 ათას აბონენტი. მათ რიცხვს მობილური ინტერნეტ მომხმარებლებიც მიეკუთვნებიან, რომლებიც 2010 წელს იყვნენ 500 ათასი – აღნიშნულია საქართველოს კომუნიკაციების მარეგულირებელი კომისიის (GNCC) 31 მაისს გამოქვეყნებულ წლიურ ანგარიშში.

უგამტარო ფართოხოლოვან (მაღალსიხქარიან) ტექნოლოგიებიდან (გარდა მობილურისა), საქართველოში, ძირითადად დანერგილია CDMA EV-DO, WiMax და Wi-Fi.



ნახ. 1.8. საქართველოს ფიჭური კავშირის აბონენტთა რიცხვის განაწილების დიაგრამა

2011 წლის ბოლოსთვის EV-DO აბონენტების რიცხვი შეადგენდა 41 ათასს, ხოლო WiMax და Wi-Fi შესაბამისად, 7.229 და 4.468 ათასს.

2011 წლის ბოლოსთვის კომპანიამ "ბილაინი", პირველად საქართველოში წარმოადგინა მე-4-ე თაობის ინტერნეტი (4G), რომელიც LTE ტექნოლოგიის ბაზაზე ფუნქციონირებს. კომპანიის თბილისის სათაო ოფისის ინფორმაციით პრეზენტაცია მოხდა კურორტ ბაკურიანში, სპეციალურად მომზადებულ ინოვაციური ტექნოლოგიების სადემონსტრაციო ზონაში. "ბილაინი" პირველი კომპანიაა, რომელმაც პირველად საქართველოში და საერთოდ ამიერ კავკასიაში მოახდინა 4G ტესტირება.

2012 წლის ბოლოს ქ. თბილისის მერიის ინიციატივით, ქალაქის ყველა რაიონი დაფარული იქნება უფასო, უსადენო Wi-Fi ინტერნეტ ქსელით. მოცემული ინიციატივა მნიშვნელოვანია ყველა იმ ადამიანისთვის, რომლებიც ინტერნეტს აქტიურად იყენებენ საქმიანი, საგანმანათლებლო ან გასართობი მიზნებისათვის. ასეთი მაშტაბური პროექტის განხორციელება, სახელმწიფოს პატრონაჟით უპრეცედენტოა მსოფლიოში. ისეთ ქალაქებშიც კი როგორებიცაა პარიზი, ვენა, ამსტერდამი, რომი, პრაღა, იერუსალიმი და სტამბული უფასო ინტერნეტი ხელმისაწვდომია მხოლოდ კომერციული ორგანიზაციების ტერიტორიაზე.

და კიდევ ერთი ძალიან მნიშვნელოვანი ფაქტი. 2012 წლის მაისში საქართველოს პრეზიდენტმა განაცხადა, რომ უახლოეს დროში საქართველოს სოფლების 80% -ში იქნება ინტერნეტი და სოფლის მოსახლეობა შეძლებს მსოფლიოს ნებისმიერი წერტილის

მოსახლეობასთან ურთიერთობას, ისწავლიან სხვებისგან ახალს და თვითონაც შეძლებენ თავიანთი ცოდნისა და გამოცდილების გაზიარებას სხვა ინტერნეტ მომხმარებელთათვის.

მოვიყვანოთ ზემოაღნიშნული თაობების მოკლე დახასიათება.

1G

ქსელის ყველაზე პრიმიტიული ორგანიზაცია. ხმა რადიოეთრში გადაეცემოდა ანალოგური სახით, როგორც ჩვეულებრივ სატელეფონო ქსელში. შედეგად შეუძლებელი იყო დამატებითი მომსახურების გაწევა, ფაქსიმილური კავშირის გარდა. ანალოგური სიგნალი არ არის დაცული ხელშეშლებისგან. რადიოსპექტრის გამოყენების ეფექტურობაც მინიმალურია – თითოეული კავშირის სეანსი მთლიანად იკავებდა არხს (25-30 კჰც).

ტექნოლოგიების ეს თაობა წარმოადგენს ჩვეულებრივი ტელეფონის უშუალო შთამომავალს.

2G

მათემატიკური ალგორითმების საშუალებით აუდიო სიგნალების კოდირებამ და მათი ციფრული სახით ქსელში გადაცემამ წარმოაჩინა ახალი შესაძლებლობების მთელი რიგი.

პირველ რიგში, შესაძლებელი გახდა არა მარტო ხმის, არამედ მონაცემების გადაცემაც. არხის სიგანე უკვე 200 კჰც შეადგენს.

მეორეც, ხმის ციფრული დამუშავებისას შესაძლებელი გახდა კორექტირების ტექნოლოგიის გამოყენება, რამაც ხმოვანი შეტყობინების გადაცემის ხარისხი მკვეთრად გააუმჯობესა.

მესამეც, განვითარებულმა კრიპტოგრაფიულმა ინსტრუმენტებმა დაცვის პრინციპულად ახალი ხარისხის უზრუნველყოფის საშუალება მოგვცეს.

მეოთხე, მკვეთრად გაიზარდა რადიოსპექტრის გამოყენების ეფექტურობა, მაშასადამე ქსელის ტევადობაც.

თუმცადა, ტექნოლოგიების ეს თაობა ორიენტირებული იყო უშუალოდ აუდიო სიგნალის გადაცემაზე (ხორციელდებოდა არხების კომუტაცია). ინტერნეტ ქსელის განვითარებამ და მის რესურსებთან წვდომაზე მოთხოვნის გაზრდამ, დააყენა IP პროტოკოლების მხარდაჭერის და მონაცემთა გადაცემის სინქარის საკითხი. გაჩნდა

პაკეტური კომუტაციის რეალიზაციის და უფრო მაღალი წარმადობის რადიონტერფეისების აუცილებლობა, რომლებიც მონაცემთა გადაცემისთვის იქნებოდნენ განკუთვნილნი. ამისთვის საჭირო გახდა სტანდარტებისთვის ცალკეული გაფართოებების დამატება, რომლებიც ქსელის მთელ ასაღ ქვესისტემებს აღწერდნენ. ანუ GPRS/EDGE არ წარმოადგენს ხმოვანი ქსელების "ორგანულ ნაწილს". ამიტომ მსგავსი გაფართოების მქონე მეორე თაობის ქსელების აღსანიშნავად იყენებენ აღნიშვნას 2,5G, 2,75G და ა.შ

3G

3G ქსელის თითოეული აბონენტისთვის ხდება 5 მგპც სიხშირული ზოლის გამოყოფილი არხის უზრუნველყოფა. მესამე თაობის მობილური კავშირი აგებულია მონაცემთა პაკეტურ გადაცემაზე (ხორციელდება პაკეტების კომუტაცია). ინერგება უახლესი ტექნიკური მიღწევა ლაპარაკის გადაცემისათვის - VoIP (Voice over IP) ტექნოლოგია. მიმდინარეობს ნაკადური აუდიო/ვიდეო ნაკადების, MMS და სხვა მულტისერვისული მომსახურების გაცვლის შესაძლებლობის ორგანიზება.

ვამახვილებთ ყურადღებას, რომ მესამე თაობის ქსელებში ხმის გადაცემისთვის ძველებურად, შეიძლება გამოყენებული იქნას არხების კომუტაციის პრინციპი. ეს არის გაკეთებული წინა თაობის სისტემების მხარდასაჭერად.

4G

4G ქსელის თითოეული აბონენტისთვის ხდება 5÷20 მგპც გამოყოფილი არხის უზრუნველყოფა. 4G ქსელში უარი უნდა ითქვას ხმის არხებით კომუტაციაზე და განხორციელდეს გადასვლა all-IP (პაკეტურ კომუტაციაზე). ანუ ინტრნეტ პროტოკოლების სტეკი უნდა გახდეს ერთადერთი ტრანსპორტი, რაც იმას ნიშნავს, სხვათაშორის, რომ მოხდება გადასვლა VoIP-ზე, როგორც ხმოვანი შეტყობინების გადაცემის ერთადერთ საშუალებაზე.

1.4. დასკვნები პირველ თავთან დაკავშირებით

1. მოცემულია ფართოზოლოვანი უგამტარო ქსელების დახასიათება. ნაჩვენებია ფიჭური კავშირის სისტემებისა და შეღწევის ფართოზოლოვანი უგამტარო სისტემების ევოლუცია. ნაჩვენებია ინტერნეტ ტექნოლოგიების გამოყენების პერსპექტივა 4G ქსელებში.
2. ნაჩვენებია, რომ უგამტარო კავშირების სისტემების არხების სიგანე 30 კჰც-დან გაიზარდა 20 მგჰც-მდე, შესაბამისად მონაცემების გადაცემის სიჩქარე გაიზარდა 1 გგბიტ/წმ-მდე. ამ ევოლუციის შედეგად, უგამტარო კავშირების სისტემებით, ამჟამად შესაძლებელია გადაცემულ იქნეს არამარტო ხმა, როგორც ეს იყო ანალოგურ სისტემებში, არამედ ასევე აუდიო/ვიდეო, MMS მომსახურებათა და სხვა მულტიმედური მომსახურებების ნაკადები.
3. ნაჩვენებია, რომ თანამედროვე BWN-ებში ყველა სახის ინფორმაციის გადაცემის ძირითადი სახეა IP ტექნოლოგია (პაკეტური კომუტაცია) და შესაბამისად, ფორმულირებულია მოთხოვნები ახალი BWN-ტექნოლოგიების მიმართ.
4. ნაჩვენებია ფართოზოლოვანი უგამტარო ქსელების ევოლუციური სვლა საქართველოში. აღნიშნულია, რომ ქვეყნის მთელ ტერიტორიაზე ჯეოსელი, მაგთიკომი, ბილანი და სილქნეტი აქტიურად ნერგავენ ფართოზოლოვანი უგამტარო კავშირების მე-3 თაობის ტექნოლოგიებს, ხოლო ბილანიმა უკვე ჩაატარა LTE ტექნოლოგიის ტესტირება, რომელიც მე-4 თაობას განეკუთვნება. ყველა ამ კომპანიების ძალისხმევა მიმართულია ინტერნეტში ქვეყნის მოსახლეობის საყოველთაო სწრაფშეღწევის უზრუნველყოფისკენ. ყველა ეს ფაქტი ადასტურებს, რომ სამეცნიერო გამოკვლევები ფართოზოლოვანი უგამტარო კავშირის ტექნოლოგიების ხარისხის გაზრდის მიმართულებით აუცილებელი და დროულია.

თავი 2. ინტერნეტ პროტოკოლები (IP) ფართოზოლოვან უგამტარო ქსელებში

2.1. თანამედროვე ქსელები და პარამეტრები, რომლებიც ზეგავლენას ახდენენ მომსახურების ხარისხზე

მომსახურების ხარისხი – ეს ერთია იმ მრავალ მოთხოვნას შორის, რომლებიც სტანდარტების შესაბამისად თანამედროვე ქსელებს წაყენება.

ყველაზე ზოგადი სურვილი, რომელიც შეიძლება გამოითქვას BWN ქსელების მუშაობის მიმართ, ეს მომსახურების იმ ჩამონათვალის შესრულებაა, რომლებისთვისაც განკუთვნილია ეს ქსელები. მაგალითად: ფაილების არქივებთან ან Internet-ის Web-საიტებთან შედწევის შესაძლებლობა; ელექტრონული ფოსტის გაცვლა საწარმოს ფარგლებში ან გლობალურ მასშტაბებში; IP-ტელეფონიის ხმოვანი შეტყობინებების ინტერაქტიური გაცვლა და სხვ.

ამ ძირითადი ამოცანის შესრულების ხარისხთანაა დაკავშირებული BWN ქსელების ისეთი მნიშვნელოვანი მახასიათებელი, როგორცაა მისი წარმადობა.

ქსელის წარმადობის ანალიზის დროს მნიშვნელოვან როლს თამაშობს მისი გამტარუნარიანობა და მასში მონაცემების გადაცემის დაყოვნება [59, 60, 61].

გამტარუნარიანობა – ტრაფიკის დამუშავების მაქსიმალური შესაძლო სიჩქარე, განსაზღვრული ტექნოლოგიის იმ სტანდარტით, რომელის შესაბამისადაცაა აგებული ქსელი. **გამტარუნარიანობა** ასახავს ქსელის ან მისი ნაწილის მიერ დროის ერთეულში გადაცემული მონაცემების მაქსიმალურ მოცულობას. **გამტარუნარიანობა** მიუთითებს ქსელის შიდა ოპერაციების შესრულების სიჩქარეზე – მონაცემების პაკეტების გადაცემაზე ქსელის კვანძებს შორის სხვადასხვა საკომუტაციო მოწყობილობის გავლით. ის უშუალოდ ახასიათებს ქსელის მიერ მისი ძირითადი ფუნქციის – შეტყობინების ტრანსპორტირების – შესრულების ხარისხს [62].

გამტარუნარიანობა იზომება ერთეულით ბიტი წამში (ბიტ/წმ), ცალკეულ შემთხვევებში – პაკეტი წამში.

ქსელის *გამტარუნარიანობა* დამოკიდებულია როგორც გადაცემის გარემოს ფიზიკურ მახასიათებლებზე, ასევე მონაცემების გადაცემის მიღებულ მეთოდზე (ტექნოლოგიები Ethernet, ATM, Wi-Fi და სხვა). *გამტარუნარიანობა* როგორც მახასიათებელი გამოიყენება, არა მარტო ქსელისათვის, არამედ იმ ტექნოლოგიის დასახასიათებლად, რომელზედაც აგებულია ეს ქსელი.

გეტეროგენული ქსელის სხვადასხვა უბანზე, სადაც გამოყენებულია რამდენიმე განსხვავებული ტექნოლოგია, *გამტარუნარიანობა* შეიძლება განსხვავებული იყოს. ქსელის მუშაობის ანალიზისა და გაწყობისათვის ძალზე სასარგებლოა მისი ცალკეული ელემენტების *გამტარუნარიანობის* მონაცემების ცოდნა. მნიშვნელოვანია აღვნიშნოთ, რომ მონაცემების გადაცემის პროცესის მიმდევრობითობის გამო ქსელის ნაირსახოვან ელემენტებს შორის, საერთო *გამტარუნარიანობა* ნებისმიერი შედგენილი მარშრტისათვის, განისაზღვრება მისი ელემენტებიდან მინიმალური *გამტარუნარიანობის* მქონე ელემენტით. *გამტარუნარიანობის* გაზრდის მიზნით, პირველ რიგში, ყურადღება უნდა მიექცეს ყველაზე ნელმოქმედ ელემენტებს. ზოგიერთ შემთხვევაში, მიზანშეწონილია ოპერირება მოვახდინოთ *ქსელის* საერთო *გამტარუნარიანობით*, რომელიც განისაზღვრება როგორც ქსელის ყველა კვანძს შორის გადაცემული ინფორმაციის საშუალო რაოდენობა დროის ერთეულში. იგი ახასიათებს ქსელის საერთო ხარისხს, მისი დიფერენცირების გარეშე ცალკეული სეგმენტებისა და მოწყობილობების მიმართ.

გადაცემის დაყოვნება განისაზღვრება, როგორც დროის მონაკვეთი გასული მონაცემების შემოსვლის მომენტიდან ქსელის რომელიმე მოწყობილობის ან ქსელის ნაწილის შესავალზე, და ამ მოწყობილობის, ან ქსელის ამ ნაწილის გამოსავალზე, მისი გამოჩენის მომენტამდე.

ჩვეულებრივად, BWN ქსელების ხარისხს ახასიათებენ *გადაცემის დაყოვნების* მაქსიმუმით და *გადაცემის დაყოვნების ვარიაციით*. აღსანიშნავია, რომ ტრაფიკის ყველა სახე არ არის მგრძობიარე *გადაცემის დაყოვნების* მიმართ, ყოველ შემთხვევაში დაყოვნების იმ სიდიდეების მიმართ, რომელიც დამახასიათებელია კომპიუტერული

ქსელებისათვის, - ზოგადად მათი სიდიდე არ აღემატება მილიწამს, იშვიათად კი რამდენიმე წამს. პაკეტების ამ რიგის დაყოვნებები, წარმოშობილი ფაილების, ელექტრონული ფოსტისა და ბეჭდვის სამსახურების მიერ ნაკლებად მოქმედებენ ამ სამსახურების ფუნქციონირების ხარისხებზე, ქსელის მომხმარებლის თვალსაზრისით. მეორე მხრივ, პაკეტების, რომელთაც გადააქვთ სალაპარაკო და ვიდეომონაცემები, ასეთმა დაყოვნებებმა შეიძლება მიგვიყვანოს მომხმარებლისათვის მიწოდებული ინფორმაციის ხარისხის მნიშვნელოვან გაუარესებამდე - „ექოს“ ეფექტის წარმოშობამდე, ცალკეული სიტყვების გარჩევის შეუძლებლობამდე, გამოსახულების ვიბრაციამდე და ა.შ.

გამტარუნარიანობა და მონაცემების გადაცემის დაყოვნება ერთმანეთისაგან დამოუკიდებელ პარამეტრებს წარმოადგენენ. ასე რომ ქსელს შეიძლება ჰქონდეს, მაგალითად, მაღალი გამტარუნარიანობა, მაგრამ შეჰქონდეს მნიშვნელოვანი დაყოვნებები მონაცემების გადაცემაში თითოეული პაკეტის გადაცემის დროს. ასეთი სიტუაციის მაგალითს იძლევა კავშირის არხი ორგანიზებული გეოსტაციონალური თანამგზავრით. ამ არხის გამტარუნარიანობა შეიძლება იყოს საკმაოდ მაღალი, მაგალითად 2 მგბიტ/წმ, მაშინ როდესაც გადაცემის დაყოვნება ყოველთვის შეადგენს არანაკლებ 0,24 წმ., რაც განპირობებულია ელექტრონული სიგნალის გავრცელების სიჩქარითა (დაახლოებით 300 000 კმ/წმ) და არხის სიგრძით (მინიმუმ 72 000 კმ).

იდეალურ შემთხვევაში BWN ქსელმა უნდა უზრუნველყოს მომსახურების ხარისხის პარამეტრები ფორმულირებული ცალკე თითოეული გამოყენებისათვის. მაგრამ გარკვეული მიზეზებისა და უკვე არსებული QoS მექანიზმების გამო შემოისაზღვრებიან უფრო მარტივი ამოცანის გადაწყვეტით – გარკვეული გასაშუალებული მოთხოვნების შესრულების გარანტიით, წარმოდგენილით გამოყენებათა ძირითადი ტიპებისათვის.

ყველაზე ხშირად პარამეტრები, რომლებიც ფიგურირებენ მომსახურების მრავალფეროვან განსაზღვრებებში, რეგლამენტირებას უკეთებენ ქსელის ფუნქციონირების შემდეგ მაჩვენებლებს:

- ✓ *გამტარუნარიანობა;*

- ✓ პაკეტების გადაცემის დაყოვნება;
- ✓ პაკეტების დანაკარგებისა და დამახინჯების დონე.

კავშირის არსებისა და სატრანზიტო საკომუტაციო მოწყობილობების ფაქტიური გამტარუნარიანობა – ეს ქსელის ის რესურსია, რომელიც წარმოადგენს საყრდენ წერტილს QoS მექანიზმების მუშაობისათვის. QoS მექანიზმები მხოლოდ მართავენ არსებული გამტარუნარიანობის განაწილებას, გამოყენების სახისა და ქსელის გაწყობის მოთხოვნათა შესაბამისად. ქსელის გამტარუნარიანობის გადანაწილების ყველაზე ნათელი მაგალითი მდგომარეობს პაკეტების რიგების მართვაში.

ვინაიდან მონაცემები, რომელთაც ცვლიან ერთმანეთს შორის ორი დამაბოლოებელი კვანძი, გადიან შუალედური საქსელო მოწყობილობების, ისეთების როგორცაა კონცენტრატორები, კომუტატორები და მარშრუტიზატორები, გარკვეულ რაოდენობას, QoS უზრუნველყოფა მოითხოვს ტრაფიკის გზაზე ქსელის ყველა ელემენტის ურთიერთმოქმედებას, ე.ი. „ბოლოდან ბოლომდე“ ("end-to-end", "e2e"). QoS ნებისმიერი გარანტია იმდენად შეესაბამება სინამდვილეს, რამდენადაც მათ უზრუნველყოფს ყველაზე „სუსტი“ ელემენტი რგოლში გამგზავნიდან მიმღებამდე. ამიტომ საჭიროა მკაფიოდ გაგება იმისა რომ QoS უზრუნველყოფა ერთ საქსელო მოწყობილობაში, თუნდაც მაგისტრალურში, მხოლოდ უმნიშვნელოდ გააუმჯობესებს მომსახურების ხარისხს ან საერთოდ ვერ მოახდენს გავლენას QoS პარამეტრებზე.

BWN ქსელებში QoS მექანიზმების უზრუნველყოფის რეალიზაცია შედარებით ახალ ტენდენციას წარმოადგენს. დიდი ხნის განმავლობაში კომპიუტერული ქსელები არსებობდნენ ასეთი მექანიზმების გარეშე. ეს ძირითადად ორი მიზეზით აიხსნება:

- ✓ ჯერ ერთი, უმეტესი გამოყენებები, ქსელის მიერ რეალიზებული, არ იყვნენ “მომთხოვნები” დაყოვნებების მიმართ, ე.ი. ასეთი გამოყენებებისათვის პაკეტების დაყოვნება ან გადახრა საშუალო გამტარუნარიანობისაგან საკმაოდ დიდ დიაპაზონში არ იწვევდა მათი ფუნქციონირების მნიშვნელოვან ცვლილებას. არა მოთხოვნადი

გამოყენების მაგალითებს წარმოადგენენ XX საუკუნის 80-იანი წლების ქსელებში გავრცელებული გამოყენებები: ელექტრონული ფოსტა და ფაილების დისტანციური კოპირება;

- ✓ მეორეც, 10-მეგაბიტიანი ქსელების (Ethernet) გამტარუნარიანობა უმეტეს შემთხვევაში არ იყო დეფიციტური. ასე, Ethernet-ის გაყოფადი სეგმენტი, რომელთანაც მიერთებული იყო 10-20 კომპიუტერი, რომლებიც იშვიათად ასორციელებდნენ მცირე ზომის ტექსტური ფაილების კოპირებას, რომელთა მოცულობაც არ აღემატებოდა რამდენიმე ასეულ კილობაიტს, საშუალებას აძლევდა ურთიერთმოქმედი კომპიუტერების წყვილებს, ქსელი გადაეკვეთათ ისეთი სისწრაფით, როგორსაც მოითხოვდა მათი წარმომშობი ტრაფიკის დანართი.

ამის შედეგად, უმეტესი ქსელები მუშაობდნენ ტრანსპორტირების იმ ხარისხით, რომელიც უზრუნველყოფდა გამოყენებათა მოთხოვნებს. მართალია, კვანძებს შორის გადაცემული პაკეტების დაყოვნების ან გამტარუნარიანობის არავითარ გარანტიას გარკვეულ ზღვარებში ეს ქსელები არ იძლეოდნენ. უფრო მეტიც, ქსელების დროებითი გადატვირთვებისას, როდესაც კომპიუტერთა მნიშვნელოვანი ნაწილი მაქსიმალური სიჩქარით იწყებდა გადაცემას, დაყოვნებები და გამტარუნარიანობა ისეთი მნიშვნელობით დგებოდა, რომ გამოყენების მუშაობა იძლეოდა შეფერხებას – ხორციელდებოდა მეტისმეტად ნელა, სესიათა წყვეტით და ა.შ.

არსებობს ორი ძირითადი მიდგომა ქსელის ხარისხიანი მუშაობის უზრუნველსაყოფად. პირველი მიდგომარეობს იმაში, რომ ქსელი გარანტიას აძლევს მომხმარებელს დაიცვას მომსახურების ხარისხის უზრუნველყოფის გარკვეული რიცხვითი მნიშვნელობა. მაგალითად, ქსელები Frame relay და ATM გარანტიას აძლევენ მომხმარებელს უზრუნველყონ გამტარუნარიანობის დათქმული დონე. მეორე მიდგომით ქსელი ცდილობს შესაძლებლობის მიხედვით უფრო ხარისხიანად მოემსახუროს მომხმარებელს, მაგრამ არაფრის გარანტიას არ აძლევს მას [63, 64].

სატრანსპორტო სერვისმა, რომელსაც აწვდიან ასეთი ქსელები, მიიღო სახელწოდება "best effort", ე.ი. სერვისი „მაქსიმალური

პირობებით“ (ან „შესაძლებლობის მიხედვით“). ქსელი ცდილობს მაქსიმალურად სწრაფად დაამუშაოს შემოსული ტრაფიკი, იმავდროულად, არავითარ გარანტიას არ იძლევა შესაძლო შედეგების მიმართ. მაგალითად შეიძლება გამოდგეს უმეტესი ტექნოლოგიები დამუშავებული გასული საუკუნის 80-იან წლებში: Ethernet, Token Ring, IP, X.25 [48, 65]. სერვისი „მაქსიმალური პირობებით“ დაფუძნებულია რიგების დამუშავების გარკვეულ სამართლიან ალგორითმზე, რომელიც წარმოიშობა ქსელების გადატვირთვის დროს, როდესაც გარკვეული დროის განმავლობაში ქსელში პაკეტების შემოსვლის სიჩქარე აჭარბებს ამ პაკეტების გადაადგილების სიჩქარეს.

უმარტივეს შემთხვევაში რიგების დამუშავების ალგორითმი ყველა ნაკადის პაკეტებს განიხილავს როგორც თანაბარუფლებიანებს და გადაადგილებს მათ შემოსვლის რიგის მიხედვით (First In — First Out, FIFO). ამ შემთხვევაში, როდესაც რიგი ზედმეტად იზრდება (ვერ ეტევა ბუფერში), პრობლემა „გვარდება“ მარტივად - ახლად შემოსული პაკეტების გადაყრით (უგულვებულოვით).

ცხადია, სერვისი „მაქსიმალური პირობებით“ უზრუნველყოფს მომსახურებას მისაღები ხარისხით მხოლოდ იმ შემთხვევებში, როდესაც ქსელის წარმადობა ბევრჯერ უფრო მეტია საშუალო მოთხოვნაზე, ე.ი. სიჭარბის შემცველია. ასეთ ქსელში გამტარუნარიანობა დატვირთვის პიკური მნიშვნელობების დროსაც კი საკმარისია. ასევე ცხადია, რომ ასეთი გადაწყვეტილება არაეკონომიურია – უკიდურეს შემთხვევაში თანამედროვე ტექნოლოგიების გამტარუნარიანობისა და ინფრასტრუქტურის მიმართ, განსაკუთრებით გლობალური ქსელებისათვის. მიუხედავად ამისა, ქსელების აგება ჭარბი გამტარუნარიანობით, როგორც მომსახურების საჭირო დონის უზრუნველყოფის უმარტივესი საშუალება, პრაქტიკაში ზოგჯერ მაინც გამოიყენება. მაგალითად, TCP/IP ქსელების მომსახურების ზოგიერთი პროვაიდერი იძლევა ხარისხიანი მომსახურების გარანტიას, იმით, რომ მუდმივად უზრუნველყოფს თავისი მაგისტრალების გამტარუნარიანობის მეტ დონეს შედარებით კლიენტთა მოთხოვნებთან.

2.2. VoIP ქსელებში მომსახურების ხარისხის განსაზღვრა

VoIP ქსელებში მომსახურების ხარისხის განსაზღვრის დროს აუცილებელია გათვალისწინებულ იქნეს, რომ მოთხოვნები ქსელის მახასიათებლების მიმართ სხვადასხვაა გამოყენების სახის მიხედვით. მოთხოვნები მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან მონაცემებისა და ბგერითი სიგნალების გადაცემის დროს. მაგალითად, მონაცემთა დიდი მასივების გადაცემის დროს აუცილებელია სიხშირის დიდი ზოლი, მონაცემები კრიტიკულები არიან დანაკარგების მიმართ და ამავე დროს შეიძლება სულ არ იყვნენ კრიტიკულები დაყოვნების მიმართ. ამის საწინააღმდეგოდ, VoIP გამოყენების დროს, მოეთხოვება შედარებით მცირე საქსელო რესურსები, მაგრამ ეს გამოყენება კრიტიკულია როგორც დაყოვნებების, ასევე მათი ვარიაციებისადმი, და ნაკლებად მგრძობიარენი (მონაცემების გადაცემასთან შედარებით) დანაკარგების მიმართ. მაშინაც კი, როდესაც მონაცემები და ბგერითი სიგნალები გადაიცემა ერთი და იგივე ქსელით, ხმოვანი ტრაფიკი და მონაცემების ტრაფიკი არ შეიძლება ერთნაირად იქნეს დამუშავებული მთელი რიგი მიზეზების გამო, მათ შორის:

- ✓ ბგერით და მონაცემების პაკეტებს განსხვავებული სიგრძე გააჩნიათ;
- ✓ ბგერითი და მონაცემების პაკეტები სხვადასხვა სიჩქარეებით გადაიცემა;
- ✓ ბგერითი და მონაცემების პაკეტები კვანძებში დამუშავდებიან და მომხმარებელს მიეწოდებიან სხვადასხვა მექანიზმისა და პროტოკოლების გამოყენებით;
- ✓ ელექტრონული ფოსტის შეტყობინებები და მონაცემთა მასივები შეიძლება დაყოვნდნენ რამდენიმე წუთითაც კი მომსახურების ხარისხის შეფასებაზე მნიშვნელოვანი გავლენის გარეშე, მაშინ როდესაც VoIP ტექნოლოგიის გამოყენების შემთხვევაში რამდენიმე მლწმ-მა დაყოვნებებმაც კი შეიძლება წარმოშვან ბგერითი სიგნალების მნიშვნელოვანი დამახინჯებები.

VoIP გამოყენების დროს საწყის მოთხოვნას წარმოადგენს ის, რომ ლაპარაკის ხარისხი VoIP-ით გადაცემისას არ უნდა იყოს იმაზე

ნაკლები, როგორცაა საერთო დანიშნულების სატელეფონო ქსელებში [66]. აღვნიშნავთ, რომ ხარისხის დონეს საერთო დანიშნულების სატელეფონო ქსელებში ზოგჯერ საერთაშორისო შეერთების ხარისხის დონეს უწოდებენ და იგი წარმოადგენს უმაღლეს დონეს ელექტროკავშირის ქსელებში. როგორც ცნობილია, მომსახურების ხარისხი განისაზღვრება საქსელო პარამეტრების კრებულით, რომლის შემადგენლობაშიც შედის - ქსელის გამტარუნარიანობა, ქსელის/საქსელო მოწყობილობების იმედიანობა, პაკეტების გადაცემის დაყოვნება, დაყოვნების ვარიაციები (ე.წ. ჯიტერი) და პაკეტების დანაკარგები.

უკანასკნელ დრომდე კავშირის ქსელებით ლაპარაკის გადაცემის ხარისხის განმსაზღვრელი შეთანხმებული რაოდენობითი შეფასებები, იმის გათვალისწინებით, თუ როგორ აღიქვამს მას მომხმარებელი, არ არსებობდა. თავდაპირველად ელექტროკავშირის საერთაშორისო ორგანიზაციის (ITU) მიერ შემოთავაზებულ იქნა (რეკომენდაცია ITU P.800) მიდგომა, რომლის საფუძველში ჩადებული იყო ლაპარაკის გადაცემის ხარისხის სუბიექტური შეფასებები (ისეთები, როგორებიცაა მაღალი ხარისხი, კარგი ხარისხი, მისაღები ხარისხი და ა.შ.). სუბიექტური შეფასებები, სამწუხაროდ, ვერ იქნებიან შეჯერებული საქსელო მახასიათებლებთან, რომლებიც გამოიყენებიან ქსელების პროექტირებისა და ექსპლუატაციის დროს. ასევე შეუძლებელია მათი შეჯერება იმ პროცესებთან, რომელთა რეალიზებაც ხორციელდება სატერმინალ მოწყობილობებით (ე.ი. ქსელგარეთა მოწყობილობებით). აქ საქმე ეხება შეკუმშვის ალგორითმებს, კოდირების სქემებს, ინფორმაციის დაცვისა და აღდგენის მექანიზმებს და სხვ.

მიუხედავად ამისა, სუბიექტური შეფასებები გამოყენებას პოულობდნენ მთელი რიგი წლების განმავლობაში, როგორც ერთადერთი მიდგომა სატელეფონო ქსელებში ლაპარაკის ხარისხის შეფასებისათვის. ამ მიდგომას გარკვეული დონით დღემდე აქვს შენარჩუნებული თავისი მნიშვნელობა. 1998 წელს ITU განახორციელა მომსახურების ხარისხის ობიექტურ შეფასებებზე დაფუძნებული მიდგომის სტანდარტიზირება. ის საშუალებას იძლევა აღწერილ იქნეს ხარისხობრივი მახასიათებლები ბგერითი სიგნალების პაკეტური

ფორმით გადაცემის დროს (რეკომენდაცია ITU G.107). შემდგომ განხილულ იქნება ორივე მიდგომა, მაგრამ ძირითადი ყურადღება დაეთმობა G.107 რეკომენდაციის ანალიზს.

2.3. მომსახურების ხარისხის სუბიექტური შეფასება ლაპარაკის გადაცემის დროს

აუდიო და ვიდეო ინფორმაციის ხარისხის პირველად კრიტერიუმს წარმოადგენს მომსახურების ხარისხის აღქმა (პერცეფცია) მომხმარებლის მიერ. მომსახურების ხარისხის განსაზღვრა შეიძლება დაფუძნებული იყოს როგორც სუბიექტურ, ასევე ობიექტურ შეფასებებზე. უპირატესად გამოყენებული სუბიექტური შეფასების მეთოდი აღწერილია რეკომენდაციაში ITU P.800, როგორც ზემოთ იყო მოხსენიებული და ცნობილია როგორც MOS (Mean Opinion Score) მეთოდი [67]. MOS მეთოდის შესაბამისად, ლაპარაკის ხარისხი, მიღებული სიგნალის გავლისას სისტემაში მოლაპარაკიდან (წყარო) მსმენელამდე (მიმღები), ფასდება როგორც არითმეტიკულად საშუალო ყველა შეფასებისა, წარმოდგენილი ექსპერტების მიერ გადაცემის ტესტირებადი ტრაქტის მოსმენის შემდეგ.

საექსპერტო შეფასებები განისაზღვრება ხუთბალიანი სკალის შესაბამისად: 5 – ფრიადი, 4 – კარგი, 3 – მისაღები, 2 – ცუდი, 1 - მიუღებელი. ექსპერტთა შეფასება 3,5 და მეტი ბალი – შეესაბამება სტანდარტულსა და მაღალ სატელეფონო ხარისხს; 3,0 – 3,5 ბალი – მისაღებია; 2,5 – 3,0 ბალი – სინთეზირებული ხმის შესაბამისია. ლაპარაკის კარგი ხარისხით გადაცემისათვის მიზანშეწონილია ორიენტირება MOS შეფასების 3,5 და მეტ ბალზე.

მართალია, MOS მოდელი დაფუძნებულია სუბიექტურ შეფასებებზე, მაგრამ მაინც წარმოადგენს შეფასების საიმედო ინსტრუმენტს სატელეფონო ქსელებში. ამავე დროს, დაკავშირებულია ამ შეფასებების მიღების დიდ დანახარჯებთან – როგორც დროსი, ასევე ფინანსების მხრივ. ამას გარდა, ლაპარაკის გადაცემისათვის პაკეტური ქსელებით, MOS მოდელის პირდაპირ გამოყენებას, რომელიც დამუშავებულია სატელეფონო ქსელებისათვის, ახლავს გარკვეული პრობლემები. ბუნებრივია, რომ ეს მოდელი არ ითვალისწინებს

მოვლენათა მთელ რიგს, ტიპიურს მონაცემთა გადაცემის ქსელისათვის და რომლებიც გავლენას ახდენენ ლაპარაკის ხარისხზე VoIP სისტემებში. MOS მოდელში არ არის შესაძლებელი გათვალისწინებულ იქნეს ლაპარაკის ხარისხზე მოქმედი ფაქტორები. კერძოდ არ მიიღება მხედველობაში:

- ✓ გამჭოლი (end-to-end) დაყოვნება ტელეფონით მოლაპარაკეებს შორის;
- ✓ დაყოვნების ვარიაციების, ჯიტერის, გავლენა;
- ✓ პაკეტების დანაკარგების გავლენა.

ამას გარდა, MOS მოდელი იძლევა ერთი მიმართულებით შეერთების ხარისხის შეფასებას და არა რეალური ორი მიმართულებით სატელეფონო შეერთებებისას. ყოველივე ამან მოითხოვა ბგერითი სიგნალების გადაცემის ხარისხის შეფასების ახალი მოდელის დამუშავება, რომლებიც გაითვალისწინებდნენ პაკეტური გადაცემის თავისებურებებს [68, 69].

2.4. მომსახურების ხარისხის ობიექტური შეფასება ლაპარაკის გადაცემის დროს პაკეტურ ქსელებში

ზემოთ მითითებული უარყოფითი მხარეების აღმოფხვრის მიზნით ITU 1998 წ. მიიღო რეკომენდაცია ITU G.107, რომელშიც აღწერილია მიდგომა ტელეკომუნიკაციაში მომსახურების ობიექტური შეფასებისათვის. მიდგომის საფუძველში ჩადებულია ე.წ. E-მოდელი, რომელმაც გახსნა ახალი მიმართულება მომსახურების ხარისხის შეფასებაში, დაკავშირებული ტერმინალებისა და ქსელების მახასიათებლების გაზომვებთან.

E-მოდელის შექმნის შემდეგ ჩატარებულ იქნა გამოცდების დიდი რიცხვი, რომლებშიც იცვლებოდა საქსელო ფაქტორების დამახინჯებების ზემოქმედების დონეები. ამ ტესტების მონაცემები გამოყენებულ იქნა E-მოდელში ობიექტური შეფასებების გამოსათვლელად. გამოთვლის შედეგს, E-მოდელის შესაბამისად, წარმოადგენს რიცხვი, რომელსაც R-ფაქტორი ეწოდება (ე.წ. რეიტინგის კოეფიციენტი).

R-ფაქტორის მნიშვნელობები ცალსახად შეესაბამებიან MOS მოდელის შეფასებებს (ცხრ. 2.1 და ნახ. 2.1).

E-მოდელის შესაბამისად R-ფაქტორი განისაზღვრება მნიშვნელობათა დიაპაზონში - 0-დან 100-მდე, სადაც 100 შეესაბამება ხარისხის ყველაზე მაღალ დონეს. R-ფაქტორის ანგარიშის დროს მხედველობაში მიიღება 20 პარამეტრი. ამ პარამეტრების შემადგენლობაში შედიან:

- ✓ ერთმიმართულებიანი დაყოვნება;
- ✓ პაკეტების დაკარგვის კოეფიციენტი;
- ✓ მონაცემების დანაკარგი ჯიტერის ბუფერის გადავსების გამო;
- ✓ დამახინჯებები, შეტანილი ანალოგური სიგნალის ციფრულად გარდაქმნის და შემდგომი შეკუმშვის (სიგნალების დამუშავება კოდებებში) პროცესებში;
- ✓ ექოს გავლენა და სხვ.

ცხრილი 2.1

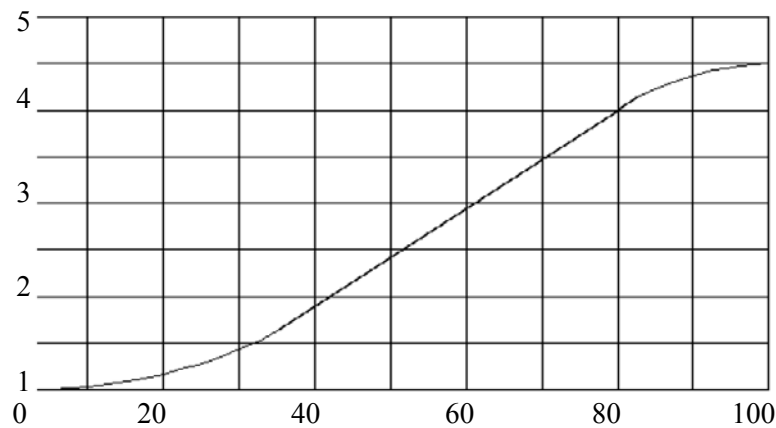
QoS შეფასება R-ფაქტორისა და MOS მოდელის მიხედვით

R-ფაქტორის მნიშვნელობა	ხარისხის კატეგორია და მომხმარებლის შეფასებები	MOS შეფასების მნიშვნელობა
90<R<100	ყველაზე მაღალი (ფრიადი)	4,34 – 4,50
80<R<90	მაღალი (კარგი)	4,03 – 4,34
70<R<80	საშუალო (მისაღები; მომხმარებელთა ნაწილი აფასებს, როგორც არადამაკმაყოფილებელი)	3,60 – 4,03
60<R<70	დაბალი (ცუდი; მომხმარებელთა ნაწილი აფასებს, როგორც არადამაკმაყოფილებელი)	3,10 – 3,60
50<R<60	მიუღებელი (არ არის რეკომენდირებული)	2,58 – 3,10

ამგვარად, E-მოდელი და R-ფაქტორი შეიძლება გამოყენებულ იქნენ ლაპარაკის გადაცემის ობიექტური შეფასებისათვის VoIP ტექნოლოგიაში [70]. როგორც კი R-ფაქტორი იქნება მიღებული, შეიძლება გამოითვალოს შესაბამისი MOS შეფასებები. R-ფაქტორის გამოთვლა იწყება შემთხვევისათვის, როდესაც სიგნალის დამახინჯება არხში არ არის გათვალისწინებული და მხედველობაში მიიღება დამახინჯებები, რომელთაც აქვთ ადგილი რეალური ლაპარაკის

ელექტრულ სიგნალად გარდაქმნის დროს (და პირიქით). R-ფაქტორის თეორიული მნიშვნელობა მცირდება 100-დან 93,2-მდე, რომელიც შეესაბამება MOS შეფასების მნიშვნელობას – 4,4. ამგვარად, E-მოდელის გამოყენების დროს შეფასება 4,4 MOS სისტემაში წარმოადგენს ლაპარაკის მაქსიმალურ შესაძლო შეფასებას ქსელებში დამახინჯების გარეშე.

შეფასებები MOS მოდელის მიხედვით



შეფასებები R-ფაქტორით

ნახ. 2.1. დამოკიდებულება MOS მოდელისა და R- ფაქტორის შეფასებებს შორის

R-ფაქტორის სიდიდე იცვლება 0-დან 93,2-მდე, რაც შეესაბამება MOS-ის შეფასებას - 1-დან 4,4-მდე. R-ფაქტორის მნიშვნელობა განისაზღვრება ფორმულით:

$$R = R_0 - I_s - I_d - I_e + A,$$

სადაც

- $R_0 = 93,2$ - R-ფაქტორის საწყისი მნიშვნელობაა;
- I_s - კოდებისა და ხმაურის მიერ არხში შეტანილი დამახინჯებებია;
- I_d - დამახინჯებებია ქსელში ჯამური გამჭოლი დაყოვნების (ბოლოდან-ბოლომდე) ხარჯზე;
- I_e - დამახინჯებებია, შეტანილი მოწყობილობებით, პაკეტების დანაკარგების ჩათვლით;
- A - ე.წ. უპირატესობის ფაქტორია. მაგალითად, მობილური მომხმარებლები შეიძლება დათანხმდნენ ხარისხის დაბალ დონეს, თუ მიიღებენ სხვა რამ დამატებით

მოხერხებულობას. R-ფაქტორის გამოთვლის უმეტეს შემთხვევაში A პარამეტრი მიიღება ნულის ტოლად.

2.5. ფაქტორების ანალიზი, რომლებიც გავლენას ახდენენ ლაპარაკის ხარისხზე პაკეტურ ქსელებში

2.5.1. კოდეების გავლენა პაკეტიზირებული ლაპარაკის ხარისხზე

R-ფაქტორის ანგარიშის დროს ერთ-ერთი მდგენელი ის, რომელიც ამცირებს R-ფაქტორის მნიშვნელობას, განისაზღვრება კოდეკში ბგერითი სიგნალის პაკეტიზაციის დროს წარმოშობილი დამახინჯებებით. პაკეტური კომუტაციის ქსელებში გადაცემული ლაპარაკის ხარისხი უკანასკნელი წლების განმავლობაში მნიშვნელოვნად გაუმჯობესდა ეფექტური კოდეების შექმნის გზით, რომლებიც უზრუნველყოფენ ბგერითი სიგნალების კარგ გარკვეულობას მიმღებ მხარეს. ამავე მიზნით დამუშავებულ იქნა მრავალი მეთოდი და მექანიზმი, მათ შორის:

- ✓ ლაპარაკის ეფექტური კოდირების მეთოდები (ITU რეკომენდაციები G.7xx სერიის);
- ✓ პაუზების დაძლევის მექანიზმები (ლაპარაკის კოდირების მექანიზმი წყვეტადი გადაცემის დროს, ცნობილი როგორც Voice Activity Detection, VAD);
- ✓ ექოს ჩახშობისა (რეკომენდაცია ITU G.164) და ექოს კომპენსაციის (რეკომენდაციები ITU G.165 და G.168) მექანიზმები;
- ✓ შეცდომათა შენიღბვის მეთოდები (packet loss concealment), რომლებმაც უზრუნველყოფენ სალაპარაკო ნაკადში, ცალკეული პაკეტის დაკარგვით, გამოწვეული პრობლემის კომპენსაციას.

2.5.2. სალაპარაკო კოდეების მახასიათებლები

აუდიო და ვიდეო ინფორმაციის დამუშავებისას გამოიყენება სპეციალური მოწყობილობა – კოდეკი. გადამცემ მხარეს კოდეკი ანალოგურ სიგნალს გარდაქმნის ციფრულად, ხოლო მიმღებ მხარეს ასრულებს უკუ გარდაქმნას – ციფრულ სიგნალს გარდაქმნის ანალოგურად. სადღეისოდ არსებობს სხვადასხვა მახასიათებლიანი

ეფექტური კოდეების დიდი რაოდენობა. ცხრ. 2.2-ში წარმოდგენილია ITU-ს სტანდარტების შესაბამისი კოდეების მახასიათებლები.

ცხრილი 2.2

სალაპარაკო კოდეების ტიპები და მათი მახასიათებლები

კოდეი	გადაცემის სიჩქარე, კბიტ/წმ	დატარების ხანგრძლივობა, მწმ	პაკეტიზაციის დაყოვნება, მწმ	ორმომართულიანი კავშირისთვის გამტარიანობის ზოლი, კპც	დაყოვნება ჯოტერის ბუფერში	MOS თეორიული მაქსიმალური შეფასება
G.711u	64	20	1	174,4	2 დატარება, 40 მწმ	4,4
G.711a	64	20	1	174,4	2 დატარება, 40 მწმ	4,4
G.726-32	32	20	1	110,4	2 დატარება, 40 მწმ	4,22
G.729	8	20	25	62,4	2 დატარება, 40 მწმ	4,07
G.723m	6,3	30	67,5	43,73	2 დატარება, 60 მწმ	3,87
G.723a	5,3	30	67,5	41,6	2 დატარება, 60 მწმ	3,69

ისტორიულად პირველი კოდეის ტიპია G.711 (ვერსია G.711a და G.711u, კოდეის გამოსავალი სიგნალის სიჩქარეა 64 კბიტ/წმ). იგი გარდაქმნის ანალოგურ სიგნალს ციფრულად მეტად მაღალი ხარისხით და შეკუმშვების გამოყენების გარეშე. მაგრამ, იმავ დროულად არხისაგან მოითხოვს მნიშვნელოვნად მეტ გამტარუნარიანობას, ვიდრე ამას მოითხოვენ ის კოდეები, რომლებიც ახორციელებენ შეკუმშვის პროცედურებს.

პირველი კოდეების შექმნის დროს (XX საუკუნის 70-იანი წ.წ.) თანამედროვე ციფრული პროცესორების ტექნოლოგია (Digital Signal Processing - DSP) არ იყო ხელმისაწვდომი. სადღესოდ DSP-ს ბაზაზე შესაძლებელია მეტად ეფექტური კოდეის შექმნა, რომელსაც გაცილებით უფრო ნაკლები მოთხოვნა ექნება გადამცემი ტრაქტის გამტარუნარიანობის მიმართ.

დაბალსიჩქარიანი კოდეკები გაცილებით ნაკლებ გამტარუნარიანობას მოითხოვენ, მაგრამ გაცილებით მეტ გავლენას ახდენენ ბგერითი სიგნალების ხარისხზე მაღალსიჩქარიან კოდეკებთან შედარებით, რაც განსაზღვრულია დანაკარგებით შეკუმშვის მაღალი კოეფიციენტების პირობებში.

შემცირებული გამტარუნარიანობის მოთხოვნა ნიშნავს იმას, რომ შეიძლება ორგანიზებულ იქნეს მეტი სატელეფონო შეერთება ერთი და იგივე ტრაქტით, მაგრამ ამ დროს მცირდება ლაპარაკის გარჩევადობა, იზრდება დაყოვნება და ლაპარაკის ხარისხი მგრძნობიარე ხდება პაკეტების დაკარგვის მიმართ.

ცხრ. 2.3 წარმოდგენილია ლაპარაკის ხარისხის შეფასება R-ფაქტორის ბაზაზე და MOS-მოდელის ბაზაზე ITU-ს ზოგიერთი ტიპის კოდეკისათვის.

ცხრილი 2.3

ლაპარაკის ხარისხი სხვადასხვა ტიპის კოდეკისათვის (შეფასებები R-ფაქტორისა და MOS-მოდელის ბაზაზე)

კოდეკი	გადაცემის სიჩქარე, კბიტ/წმ	R-ფაქტორი	MOS
G.711	64	93,2	4,4
G.729	8	82,2	4,1
G.723.1m	6,3	78,2	3,9
G.723.1a	5,3	74,2	3,7

2.5.3. დაყოვნებები და ჯიტიერი IP ქსელებში

პაკეტების მიწოდების დაყოვნება. პაკეტების მიწოდების დაყოვნება განისაზღვრება პაკეტების გადატანის დროით წყაროდან მიმდებამდე. დაყოვნების დრო იცვლება ქსელის ტრაფიკთან და გამოყენებული საქსელო რესურსებთან დამოკიდებულებით. კერძოდ, ქსელის გამტარუნარიანობით. ლაპარაკი წარმოადგენს ტრაფიკს, რომელიც მგრძნობიარეა დაყოვნებების მიმართ, მაშინ როდესაც მონაცემების გადაცემების გამოყენების უმეტესობა შედარებით მდგრადია დაყოვნების მიმართ. თუ პაკეტის მიწოდების დაყოვნება აჭარბებს გარკვეულ მნიშვნელობას ასეთი პაკეტი უკუივდება. ამის შედეგად, დიდი რაოდენობის პაკეტების უკუგდების გამო, ლაპარაკის ხარისხი უარესდება, რაც ასახულია კიდევ ზემოთ მოყვანილ R-

ფაქტორის ფორმულაში, სადაც დაყოვნების გავლენა გათვალისწინებულია ld მდგენელის მიხედვით.

ბუნებრივად გამოიყურება კითხვა: როგორი დაყოვნებაა დასაშვები ლაპარაკის პაკეტური გადაცემის დროს? ბგერითი სიგნალების გამოკვლევების შედეგად, ჯერ კიდევ XX საუკუნის 60-იან წ.წ. დადგინდა იქნა, რომ ადამიანი იწყებს ბგერითი სიგნალის ხარისხის გაუარესების შეგრძნობას, თუ დაყოვნება აღემატება 150 მწმ და გრძობს შესამჩნევ დისკომფორტს, თუ დაყოვნება აღემატება 250 მწმ. მოგვიანებით, ITU მხარდაჭერით, ჩატარებულ იქნა მასშტაბური კვლევები სატელეფონო ლაპარაკის ხარისხზე საქსელო დაყოვნების გავლენის გამოსაკვლევად. ამ კვლევის შედეგებმა თავისი ასახვა ჰპოვეს რეკომენდაციაში ITU G.114, რომლის მიხედვითაც რეკომენდირებული დაყოვნების ზღვარი ლაპარაკის გადაცემის დროს ტოლია 150 მწმ-ის. 300 მწმ დაყოვნების დროს ლაპარაკი იყოფა ფრაგმენტებად, რომელთა შეკავშირებაც შერწყმულ ლაპარაკად შეუძლებელია [71].

განვიხილოთ, თუ რა ფაქტორები განსაზღვრავენ პაკეტების მიწოდების დაყოვნების ჯამურ სიდიდეს. პაკეტების გამჭოლი მიწოდების დაყოვნება $D_{მიწ}$ („ბოლოდან ბოლომდე“) განისაზღვრება ოთხი მდგენელის ჯამით:

$$D_{მიწ} = D_{გავ} + D_{კდ} + D_{კგ} + D_{ჯბ}$$

სადაც

$D_{გავ}$ – ელექტრული სიგნალის გავრცელების დაყოვნებაა: ლითონის ან ოპტიკურ-ბოჭკოვან კაბელში, ანდა უგამტარო გარემოში გავრცელების დროა. ეს დრო დამოკიდებულია ფიზიკურ მანძილზე ქსელის შესასვლელ და გამოსასვლელ წერტილებს შორის. როგორც ცნობილია, ვაკუუმში სიგნალის გავრცელების დრო დაახლოებით 3,3 მკწმ-ია ერთ კილომეტრ მანძილზე; ლითონის კაბელის შემთხვევაში ეს დრო შეადგენს დაახლოებით 5 მკწმ-ს; ოპტიკურ-ბოჭკოვან კაბელში დაახლოებით 4 მკწმ-ს. მოვიყვანოთ დაყოვნების რეალური მაგალითები პრაქტიკიდან. მაგალითად, კავშირის სეანსისას თანამგზავრული სისტემის გამოყენებით, როდესაც თანამგზავრი

40 ათკმ სიმაღლეზეა (GEO ორბიტაზეა), სიგნალის დაყოვნებამ ორ მიწისპირა სადგურს შორის შეიძლება შეადგინოს 260 მწმ-ის რიგის სიდიდე; 9100 კმ სიგრძის (მიწისპირა კავშირის ხაზის საშუალო სიგრძე) ლითონის კაბელით სიგნალების გადაცემის დაყოვნება 50 მწმ-დეა, ხოლო ოპტიკურ-ბოჭკოვან კაბელის გამოყენებისას - 40 მწმ.

D_{კდ} – პაკეტიზაციის დაყოვნება: დრო, რომელიც იხარჯება კოდეკში ანალოგური სიგნალის ციფრულ სიგნალად გარდასაქმნელად და პაკეტის ფორმირებისათვის. როგორც ცხრ. 2.2-დან ჩანს, რაც უფრო მცირეა სიგნალის სიჩქარე კოდეკის გამოსავალზე, მიტ უფრო მეტია პაკეტიზაციის დაყოვნება, ვინაიდან კოდეკი მეტ დროს ხარჯავს სიგნალის კომპრესიისა და დეკომპრესიის პროცესებზე. მაგალითად, კოდეკი G.711 პაკეტიზაციაზე მხოლოდ 1 მწმ-ს ხარჯავს, მაშინ როდესაც კოდეკ G.723-ს 67,5 მწმ სჭირდება.

D_{კგ} – პაკეტის გადატანის დაყოვნება: დრო, რომელიც საჭიროა პაკეტის გასავლელად ქსელის ყველა მოწყობილობაში, რომლებიც განლაგებულნი არიან მოცემული პაკეტის გადაცემის გზაზე; ის მოიცავს მარშრუტიზატორებს, რაბებს, საქსელო ეკრანებს, ტრაფიკის დამმუშავებლებს, ქსელის სეგმენტებს ნაკლები გამტარუნარიანობით და ა.შ. ზოგიერთი მოწყობილობისათვის, მაგალითად სინქრონული მულტიპლექსორისათვის, ეს სიდიდე მუდმივია, სხვებისთვის კი, მაგალითად, როგორცაა მარშრუტიზატორი, გადატანის დაყოვნება ცვლადია და დამოკიდებული ქსელის დატვირთვაზე.

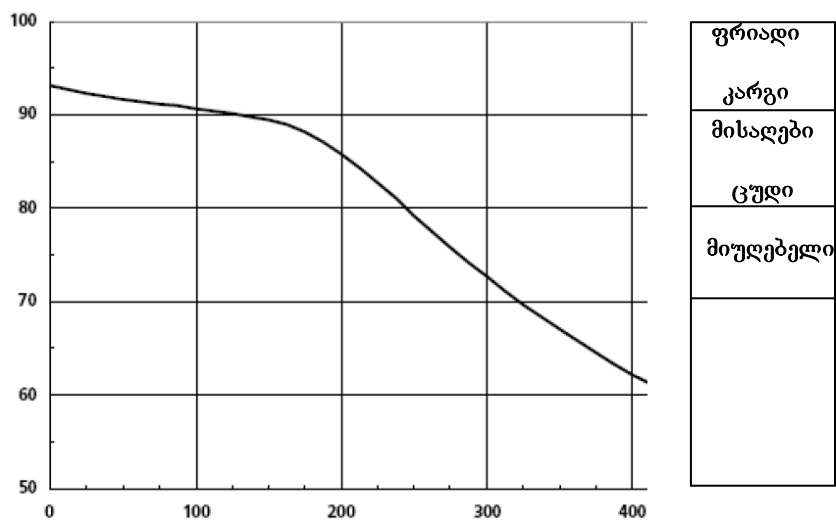
D_{კზ} – დაყოვნება მიმღებ მხარეს ჯიტერის ბუფერში: დრო, რომლის განმავლობაშიც პაკეტი ყოვნდება ჯიტერის ბუფერში, რათა შემცირებულ იქნეს, მიმღები მოწყობილობის შესავალზე, პაკეტების შემოსვლის მომენტების ვარიაციები. ცხრ. 2.2-ის მონაცემების შესაბამისად ჯიტერის ტიპური ბუფერი აგროვებს ორ დატავრამას და დაყოვნება ჯიტერის ბუფერში შეიძლება იყოს 20-დან 30-მდე მწმ კოდეკის ტიპის და მიხედვით.

ცხადია, რომ გავრცელების დაყოვნება, დაყოვნება კოდებსა და ჯიტერის ბუფერში პაკეტის გავრცელების შერჩეული გზისათვის მუდმივ სიდიდეს წარმოადგენს, მაშინ როდესაც გადატანის დაყოვნება შემთხვევითი სიდიდეა და დამოკიდებულია კონკრეტულ მომენტში ქსელში არსებულ პირობებზე.

განვიხილოთ რა ინტერნეტ ქსელებში პაკეტების დაყოვნების მრავალი შესაძლო შემთხვევა, მივედით იმ დასკვნამდე, რომ პაკეტების დაყოვნების დრომ ადვილად შეიძლება გადააჭარბოს ITU დადგენილ ზღვრულ სიდიდეს: 150 მწმ-ს. ამის ძირითადი მიზეზებია: გადატვირთვები, პაკეტიზაციის პროცესები და ბუფერის არსებობა ჯიტერის სისტემაში.

ნახ. 2.2-ზე ნაჩვენებია როგორ გავლენას ახდენენ დაყოვნებები R-ფაქტორზე და MOS-მოდელის მაჩვენებლებზე.

R-ფაქტორი



დაყოვნება, მწმ

დაყოვნება	0	50	100	150	200	250	300	350	400
R-ფაქტორი	93.19	91.74	90.65	89.53	85.79	79.17	72.66	67.02	62.24

ნახ. 2.2. ჯამური დაყოვნების სიდიდის ზეგავლენა R-ფაქტორსა და MOS შეფასებაზე

პაკეტის მიწოდების დაყოვნების ვარიაციები (ჯიტერი). ტერმინი „ჯიტერი“ გამოიყენება მიმდევრობითი სალაპარაკო პაკეტების მიმღებში შემოსვლის მომენტების შემთხვევითი ცვლილებების აღსანიშნავად. ჯიტერი განპირობებულია მრავალრიცხოვანი მიზეზებით, მათ შორის

ქსელის კვანძებში რიგების სიგრძეების განსხვავებულობით, პაკეტების, რომლებიც დანიშნულების პუნქტში შემოდინ მიმდევრობის დარღვევით მათი ქსელში გადაადგილების პროცესში, დამუშავების დროის ვარიაციით, ქსელში მონაცემების იმ ტრაფიკის არსებობით, რომელიც კონკურენციას უწევს სალაპარაკო ტრაფიკს, ქსელის საერთო რესურსებთან შეღწევის დროს. როდესაც დანიშნულების პუნქტში სალაპარაკო პაკეტების შემოსვლა არარეგულარული ხდება, ამას მიყვარათ ბგერითი სიგნალების დამახინჯებამდე და ჯიტერის დიდი მნიშვნელობის დროს, როდესაც ის აჭარბებს რამდენიმე მილიწამს, ლაპარაკი არაგარჩევადი ხდება.

2.6. პაკეტების დანაკარგები

პაკეტების დანაკარგები განისაზღვრება, როგორც იმ პაკეტების პროცენტი, რომლებიც არ იქნენ მიწოდებული დანიშნულების ადგილზე. ქსელში გვაქვს მთელი რიგი მიზეზებისა, რომლებიც იწვევენ პაკეტების დაკარგვას [72]. დავასახელოთ ძირითადი მათ შორის:

- ✓ ქსელში გადატვირთვის დროს რიგები კომპუტატორებთან და მარშრუტიზატორებთან სწრაფად იზრდებიან. თუ გადატვირთვა შენარჩუნებულ იქნება საკმაოდ დროის განმავლობაში, ხდება ბუფერების გადავსება და პაკეტები იკარგება;
- ✓ მონაცემების პაკეტების დაკარგვის დროს, ისინი შეიძლება განმეორებით იქნენ გადმოცემული, მიმღები მხრის მოთხოვნის შესაბამისად. განმეორებითი გადაცემა ზრდის პაკეტების დაყოვნების დროს, ამიტომ ლაპარაკის პაკეტური გადაცემის დროს სალაპარაკო პაკეტების ნაწილი უკუივდება. სალაპარაკო ინფორმაცია ძირითადად მდგრადია ერთეული პაკეტების და არა პაკეტთა სერიის დაკარგვის მიმართ. სალაპარაკო პაკეტების დანაკარგმა არ უნდა გადააჭარბოს 1% დროის საკმაოდ დიდ ინტერვალში, ვთქვათ, ერთი თვის განმავლობაში. დანაკარგების კოეფიციენტის დიდი მნიშვნელობის დროს წარმოქმდებიან წყვეტები მიმღებ მხარეს აღდგენილ ლაპარაკში.

თუ პაკეტები იკარგებიან თვით ქსელის ბუნების გამო (მაგალითად, უგამტარო ქსელები), შესაძლებელია გამოყენებულ იქნეს

უფრო ხელშეშლამდგრადი კოდები ან შემცირდეს კოდური კადრის ზომები. უფრო ხელშეშლამდგრად კოდებზე გადასვლა ნიშნავს უფრო დაბალ სიჩქარეებზე გადაცემას, რის გამოც უარესდება ქსელის გამტარუნარიანობა.

ამგვარად, რეკომენდაციები ITU P.800 და G.107 განსაზღვრავენ VoIP ქსელებში ორ შესაძლო მიდგომას ლაპარაკის გადაცემის ხარისხის შეფასების მიმართ. პირველ რეკომენდაციაში განსაზღვრულია მეთოდი, დაფუძნებული სუბიექტურ შეფასებებზე და არ შეუძლია გაითვალისწინოს პაკეტურ ქსელში ლაპარაკის გადაცემის ხარისხზე ქსელის ალბათურ-დროითი მახასიათებლების გავლენა. მეორე მეთოდი, დაფუძნებული E-მოდელზე და R-ფაქტორის გამოთვლაზე, შეიძლება განხილულ იქნეს როგორც ITU საერთო მოდელი სალაპარაკო გადაცემების ხარისხის შეფასებისათვის. E-მოდელის მთავარი თავისებურება იმაში მდგომარეობს, რომ იგი ითვალისწინებს ფაქტორების დიდი რაოდენობას, რომლებიც ასახავენ დამაბოლოებელი მოწყობილობებისა და სატრანსპორტო გარემოს გავლენასა მომსახურების ხარისხზე.

2.7. დასკვნები მეორე თავთან დაკავშირებით

1. მოცემულია VoIP სისტემებში მომსახურების ხარისხის მახასიათებლები და მოტანილია იმ ფაქტორების დეტალური ანალიზი, რომლებიც გავლენას ახდენენ QoS მაჩვენებლებზე ლაპარაკის პაკეტური გადაცემის დროს.
2. ნაჩვენებია, რომ დაბალსიჩქარიანი კოდებები მოითხოვენ გამტარუნარიანობის გაცილებით ნაკლებ მნიშვნელობებს, მაგრამ გაცილებით მეტ გავლენას ახდენენ ბგერითი სიგნალის ხარისხზე მაღალსიჩქარიან კოდებებთან შედარებით, განპირობებული დანაკარგებით შეკუმშვის მაღალი კოეფიციენტებით.
3. ნაჩვენებია, რომ პაკეტის დაყოვნების ყველა სახის რაოდენობითი შეფასებების განხილვისას, ბგერითი სიგნალის დაყოვნების დრომ ადვილად შეიძლება გადააჭარბოს 150 მლწმ, რაც დაუშვებელია ხარისხიანი კავშირისათვის.

თავი 3. უგამტარო ქსელების მახასიათებლების შეფასება პოლინგის სხვადასხვა მეთოდის დროს

კომპიუტერული ქსელების რიცხვის სწრაფი ზრდა, წარმატებები გამტარიანი და უგამტარო კავშირის საშუალებების განვითარებაში, საქსელო ტექნოლოგიების უწყვეტი ცვლის თანმხლებია და მიმართულია სწრაფმოქმედებისა და იმედიანობის გაზრდისაკენ, მონაცემების, აუდიო და ვიდეო ინფორმაციის ინტეგრალური გადაცემის შესაძლებლობისკენ.

უკანასკნელ წლებში საქსელო ინდუსტრიის განვითარების ერთ-ერთი ძირითადი მიმართულებაა ინფორმაციის გადაცემის უგამტარო ქსელები. ქვეყნებისათვის, რომელთა დიდი ტერიტორიები შერწყმულია მოსახლეობის ნაკლებ სიმკვრივესთან, ფართოზოლოვან უგამტარო გადაწყვეტილებებს განსაკუთრებული მნიშვნელობა ენიჭება, რადგან საშუალებას იძლევიან ეკონომიურად და ოპერატიულად შექმნან ტელეკომუნიკაციური ინფრასტრუქტურა ფართო ტერიტორიაზე. ამას განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს საქართველოს შორეული და სასოფლო რეგიონების ინფორმატიზაციისათვის. იმ სიტუაციაში, როდესაც საკაბელო ქსელი ნაკლებადაა განვითარებული (ეს დამახასიათებელია მრავალი ქვეყნისათვის) უგამტარო ტექნოლოგიების გამოყენება საშუალებას იძლევა უმოკლეს დროში და შედარებით მცირე დანახარჯებით გაერთიანებულ იქნენ შორეული ლოკალური ქსელები და მუშა სადგურები მონაცემების გადაცემის ერთიან ქსელში და თანაც უზრუნველყონ ლოკალური ქსელების მომხმარებელთა შორეული სტაციონალური შეღწევა ინტერნეტ ქსელებში. ასეთი კლასის ქსელების აღმავლობითი განვითარება, რომლის შესახებაც ხშირად ლაპარაკობენ, როგორც უგამტარო რევოლუციაზე ინფორმაციის გადაცემის ქსელების არეალში, მოითხოვს უგამტარო ქსელების პროექტირების თეორიული საფუძვლების შემდგომ განვითარებას [62].

უგამტარო ქსელების მახასიათებლების შეფასებისათვის ფართოდ გამოიყენება პოლინგის სტოქასტიკური მოდელები, რომელთა გამოკვლევა აქტიურად მიმდინარეობს XX საუკუნის 50-იანი

წლებიდან [73]. ამ დარგში 1985 წლამდე მიღებული შედეგების სისტემატიზაცია და განზოგადება მოცემულია მონოგრაფიაში ხ. ტაკაგი [74]. თეორიული შედეგების შემდგომმა განვითარებამ, გამოქვეყნებულმა 1995 წლამდე, ასახვა ჰპოვა ს. ბორსტის მონოგრაფიაში [75]. ტელეკომუნიკაციური სისტემებისა და ქსელების სწრაფმა განვითარებამ, კერძოდ კი ფიჭური კავშირის სისტემებისა და უკამტარო ფართოზოლოვანი ქსელების განვითარებამ, მოითხოვა პოლინგის სისტემების ანალიზისა და სინთეზის ახალი მეთოდების დამუშავება. ამ მიზნით უკანასკნელ ათეულწელში გამოჩნდა შრომების მნიშვნელოვანი რიცხვი, დაკავშირებული პოლინგის სისტემებთან ამ მიმართულებით.

მოცემული თავი ეძღვნება პოლინგის სტოქასტიკური (ალბათური) მოდელების კვლევებს და მათ გამოყენებას მართვის ცენტრალიზებულ მექანიზმიან ფართოზოლოვან უკამტარო Wi-Fi და WiMAX ქსელების კვლევისათვის.

პოლინგის სისტემები, ანუ მოწესრიგებული გამოკითხვის სისტემები წარმოადგენენ რამდენიმე რიგის და საერთო მომსახურების მოწყობილობას ან რამდენიმე მოწყობილობის (სერვერი) მქონე მასობრივი მომსახურების სისტემის ნაირსახეობას. ყოველ რიგში შედის მოთხოვნების თავისი ნაკადი. მომსახურე მოწყობილობა გარკვეული წესით აკითხავს რიგებს და ემსახურება მათში არსებულ მოთხოვნებს (განაცხადებს). პოლინგის სისტემებში სერვერი პრიორიტეტებს აკუთვნებს რიგებს განსაზღვრული წესის მიხედვით.

ყველაზე ზოგადი სახით პოლინგის სისტემები მასობრივი მომსახურების პრიორიტეტული სისტემების მსგავსია. მაგრამ პრიორიტეტულ სისტემებში განაცხადი უფრო დიდი პრიორიტეტით მომსახურებულ უნდა იქნეს უფრო ადრე ვიდრე განაცხადი დაბალი პრიორიტეტით, მაშინ როდესაც პოლინგის სისტემებში სერვერი უწესებს რიგებს პრიორიტეტებს გარკვეული წესის მიხედვით [76].

წესს, რომლის მიხედვითაც სერვერი ირჩევს რიგს მომსახურებისათვის, *მომსახურების წესი (წესრიგი)* ეწოდება. ასეთი წესის მაგალითებად გამოდგება რიგის ციკლური გამოკითხვა, როდესაც სერვერი აკითხავს რიგს პირველიდან ბოლომდე და კვლავ უბრუნდება

პირველ რიგს, ან შემთხვევითი წესრიგი, როდესაც რიგი მომსახურებისათვის აირჩევა შემთხვევით.

პოლინგის სისტემის რიგებს მომსახურება გაეწევათ მომსახურების დადგენილი დისციპლინის თანახმად. იგი ხასიათდება იმ განაცხადების რიცხვით, რომელთა მომსახურებაც შეუძლია სერვერს რიგის ერთი მოკითხვის დროს. რიგების მომსახურების ყველაზე მეტად გაგრძელებული დისციპლინებია: **ამომწურავი დისციპლინა**, რომლის დროსაც სერვერი მოემსახურება განაცხადებს მანამ, სანამ რიგი არ დაიცვლება; **რახული დისციპლინა**, რომლის დროსაც სერვერი მოემსახურება მხოლოდ იმ განაცხადებს, რომლებიც რიგში იმყოფებოდნენ სერვერის მიერ ამ რიგის მოკითხვის დროს; **შეზღუდული დისციპლინა**, რომლის დროსაც განაცხადთა რიცხვი, რომელთაც უნდა მოემსახუროს სერვერი, შემოსაზღვრულია.

ყველაზე ზოგად შემთხვევაში, პოლინგის სისტემა სრულად აღიწერება რიგებისა და სერვერების რიცხვით, რიგების მოკითხვის წესრიგითა და დისციპლინით, შემომავალი განაცხადების ნაკადების, მომსახურების და სერვერის რიგებს შორის გადართვების პარამეტრებით.

3.1. პოლინგის სისტემათა კლასიფიკაცია

მოწესრიგებული მომსახურების სისტემები წარმოადგენენ მასობრივი მომსახურების სისტემების ნაირსახეობას რამდენიმე რიგით და იყოფიან ორ კლასად. პირველი კლასის სისტემებს გააჩნიათ მომსახურების რამდენიმე ხელსაწყო (სერვერი) და სისტემაში შემოსული განაცხადები, ირჩევენ სერვერს, რომლის მომსახურებაც მათ სურთ მიიღონ. ამგვარად, თითოეულ სერვერთან წარმოიქმნება თავისი რიგი და განაცხადები აქტიურები არიან, ხოლო სერვერები კი - პასიურები. მეორე კლასის სისტემებში (პოლინგის სისტემები) არსებობს ყველა რიგისთვის საერთო სერვერი (ან რამდენიმე სერვერი), რომელიც (ან რომლებიც) გარკვეული წესის მიხედვით აკითხავს რიგებს და მოემსახურება იქ მყოფ განაცხადებს.

მიდგომები პოლინგის სისტემების კლასიფიკაციასთან აღწერილია სხვადასხვა ნაშრომში (იხ. მაგალითად, [77, 78, 79]). მოცემულ თავში,

მოყვანილია პოლინგის სისტემების კლასიფიკაციის განზოგადებული მიდგომა შემდეგი კრიტერიუმების მიხედვით [77]: რიგების რიცხვი; რიგების გამოკითხვის წესრიგი; რიგების მომსახურების დისციპლინა.

რიგების რიცხვის მიხედვით პოლინგის სისტემები *დისკრეტული* (რიგების რიცხვი სასრულია, ან დათვლადია) და *უწყვეტი* (რიგების, ან სისტემაში ლოდინის ადგილების საერთო რიცხვი დათვლადზე მეტია). უკანასკნელ შემთხვევაში განიხილავენ სისტემებს, რომლებშიც განაცხადები განთავსდებიან წრეზე ან n -განზომილებიან არეში.

რიგების *გამოკითხვის წესრიგი* ეწოდება წესს, რომლის მიხედვითაც სერვერი ირჩევს მომსახურების შემდეგ რიგს. რიგების გამოკითხვის წესრიგი პირობითად შეიძლება დავეოთ სტატიკურად და დინამიკურად. დინამიკური წესრიგის დროს რიგის არჩევის წესი იცვლება მომსახურების პროცესში. *დინამიკური წესრიგი* ითვალისწინებს, მომსახურებაზე რიგის არჩევის გადაწყვეტილების მიღებას გარკვეულ მომენტში, სისტემის მდგომარეობის შესახებ სრული ან ნაწილობრივი ინფორმაციის საფუძველზე (მაგალითად, ციკლში რიგების მომსახურება მათი სიგრძის შემცირების მიხედვით).

რიგის მომსახურების დისციპლინა ეწოდება განაცხადთა რიცხვს, რომელთაც ემსახურება სერვერი რიგის ერთი მოკითხვისას. რიგის შიგნით განაცხადების მომსახურება ხორციელდება წესრიგით, რომელიც განსაზღვრულია *განაცხადების მომსახურების დისციპლინით* (მაგალითად, განაცხადების მომსახურება ხორციელდება რიგში მათი შემოსვლის მიმდევრობის მიხედვით).

რიგების მომსახურების დისციპლინებს შორის (დაეუშვათ, რომ ეს Q_i რიგია) გამოყოფენ შემდეგს:

1. *ამომწურავი დისციპლინა*, რომლის დროსაც სერვერი მოემსახურება განაცხადებს მანამ, სანამ რიგი არ დაიცვლება.
2. *რაბული დისციპლინა*, რომლის დროსაც სერვერი მოემსახურება მხოლოდ იმ განაცხადებს, რომლებიც რიგში იმყოფებოდნენ სერვერის მიერ ამ რიგის მოკითხვის დროს (სერვერის რიგთან მიერთების მომენტის დასრულებისათვის). განაცხადები შემოსული რიგში გამოკითხვის დაწყების მომენტის შემდეგ მომსახურებულ იქნებიან შემდეგ ციკლში. თუ სერვერი ემსახურება მხოლოდ იმ

განაცხადებს, რომლებიც რიგში იყვნენ ციკლის დაწყების მომენტისათვის (პირველი რიგის გამოკითხვის მომენტი), მაშინ ლაპარაკობენ გლობალურ-რაბულ დისციპლინაზე.

3. l_i - შეზღუდული დისციპლინა, რომლის დროსაც განაცხადთა რიცხვი, რომელთაც უნდა მოემსახუროს სერვერი, შემოსაზღვრული l_i რიცხვით, $l_i \geq 1$. შეზღუდულ დისციპლინებს შორის განასხვავებენ ამომწურავსა და რაბულს. შეზღუდული ამომწურავი დისციპლინის დროს სერვერი მოემსახურება რიგს მანამ, სანამ არ მოხდება ორიდან ერთი მოვლენა: ან მომსახურება გაეწევა l განაცხადს, ან რიგი დაიცლება. შეზღუდული რაბული დისციპლინა ითვალისწინებს მომსახურების გაწევას მანამ, სანამ მომსახურება არ გაეწევა l განაცხადს, ან მომსახურება არ გაეწევა ყველა იმ განაცხადს, რომლებიც რიგში იდგნენ გამოკითხვის დაწყების მომენტისათვის. კერძო შემთხვევას $l_i = 1$ ზოგჯერ არაამომწურავ მომსახურებას უწოდებენ.
4. l_i - შემამცირებელი დისციპლინა, რომლის დროსაც სერვერი მოემსახურება რიგში მყოფ განაცხადებს მანამ, სანამ მათი რიცხვი l_i არ გახდება იმაზე ნაკლები, ვიდრე იყო სერვერის მიერთების მომენტისათვის, ან რიგი არ დაიცლება, $l_i \geq 1$. როდესაც $l_i = 1$ ამ დისციპლინას აგრეთვე ნახევრადამომწურავს უწოდებენ.
5. T - შემოსაზღვრული დისციპლინა, რომლის დროსაც სერვერის მოცემულ რიგში ყოფნის დრო შემოსაზღვრულია. ეს დისციპლინაც შეიძლება იყოს რაბული და ამომწურავი.
6. ზღურბლური დისციპლინა, რომლის დროსაც სერვერი მოემსახურება რიგს, თუ მასში განაცხადების რიცხვი არ არის დადგენილზე (ზღურბლზე) ნაკლები.
7. შემთხვევითი დისციპლინა, რომლის დროსაც განაცხადთა რიცხვი, რომელსაც უნდა მოემსახუროს სერვერი, განისაზღვრება შემთხვევითი დისკრეტული სიდიდით ξ_i , რომლის განაწილების კანონია $\{a_j^i, j \geq 1\}$. განაწილების კანონი შეიძლება შეიცვალოს რიგის ყოველი გამოკითხვისას. შემთხვევითი ξ_i სიდიდის

მნიშვნელობა გათამაშდება რიგის ყოველი მოკითხვისას. აღვნიშნავთ ზოგიერთ შემთხვევით დისციპლინას:

- (a) ბინომიალური დისციპლინა, რომლის დროსაც შემთხვევით ξ_i სიდიდეს გააჩნია ბინომიალური განაწილება პარამეტრებით X_i და p_i , სადაც $X_i - Q_i$ რიგში განაცხადების რიცხვია გამოკითხვის მომენტში, p_i - გარკვეული რიცხვია, $0 < p_i \leq 1$. ამ დისციპლინისათვის

$$a_i^j = C_{X_i}^j p_i^j (1 - p_i)^{X_i - j}, \quad j = \overline{1, X_i},$$

$$a_i^j = 0, \quad j > X_i - \text{სათვის};$$

- (b) ბერნულის დისციპლინა, რომლის დროსაც პირველ განაცხადს Q_i რიგში მომსახურება გაეწევა ალბათობით 1, ხოლო ყველა შემდეგს დადგენილი p_i ალბათობით. ალბათობით $1 - p_i$ სერვერი დატოვებს რიგს. ამ დისციპლინისათვის

$$a_i^j = p_i^{j-1}, \quad j \geq 1.$$

თუ პოლინგის სისტემის ყველა რიგს მომსახურების ერთი სახე გააჩნია, ლაპარაკია პოლინგის სისტემაზე ამ სახის მომსახურების დისციპლინით (ამომწურავი, k -შეზღუდული ან სხვა სახის მომსახურების დისციპლინა). თუ რიგების მომსახურების დისციპლინები განსხვავებულია, ლაპარაკობენ პოლინგის სისტემაზე მომსახურების *შერეული* დისციპლინით.

რიგების გამოკითხვის წესრიგი და მათი მომსახურების დისციპლინები შეადგენენ მომსახურების პოლიტიკას პოლინგის სისტემაში – ეს არის მომსახურებისათვის სისტემაში შემდეგი განაცხადის არჩევის წესი.

პოლინგის სისტემებს შორის არჩევენ სისტემებს *დისკრეტული დროით* და სისტემებს *უწყვეტი დროით*.

თუ სისტემის რიგების დამახასიათებელი პროცესები, როგორებიცაა - განაცხადთა შემოსვლისა და მომსახურების პროცესები, სერვერის რიგებს შორის გადართვების ხანგრძლივობის განმსაზღვრელი პროცესები, და, შესაძლებელია სხვა პროცესები,

შესაბამისად წარმოადგენენ სტოქასტიკურად ექვივალენტურებს ყველა რიგისათვის, მაშინ პოლინგის სისტემას სიმეტრიულს, ანუ ერთგვაროვანს უწოდებენ. წინააღმდეგ შემთხვევაში სისტემას არასიმეტრიულს, ანუ არაერთგვაროვანს უწოდებენ.

თუ სერვერი არ ხარჯავს დროს რიგებს შორის გადართვებზე, მაშინ ლაპარაკობენ სისტემაზე სერვერის მყისიერი გადართვით რიგებს შორის, წინააღმდეგ შემთხვევაში - სისტემაზე სერვერის არა მყისიერი გადართვით.

თუ სხვა მინიშნება არ არის, გულისხმობენ რომ პოლინგის სისტემა არასიმეტრიულია, მისი რიგები სასრულია, რიგებს ლოდინისათვის გააჩნიათ ადგილების შეუზღუდავი რაოდენობა, სერვერის გადართვა რიგებს შორის არამყისიერია. თუ რიგში არ არის განაცხადი, სერვერი მაშინვე ტოვებს მას. ასევე იგულისხმება, რომ რიგის შიგნით განაცხადების მომსახურება შემოსვლის მიმდევრობით ხორციელდება.

პოლინგის სისტემების გამოკვლევების უმეტესობის მიზანია სისტემის ნებისმიერი რიგისათვის ლოდინის საშუალო დროს დადგენა. მაგრამ ამ მახასიათებლების გამომთვლელი გამოსახულებების მიღება ცხადი სახით ყოველთვის ვერ ხერხდება, ამიტომ დიდი ყურადღება აქვს დათმობილი მიახლოებითი გამოსახულებების მოძიებას, აგრეთვე უკვე მიღებული მიახლოებითი მნიშვნელობების დაზუსტებას. ზოგიერთ შემთხვევაში ლოდინის საშუალო დროის მნიშვნელობის პოვნა დაიყვანება ამ მახასიათებლის აწონილი მნიშვნელობების პოვნაზე. ლოდინის დროთა საშუალო აწონილ მნიშვნელობათა ქვეშ იგულისხმება

გამოსახულება
$$\sum_{i=1}^N p_i M[W_i],$$
 სადაც W_i - შემთხვევითი სიდიდეა,

რომელიც ახასიათებს Q_i რიგში ლოდინის დროს, $M [W_i]$ - მათემატიკური მოლოდინია, $p_i = \lambda_i b_i - Q_i$ დატვირთვაა რიგში, λ_i - განაცხადების ნაკადის ინტენსივობაა, $b_i - Q_i$ რიგში განაცხადების მომსახურების საშუალო დროა, $i = \overline{1, N}$. აღვნიშნავთ, რომ **ლიტლის** ფორმულის თანახმად, ლოდინის დროთა საშუალო აწონილი ჯამი წარმოადგენს სისტემაში მუშაობის საშუალო რაოდენობას დროის

ნებისმიერ მომენტში. დროის ნებისმიერ მომენტში მუშაობის რაოდენობის ქვეშ იგულისხმება დრო, რომელსაც დახარჯავს სერვერი, იმ განაცხადთა მომსახურებისათვის, რომლებიც ამ მომენტში იმყოფებიან სისტემაში.

3.2. პოლინგის ძირითადი მოდელი

ძირითადი მოდელი, რომელიც წარმოადგენს კვლევის ობიექტს, პოლინგის სისტემასთან დაკავშირებულ უმეტეს ნაშრომებში აიწერება შემდეგი სახით: სისტემას აქვს ერთი სერვერი და N ($N \geq 2$) რიგი ლოდინისათვის შეუზღუდავი რაოდენობის ადგილებით.

i -ურ რიგში შემოდის განაცხადების პუასონის სტაციონალური ნაკადი, პარამეტრით λ_i . Q_i რიგში განაცხადთა მომსახურების დროები დამოუკიდებელია და თანაბრადაა განაწილებული განაწილების ფუნქციით $B_i(t)$ საშუალო $b_i = \int_0^{\infty} t dB_i(t)$, მეორე მომენტით $b_i^{(2)}$ და **ლაპლას-**

სტილტესის გარდაქმნით $\tilde{B}_i(x)$, $i = \overline{1, N}$. ვვარაუდობთ, რომ განაცხადთა ნაკადი და განაცხადთა მომსახურების დროები დამოუკიდებელი არიან.

კანდელას კლასიფიკაციის მიხედვით, ასეთ სისტემას უწოდებენ პოლინგის სისტემას $M/GI/1$ ტიპის რიგებით. თუ განაცხადთა მომსახურების დროები განაწილებულია ექსპონენციალურად ან განაცხადთა ნაკადი რეკურენტულია (ე.ი. მხედველობაში მიიღება წინა განაცხადები), მაშინ ლაპარაკობენ პოლინგის სისტემაზე $M/M/1$ ან $G/G/1$ ტიპის რიგებით შესაბამისად.

სერვერი მოიკითხავს რიგს, განსაზღვრული წესრიგით და მოემსახურება მათ შერჩეული დისციპლინის მიხედვით. Q_i რიგთან მიერთების დროს, რომელსაც გადართვის დრო ეწოდება, გააჩნია განაწილების ფუნქცია $S_i(t)$ საშუალო s_i , მეორე მომენტით $s_i^{(2)}$ და **ლაპლას-სტილტესის** გარდაქმნით $\tilde{S}_i(x)$, $i, j = \overline{1, N}$.

აღვნიშნოთ $p_i = \lambda_i b_i$ -ით Q_i რიგის დატვირთვა, $p = \sum_{i=1}^N p_i$ - სისტემის დატვირთვა. ციკლური ან პერიოდული გამოკითხვის სისტემისათვის ასევე აღვნიშნოთ s და $s^{(2)}$ - ერთი ციკლის განმავლობაში სერვერის გადართვების ერთობლივი ხანგრძლივობის პირველი და მეორე

მომენტები:

$$s = \sum_{j=1}^N s_j, \quad s^{(2)} = s^{(2)} + \sum_{j=1}^N (s_j^{(2)} - s_j^2). \quad (3.1)$$

ვიტყვი, რომ მასიური მომსახურების სისტემა შეესაბამება პოლინგის სისტემის i -ურ რიგს, თუ ამ სისტემაში განაცხადების ნაკადი წარმოადგენს პუასონის სტაციონალურ ნაკადს პარამეტრით λ_i , ხოლო განაცხადების მომსახურების დროს აქვს განაწილების ფუნქცია $B_i(t)$. მასობრივი მომსახურების სისტემა შეესაბამება პოლინგის სისტემას, თუ ამ სისტემაში განაცხადების ნაკადი წარმოადგენს *პუასონის* სტაციონალურ ნაკადს პარამეტრით $\lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i$, ხოლო განაცხადების მომსახურების დროს აქვს განაწილების ფუნქცია

$$B(t) = \sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i}{\lambda} B_i(t). \quad (3.2)$$

გამოკითხვის მომენტის (პოლინგის) ქვეშ გვეხვით დროის მომენტი, როდესაც სერვერი იღებს გადაწყვეტილებას იმის შესახებ, თუ რამდენ განაცხადს მოემსახურება იგი ამ მოკითხვის დროს. ჩვეულებრივად, ამ მომენტად აიღება ის მომენტი, როდესაც სერვერმა დაასრულა რიგზე გადართვა და მზადაა დაიწყოს მისი მომსახურება. გამოკითხვის მომენტად ზოგჯერ ასევე თვლიან მომენტს, როდესაც ხელმისაწვდომი ხდება ინფორმაცია რიგში განაცხადების რაოდენობის შესახებ.

პოლინგის სისტემისათვის რიგების ციკლური ან პერიოდული გამოკითხვით გამოყოფენ დროის პერიოდებს, რომელთაც ციკლები ეწოდებათ. ციკლური სისტემისათვის – ეს დროა, დახარჯული რიგების $Q_{(1)}$ -დან Q_N -მდე გამოკითხვაზე. პერიოდული გამოკითხვის სისტემებისათვის – დრო, დახარჯული რიგების $Q_{T(1)}$ -დან $Q_{T(M)}$ -მდე გამოკითხვაზე. ზოგიერთი სისტემის მუშაობაში გამოყოფენ *პამილტონის ციკლს* – ეს ის დროს, რომლის განმავლობაში სერვერი მოიკითხავს სისტემის ყველა რიგს, თანაც მხოლოდ ზუსტად ერთხელ. ელევატორული გამოკითხვის დროს გამოყოფენ ადმავალ (რიგების გამოკითხვა პირველიდან ბოლომდე) და დადმავალ (რიგების გამოკითხვა ბოლოდან პირველამდე) ციკლებს.

სისტემებისათვის ციკლური გამოკითხვით და რაბული ან ამომწურავი მომსახურებით ციკლის საშუალო დრო მიიღება ორი დროს შეჯამებით - დროსაგან, როდესაც სერვერი ემსახურება რიგებს (ამაზე ის ხარჯავს დროის p წილს) და დროსაგან, როდესაც ის გადაირთვება რიგებს შორის (ამაზე ის ციკლის განმავლობაში ხარჯავს საშუალოდ s დროს).

ამგვარად,

$$C = pC + s, \quad (3.3)$$

საიდანაც მივიღებთ:

$$C = \frac{s}{1-p}. \quad (3.4)$$

3.2.1. სტაციონალური რეჟიმი პოლინგის სისტემებში

ამბობენ, რომ პოლინგის სისტემაში არსებობს სტაციონალური რეჟიმი, თუ ყველა რიგის ხანგრძლივობის (სიგრძის) გამოკითხვის მომენტში აქვს სტაციონალური განაწილება და ციკლის სიგრძეს k_i - სასრულო მათემატიკური მოლოდინი.

სისტემისათვის ციკლური გამოკითხვით სტაციონალური რეჟიმის არსებობის აუცილებელ და საკმარის პირობას შემდეგი სახე აქვს:

✓ $p < 1$ სისტემისათვის რიგების ამომწურავი და რაბული მომსახურებით;

✓ k_i - შეზღუდული მომსახურების დისციპლინისათვის

$$p < 1 \quad \text{u} \quad \lambda_i < \frac{k_i(1-p_i)}{s}, \quad i = \overline{1, N}. \quad (3.5)$$

l -შემოსაზღვრული მომსახურებისათვის ეს პირობა შემდეგ სახეს მიიღებს:

$$p + \lambda_i s < 1, \quad i = \overline{1, N}. \quad (3.6)$$

✓ სისტემისათვის l - შემამცირებელი მომსახურებისათვის -

$$p + \lambda_i(1-p_i)s < 1, \quad i = \overline{1, N}. \quad (3.7)$$

სტაციონალური რეჟიმის არსებობის აუცილებელი და საკმარისი პირობები, სისტემისათვის მომსახურების საერთო დისციპლინისა და რიგების პერიოდული გამოკითხვით, მიღებულია ნაშრომში [80]. მისში შემოთავაზებულია რიგის მომსახურების

დისციპლინა აღიწეროს შემთხვევითი სიდიდეების სამეულთ - $(f(x), v(x), \varphi(x))$, სადაც x – რიგში განაცხადთა რიცხვია გამოკითხვის მომენტში; $f(x)$ – იმ განაცხადთა რიცხვია, რომელიც იქნება მომსახურებული რიგის მოცემული გამოკითხვის დროს; $v(x)$ - სერვერის მიერ რიგის გამოკითხვის დროა; $\varphi(x)$ - განაცხადთა რიცხვია, რომელიც რჩება რიგში მისი მომსახურების შემდეგ; პოლინგის სისტემებში სტაციონალური რეჟიმის არსებობის აუცილებელი და საკმარისი პირობა შემდეგი სახისაა:

$$p + \lambda_i s / G_i^* < 1, \quad i = \overline{1, N}, \quad (3.8)$$

სადაც G_i^* - განაცხადების ის საშუალო მაქსიმალური რიცხვია, რომლებიც შეიძლება იყვნენ მომსახურებულნი i -ურ რიგში ერთი ციკლის განმავლობაში. ამავე დროს მომსახურების დისციპლინამ უნდა დააკმაყოფილოს შემდეგი პირობები:

- ✓ მომსახურების დისციპლინა არ არის დამოკიდებული მომსახურების პროცესის წინა ისტორიაზე, მაგალითად, მომსახურება გაწეულ განაცხადთა რიცხვზე ან მათი მომსახურების დროზე;
- ✓ განაცხადების შერჩევა მომსახურებაზე არ არის დამოკიდებული მომსახურების დროზე ან მომავალში განაცხადთა შესაძლო შემოსვლაზე;
- ✓ რიგი იღებს მომსახურებას ალბათობით, თუ მასში დაგროვილია მოთხოვნილ განაცხადთა აუცილებელი რიცხვი. სერვერი, მიმართული რიგისკენ, არ ცდება (უწყვეტად ემსახურება განაცხადებს). თუ რიგში არ არის განაცხადი, იგი დაუყოვნებლივ ტოვებს მას;
- ✓ მომსახურების დისციპლინა $(f(x), v(x), \varphi(x))$ სტოქასტიკურად მონოტონურია. შემთხვევითი ვექტორებისათვის სტოქასტიკური მონოტონურობის განსაზღვრა შეიძლება ვიპოვოთ ნაშრომებში [80, 81].

3.3. ადაპტური დინამიკური პოლინგი უგამტარო ქსელებში

ფართოზოლოვან უგამტარო ქსელებში მთელი რადიოფიჭის

მართვის ფუნქცია დაკისრებული აქვს საბაზო სადგურს. მიუხედავად იმისა, რომ მოწყობილობები, რომლებიც უზრუნველყოფენ ცენტრალურ მართვას, რთული დასამუშავებელია და დასამზადებელი, შესაბამისად ძვირიც, იგი მაინც გაცილებით უფრო ეფექტურად იყენებს BWN-ის ორ ყველაზე ღირებულ რესურს: სიხშირულ და გამტარუნარიანობის რესურსს. რეგიონალურ ქსელებში ცენტრალიზებული მართვა საშუალებას იძლევა სრულად ავიცილოთ თავიდან „დაფარული სადგურის“ პრობლემა, ასევე საშუალებას გვაძლევს მკაფიოდ დავგვეგმოდ სადგურის გარემოში შეღწევის წესრიგი, მოქნილად ვმართოთ რადიოფიჭის მუშაობა და ვცვალოთ მისი პარამეტრები კონკრეტული გარემოებების გათვალისწინებით, მხოლოდ ბაზური სადგურის გადაწყობით, დამაბოლოებელი სადგურის ხელშეუხებლად. გამოვიკვლიოთ ადაპტური ცენტრალური მართვა ფართოზოლოვან უგამტარო რეგიონალურ ქსელებში.

ვინაიდან ცენტრალიზებული მართვის საფუძველში ცენტრალიზებული გამოკითხვის (პოლინგის) მექანიზმი დევს, საჭიროა განსაკუთრებული ყურადღება დაეთმოს ამ მექანიზმის რეალიზების კონკრეტულ წესს. სწორედ პოლინგის კონკრეტულ მექანიზმზე და ასევე მის პარამეტრებზეა ძირითადად დამოკიდებული ცენტრალიზებულ მართვიანი უგამტარო ფართოზოლოვანი რეგიონალური ქსელის მუშაობის ეფექტურობა.

სტანდარტები IEEE 802.11 და IEEE 802.16 საკმაო თავისუფლებას აძლევენ დამმუშავებლებს ცენტრალიზებული და ჰიბრიდული კოორდინაციის ფუნქციის კონკრეტული რეალიზაციის საკითხებში. სტანდარტებში არ არის აღწერილი დამაბოლოებელი სადგურების გამოკითხვის კონკრეტული მეთოდები, გამოკითხვის სიების შედგენისა და აქტიურ მდგომარეობაში ყოფნის წესები, კადრების რიგების ფორმირებისა და გადაგზავნის პოლიტიკა, ასევე რეკომენდაციები სუპერფრეიმების ცენტრალიზებული და განაწილებითი მართვის თანაფარდობების შესახებ. ამ ნაშრომში ქვემოთ ძირითადი ყურადღება აქვს დათმობილი დამაბოლოებელი სადგურების საბაზო სადგურის მხრიდან გამოკითხვის

ალგორითმების დამუშავებასა და მოდელირებას – ადაპტური დინამიკური პოლინგის სქემებს.

საბაზო სადგური ფორმირებას უკეთებს კადრების რიგებს თითოეული დამაბოლოებელი სადგურისათვის. თითოეულ რიგში კადრების პრიორიტეტიზაცია ხორციელდება იმ ტრაფიკის შესაბამისად, რომელსაც ისინი ეკუთვნიან. შემდეგ საბაზო სადგური იწყებს გამოკითხვების ციკლს. ციკლის დასაწყისში იგი მოემსახურება დამაბოლოებელ სადგურს, პირველს გამოკითხვის სიაში. ამ დროს იგი გადასცემს მას კადრებს შესაბამისი რიგებიდან, შემდეგ გამოკითხავს მას, გადასცემს რა მას კადრ-მიწვევას გადაცემისათვის და მიიღებს რა მისგან კადრებს, რომლებიც ღებანან გაგზავნის რიგში ამ დამაბოლოებელ სადგურში. მომსახურების დასრულების შემდეგ საბაზო სადგური გადაირთვება გამოკითხვის სიაში მეოფი შემდეგი დამაბოლოებელი სადგურის მომსახურებაზე. საბაზო და დამაბოლოებელ სადგურს შორის მონაცემების გადაცემის პროცესს ცენტრალიზებული მართვისას აუცილებლად თან ახლავს ზედნადები ხარჯები: საბაზო სადგური ხარჯავს დროს გადართვებზე დამაბოლოებელ სადგურებს შორის; წარმოიშობა სამსახურებრივი კადრები, რომელთა დახმარებითაც საბაზო სადგური გამოკითხავს დამაბოლოებლებს.

ადაპტური დინამიკური პოლინგის ალგორითმების დამუშავების დროს შემდეგი ძირითადი ამოცანები წამოიჭრებიან:

- ✓ იმ მეთოდის შერჩევა, რომლის თანახმადაც საბაზო სადგური განახორციელებს დამაბოლოებელი სადგურების გამოკითხვას;
- ✓ საბაზო სადგურის დამაბოლოებელი სადგურების რიგებთან (როგორც მიღებაზე, ასევე გადაცემაზე) მუშაობის პოლიტიკის შერჩევა;
- ✓ ზედნადები ხარჯების მინიმიზაციის მეთოდების დამუშავება;
- ✓ სისტემის ოპტიმალური პარამეტრების ანგარიშის მეთოდების დამუშავება.

ვინაიდან, საბაზო სადგური, თავისი არსით, წარმოადგენს რადიოფიჭაში ფართოზოლოვანი უგამტარო რეგიონალური

ქსელის ცენტრალურ მოწყობილობას, ლოგიკურია მასში შეტანილ იქნეს მთელი ფუნქციები დაკავშირებული რადიოფიჭის მართვასთან, რიგების დამუშავებასთან, გამოკითხვის წესრიგის არჩევასთან და ზედნადები ხარჯების მინიმიზაციასთან.

ფართოზოლოვანი უგამტარო რეგიონალური ქსელის მოწყობილობების დამუშავებელთათვის ეს ნიშნავს იმას, რომ საბაზო სადგურმა თავის თავზე უნდა აიღოს ქსელის ფუნქციონალური შესაძლებლობების მაქსიმალური რაოდენობა. დამაბოლოებელი სადგური პასიურ როლს ასრულებს, რომელიც მხოლოდ საბაზო სადგურის სამსახურებრივ კადრებზე რეაგირებაში მდგომარეობს.

ციკლური გამოკითხვისა და რიგებთან მუშაობის დისციპლინის მეთოდების არჩევა დამოკიდებულია ფართოზოლოვანი უგამტარო რეგიონალური ქსელის კონკრეტული გამოყენების წესზე. როგორც წესი, ფართოზოლოვანი უგამტარო რეგიონალური ქსელების ექსპლუატაციის დროს გვხვდება ორი ტიპური სიტუაცია. პირველ სიტუაციაში ჭარბობს ტრაფიკი „ზევიდან - ქვევით“, ე.ი. საბაზო სადგურიდან დამაბოლოებელ სადგურებამდე. ასეთი სახის ტრაფიკი ტიპურია ფართოზოლოვანი უგამტარო რეგიონალური ქსელის რადიოფიჭის გამოყენებისას, როგორც „ბოლო მილი“ ინტერნეტ-მომსახურების მიწოდებისა. როგორც წესი, ამ შემთხვევაში თითოეულ დამაბოლოებელ სადგურში იმყოფება გამტარიანი ლოკალური ქსელის დამოუკიდებელი სეგმენტი, რომელიც იღებს შეღწევას ინტერნეტის ქსელში უგამტარო ქსელის გავლით. როგორც რეალურად მომუშავე ფართოზოლოვანი უგამტარო რეგიონალური ქსელის, გამოყენებულის „ბოლო მილის“ სახით, ტრაფიკის გამოკვლევებმა უჩვენეს [82, 83], ტრაფიკი გარე ქსელიდან ლოკალურ სეგმენტში მნიშვნელოვნად აჭარბებს ტრაფიკს ლოკალურ სეგმენტიდან გარე ქსელში.

მეორე სიტუაციაში ჭარბობს ტრაფიკი „ქვევიდან – ზევით“, ე.ი. დამაბოლოებელი სადგურებიდან საბაზოსკენ. ასეთი სახის ტრაფიკი ტიპურია ფართოზოლოვანი უგამტარო რეგიონალური

ქსელის გამოყენებისას საყრდენ სატრანსპორტო ქსელად ობიექტებიდან, რომლებიც იმყოფებიან დამაბოლოებელი სადგურების „იქეთ“. მაგალითად, რაიმე სახის ინფორმაციის გადასაცემად (მათი მოქმედების არეში) გარე ქსელში (როგორც წესი, რომელიმე ინფორმაციის შენახვისა და დამუშავების ცენტრში). ასეთი სიტუაცია გვხვდება, როდესაც უგამტარო ქსელი გამოყენებულია ვიდუთვალთვალისა და ტელემეტრიის სისტემებში, ინფორმაციის შეგროვების, შენახვისა და დამუშავების სისტემებში.

შემოკლებისათვის შემდგომ ვილაპარაკებთ, რომ რადიოფიჭა მუშაობს „ბოლო მილის“ რეჟიმში, თუ განიხილება სიტუაცია ტრაფიკით უპირატესად „ზევიდან - ქვევით“ და, რომ რადიოფიჭა მუშაობს „მონაცემების შეგროვების“ რეჟიმში, თუ განიხილება სიტუაცია ტრაფიკით უპირატესად „ქვევიდან – ზევით“.

პრინციპიალური განსხვავება ამ ორ სიტუაციას შორის იმაშია, რომ ტრაფიკის „ზევიდან - ქვევით“ გადაჭარბებისას საბაზო სადგურისათვის, რომელიც წარმოადგენს უგამტარო ქსელის რადიოფიჭის მუშაობის კოორდინატორს, წინასწარ ცნობილია დამაბოლოებელი სადგურებისათვის გადასაცემი კადრების რიგების პარამეტრები, ამიტომ საბაზო სადგურს შეუძლია წინასწარ აირჩიოს დამაბოლოებელი სადგურების რიგებთან მუშაობის პოლიტიკა. მეორე შემთხვევაში კი, როდესაც ჭარბობს ტრაფიკი „ქვევიდან – ზევით“, საბაზო სადგურმა არაფერი არ იცის დამაბოლოებელ სადგურებიდან გადასაცემი კადრების რიგების შესახებ, ამიტომ მას სჭირდება დასაწყისში გამოკითხოს დამაბოლოებელი სადგურები და მხოლოდ მას შემდეგ მიიღოს გადაწყვეტილება რიგებთან მუშაობის პოლიტიკის შესახებ.

როდესაც რადიოფიჭა მუშაობს „ბოლო მილის“ რეჟიმში, შეიძლება უგლებელყოფა მონაცემთა ნაკადისა დამაბოლოებელი სადგურიდან საბაზოსკენ და მოხდეს მხოლოდ დაღმავალი ნაკადის - საბაზო სადგურიდან დამაბოლოებელამდე, განხილვა. ამ შემთხვევაში საბაზო სადგური შესაბამისი რიგიდან უგზავნის

დამაბოლოებელ სადგურს შესაბამის კადრებს. შემდეგ ელოდება დადასტურებას დამაბოლოებელ სადგურიდან მონაცემების წარმატებული მიწოდების შესახებ (მონაცემების მიღების დადასტურება მოსალოდნელია ტაიმ-აუტის განმავლობაში) და იწყებს შემდგომი რიგის კადრების გაგზავნას. რიგებს შორის გადართვის დრო შემთხვევითი სიდიდეა, ვინაიდან შეუძლებელია წინასწარ მეტყველება წარმატებული იყო თუ არა მონაცემების მიწოდება. ეს მომენტი აუცილებლადაა გასათვალისწინებელი სისტემის ანალიტიკური მოდელირების დროს. ცხადია, რომ თუ კადრების რიგი მოკლეა, მონაცემების გადაცემის ზედნადები ხარჯები დიდი იქნება. ამიტომ, ზედნადები ხარჯების შემცირებისათვის, შემოთავაზებულია რიგის მომსახურება მხოლოდ იმ შემთხვევაში, როდესაც მისი სიგრძე გადააჭარბებს დადგენილ სიდიდეს – ზღურბელს. სისტემის გამტარუნარიანობის მაქსიმიზაციისათვის თითოეული დამაბოლოებელი სადგურის რიგების მომსახურება უნდა მოხდეს მათ სრულ ამოწურვამდე, მაგრამ თუ ერთი ან რამდენიმე რიგი ძალზე გრძელი აღმოჩნდება, მაშინ კადრის რიგში ყოფნის საშუალო დრო დიდი იქნება, რაც დაუშვებელია ზოგიერთი საქსელო გამოყენებისათვის.

აქედან გამომდინარე სისტემის განსაკუთრებით მნიშვნელოვან პარამეტრებს წარმოადგენენ რიგის საშუალო სიგრძე და კადრის რიგში ყოფნის საშუალო დრო. მოცემულ ნაშრომში სწორედ ამ პარამეტრების რაოდენობრივი შეფასებაა წარმოდგენილი, მიღებული ზღვრული ამომწურავი მომსახურების სისტემის ანალიტიკური და იმიტაციური მოდელირების საფუძველზე.

3.3.1. ადაპტური დინამიკური პოლინგის პარამეტრები

შემთხვევისთვის, როდესაც რადიოფიჭა მუშაობს

„ბოლო მილის“ რეჟიმში

განვიხილოთ პოლინგის ძირითადი სისტემა ამომწურავი მომსახურებით, იმ ვარაუდით, რომ მომსახურების დრო რიგებში განაწილებულია ექსპონენციალურად [77].

სერვერი გამოკითხავს რიგებს და მოემსახურება მხოლოდ მათ, რომელთა მოთხოვნების რიცხვმა მიაღწია გარკვეულ ზღურბელს (κ_i i -ური რიგისთვის), $\kappa_i \geq 0, i = \overline{1, N}$. i -ური რიგის მომსახურების წინ სერვერს ესაჭიროება მოსამზადებელი შემთხვევითი s_i პარამეტრით ექსპონენციალურად განაწილებული დრო. ამ დროდ შეიძლება ჩაითვალოს Q_i რიგთან გადართვის დროც, რომელიც იხარჯება მხოლოდ იმ შემთხვევაში, თუკი რიგი იქნება მომსახურებული.

მოთხოვნათა მომსახურებების დრო i -ურ რიგში ექსპონენციალურადაა განაწილებული პარამეტრით $\mu_i, i = \overline{1, N}$. რიგის მომსახურება ხორციელდება მანამ, სანამ ის არ დაცარიელდება, რის შემდეგაც სერვერი გადაინაცვლებს შემდგომი რიგისკენ, რომელიც საჭიროებს მომსახურებას. თუკი ყველა რიგი შეიცავს მომსახურებისთვის არასაკმარის მოთხოვნათა რიცხვს (κ_i ნაკლები i -ური რიგისთვის), სერვერი ჩერდება მანამ, სანამ მოთხოვნათა რიცხვი ერთ-ერთ რიგში არ მიაღწევს საჭირო ზღურბელს. რის შემდეგაც სერვერი კვლავ იწყებს მუშაობას ამ რიგთან მიერთებით.

მომსახურების მახასიათებლები განისაზღვრება შემდეგი გამოსახულებებით:

1. j -ური რიგის საშუალო სიგრძე i -ური რიგის მომსახურებისას (მომსახურებაში მყოფი მოთხოვნის გაუთვალისწინებლად)

$$L_i^j = \sum_{r \in \Pi_i} (r_j - \delta_{ij}) q_i(r), \quad i, j = \overline{1, N}; \quad (3.9)$$

2. j -ური რიგის საშუალო სიგრძე i -ურ რიგთან მიერთების მომენტში

$$S_i^j = \sum_{r \in Z_i} r_j p_i(r), \quad i, j = \overline{1, N}; \quad (3.10)$$

3. j -ური რიგის საშუალო სიგრძე სერვერის უქმადყოფნის მომენტში

$$U^j = \sum_{r \in \Lambda} r_j a(r), \quad j = \overline{1, N}. \quad (3.11)$$

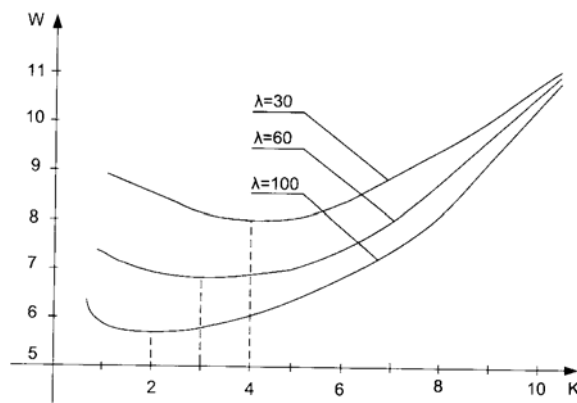
j-ურ რიგში მოხვედრილი W_i მოთხოვნის ლოდინის საშუალო დროის მოსაძებნად, ვიყენებთ სისტემაში მუშაობის რაოდენობის დაშლას. განხილული სისტემისთვის დაშლა აიწერება შემდეგნაირად: j-ური რიგის V_i მუშაობის რაოდენობა დროის ნებისმიერ მომენტში განაწილებულია, როგორც მუშაობის რაოდენობებს ჯამი შესაბამის $M/M/1/h_i$ სისტემაში და პოლინგის სისტემაში მუშაობის Y_i რაოდენობა ნებისმიერ მომენტში, როდესაც სერვერი არ არის დაკავებული რიგის მომსახურებით.

j-ურ რიგში ლოდინის საშუალო დრო ასე განისაზღვრება:

$$M[W_i] = \frac{[1 + h_i \rho_i^{h_i+1} + (h_i + 1) \rho_i^{h_i}] \rho_i}{(1 - \rho_i^{h_i+1})(1 - \rho_i) \lambda_i} - \frac{1}{\mu_i} + \frac{1}{\mu_i \rho_i T_i} \cdot \left(\sum_{r \in \Lambda} r_i a(r) + \sum_{m=1}^N \sum_{r \in \chi_m} r_i \rho_m(r) + \sum_{m=1}^N \sum_{r \in \Pi_m, m \neq 1} r_i q_m(r) \right), \quad i = \overline{1, N}. \quad (3.12)$$

განვიხილოთ ფართოზოლოვანი უგამტარო, მართვის ადაპტურ მექანიზმიანი ქსელის, რადიოფიჭის მუშაობის მოდელი „ბოლო მილის“ რეჟიმში შემდეგი პარამეტრებით: რიგების რაოდენობა $N=2$; შესავალი ნაკადების ინტენსივობა $\lambda_1=30$, $\lambda_2=60$, $\lambda_3=100$; რიგების მომსახურების ინტენსივობა $\mu_1=\mu_2=\mu_3=4500$; რიგებთან მიერთების ინტენსივობა $s_1 = s_2 = s_3 = 1500$.

ნახ. 3.1-ში წარმოდგენილია $M[W(k)]$ სისტემაში კადრების საშუალო ლოდინის დამოკიდებულება $k_i=k$ ($i=\overline{1,4}$) ზღურბლის, რომელიც ნავარაუდევია როგორც ერთნაირი ყველა რიგისათვის.



ნახ. 3.1. ლოდინის საშუალო დროის დამოკიდებულება ზღურბლის სიდიდიდან

გრაფიკიდან ჩანს, როგორ იცვლება k -ს ოპტიმალური მნიშვნელობა საშუალო დროის მრუდეებისთვის: რაც უფრო ნაკლებად არის დატვირთული რიგები, ლოდინის საშუალო დრო მით უფრო მაღალი k -ს მნიშვნელობისათვის აღწევს მინიმუმს.

თუ სისტემაში არსებობს სუსტად დატვირთული რიგები, მიზანშეწონილია გაიზარდოს ამ რიგების ზღურბლი. ეს მიგვიყვანს სისტემაში დაუტვირთავ რიგებში კადრების ყოფნის დროის გაზრდამდე, სამაგიეროდ ეს დრო შემცირდება დატვირთული რიგების კადრებისათვის და ეს შეამცირებს კადრების სისტემაში ყოფნის საერთო დროს.

პრაქტიკაში ოპტიმალური ზღურბლის შერჩევა ფრიად რთული ამოცანაა, ვინაიდან ზღურბლის სიდიდე დამოკიდებულია დატვირთული და დაუტვირთავი რიგების თანაფარდობაზე, ამ რიგების ტრაფიკის პარამეტრების მნიშვნელობაზე და ა.შ. ამიტომ, მოცემულ შემთხვევაში საუკეთესო ვარიანტს წარმოადგენს საბაზო სადგურის მიერ გამოკითხვების დროს მხოლოდ ცარიელი რიგების გვერდის ავლა, ე.ი. მომსახურების ზღურბლის სიდიდის ფიქსირება $k_i=0, i=\overline{1,N}$.

3.3.2. ადაპტური დინამიკური პოლინგის პარამეტრები შემთხვევისთვის, როდესაც რადიოფიჭა მუშაობს „მონაცემების შეგროვების“ რეჟიმში

როდესაც რადიოფიჭა მუშაობს “მონაცემთა შეგროვების” რეჟიმში, შეიძლება უგულვებელყოფილ იქნეს მონაცემთა ნაკადი საბაზო სადგურიდან დამაბოლოებლისაკენ და განხილულ იქნეს მხოლოდ აღმავალი ნაკადი დამაბოლოებელი სადგურიდან საბაზოსკენ.

ამ შემთხვევაში საბაზო სადგური დასაწყისში გამოკითხავს დამაბოლოებელ სადგურს, ე.ი. მიუერთდება გასაგზავნთა რიგს და მიიღებს მისგან კადრებს. შემდეგ საბაზო სადგური ეცდება მიუერთდეს გამოკითხვის სიაში შემდგომ სადგურს. ამ დროს საბაზო სადგურმა წინასწარ არ იცის უპასუხებს თუ არა გამოკითხვაზე დამაბოლოებელი სადგური და, თუ უპასუხებს,

ექნება თუ არა მას კადრები გასაგზავნად. იმისთვის, რომ შემცირდეს ზედნადები დანახარჯები, დაკავშირებული „ცარიელი“ დამაბოლოებელი სადგურისა და სადგურების, რომლებმაც რაღაც მიზეზების გამო შეწყვიტეს მუშაობა, გამოკითხვაზე, შემოთავაზებულია არ გამოიკითხოს ასეთი დამაბოლოებელი სადგურები გამოკითხვის შემდგომ ციკლში.

ამგვარად, დამაბოლოებელი სადგურების გამოკითხვა ხორციელდება შემდეგი წესით. საბაზო სადგური გამოკითხავს დამაბოლოებელ სადგურს თუ ის გამოკითხა წინა ციკლში და მის რიგში იყო გასაგზავნი კადრები, ან თუ წინა ციკლში მისი რიგი გამოტოვებული იყო. თუ კი გამოკითხვის წინა ციკლში დამაბოლოებელმა სადგურმა არ უპასუხა საბაზოს ან მისი გასაგზავნთა რიგი ცარიელი იყო, მაშინ მიმდინარე ციკლში საბაზო სადგური მას არ გამოკითხავს. იმის გამო, რომ საბაზო სადგურმა არ შეიძლება წინასწარ (ე.ი. დამაბოლოებელი სადგურის გამოკითხვამდე) შეაფასოს გასაგზავნთა რიგის ზომები, ამ რიგის მომსახურება სრულ ამოწურვამდე არ არის მიზანშეწონილი.

ამიტომ, შემოთავაზებულია საბაზო სადგურის მიერ დამაბოლოებელ სადგურში გასაგზავნი კადრების რიგის მომსახურების შემდეგი წესი: საბაზო სადგური რიგიდან იღებს მხოლოდ იმ კადრებს, რომლებიც რიგში იმყოფებიან დამაბოლოებელი სადგურის გამოკითხვის მომენტისთვის.

ადვილი დასანახია, რომ ზემოთ აღწერილი BWN-ის, რომელიც ფუნქციონირებს “მონაცემთა შეგროვების“ რეჟიმში, მახასიათებლების კვლევისთვის ადეკვატურ მოდელს წარმოადგენს პოლინგის სისტემა რიგების ადაპტური გამოკითხვით და მომსახურების რაბული სახის დისციპლინით.

განვიხილოთ პოლინგის ძირითადი მოდელი რაბული მომსახურებით. დავეუშვათ, რომ განაცხადის მომსახურების დრო i -ურ რიგში განაწილებულია ექსპონენციალურად პარამეტრით μ_i . სერვერის რიგებთან გადართვის დროები ასევე ნავარაუდევია ექსპონენციალურად განაწილებულად, პარამეტრით $q_i = 1/s_i$, $i = \overline{1, N}$.

თუ სერვერს, რიგის გამოკითხვის დროს, არ დახვდება მასში განაცხადი, იგი მას დატოვებს და შემდეგ ციკლში არ მიაკითხავს მას, თანაც არ ხარჯავს დროს მასზე გადართვისათვის. თუ მოცემულ ციკლში ყველა რიგი გამოსატოვებელია, სერვერი ჩერდება, უქმად არის შემთხვევითი დროის მანძილზე, რომელსაც ექსპონენციალური განაწილება აქვს პარამეტრით τ , რომლის ამოწურვის შემდეგ იწყებს ყველა რიგის გამოკითხვას.

რიგის გამოკითხვათა მომენტებს შორის საშუალო დრო წარმოადგენს ციკლის საშუალო დროს და განხილული სისტემისათვის განისაზღვრება ტოლობით:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N q_i u_i + \tau \prod_{i=1}^N (1 - u_i)}{1 - \rho}. \quad (3.13)$$

აღვნიშნავთ, რომ ციკლის დრო – ეს არის დროის პერიოდი, რომლის განმავლობაშიც სერვერი აკითხავს რიგებს, რომლებიც ექვემდებარებიან გამოკითხვას, ან სერვერის უქმად ყოფნის დრო, თუკი ციკლში ყველა რიგი უნდა იქნეს გამოტოვებული.

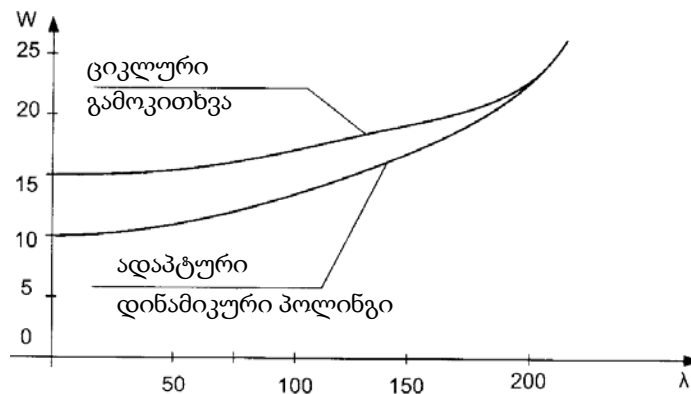
რიცხვითი ანალიზის დასრულებისათვის, ჩავატარებთ ქსელის, რომელიც ფუნქციონირებს “მონაცემთა შეგროვების“ რეჟიმში, გამოკითხვის ორი მეთოდის შედარებას: საბაზო სადგური ყოველთვის გამოკითხავს ყველა რიგს გამოკითხვის ციკლში, მაშინაც კი, თუკი ისინი ცარიელნი იყვნენ წინამდებარე ციკლში; ბაზური სადგური გამოტოვებს ცარიელ რიგებს გამოკითხვის შემდგომ ციკლში (ადაპტური დინამიკური პოლინგი).

ჩავატაროთ შედარებითი ანალიზი რადიოფიჭისთვის შემდეგი პარამეტრებით: რიგების რაოდენობა $N=3$, შემომავალი ნაკადების ინტენსივობები $\lambda_1=\lambda_2=\lambda_3=1500$ იღებენ მნიშვნელობებს 1-დან 200-მდე ბიჯით 10, რიგების მომსახურების ინტენსივობები $\mu_1=\mu_2=\mu_3=4500$, რიგებთან მიერთების ინტენსივობები $s_1 = s_2 = s_3 = 1500$.

მოდელირების შედეგები მოყვანილია ნახ. 3.2.

ნახ. 3.2-დან ჩანს, რომ ადაპტური დინამიკური პოლინგი იძლევა საგრძნობ მოგებას ნაკლებად დატვირთული რიგების არსებობისას, ხოლო ძლიერ დატვირთულ სისტემაში ხდება

ციკლური გამოკითხვისა და დინამიკური პოლინგის რეჟიმებში ლოდინის საშუალო დროის დამთხვევა.



ნახ. 3.2. ლოდინის საშუალო დროის დამოკიდებულება λ -დან ციკლური გამოკითხვისას ადაპტური მექანიზმით

ნახ. 3.2-დან ჩანს, რომ ადაპტური დინამიკური პოლინგი იძლევა საგრძნობ მოგებას ნაკლებად დატვირთული რიგების არსებობისას, ხოლო ძლიერ დატვირთულ სისტემაში ხდება ციკლური გამოკითხვისა და დინამიკური პოლინგის რეჟიმებში ლოდინის საშუალო დროის დამთხვევა.

3.4. დასკვნები მესამე თავთან დაკავშირებით

1. ნაჩვენებია, რომ პაკეტური ინფორმაციის უგამტარო ქსელში გატარების კვლევისათვის ეფექტურია პოლინგის მეთოდები.
2. ჩატარებულია დღეისათვის გამოყენებული პოლინგის მეთოდების ანალიზი. ნაჩვენებია, რომ მოცემული ამოცანისთვის მობილურ ქსელებში პაკეტების დაყოვნების შემცირებისთვის, საუკეთესო ვარიანტს წარმოადგენს გამოკითხვის ციკლური მეთოდი.
3. ნაჩვენებია, რომ BWN-თვის გადაცემის მაქსიმალური სიჩქარე შეიძლება უზრუნველყოფელი იქნეს ადაპტური დინამიკური პოლინგის გამოყენებისას.

თავი 4. MAC-პროტოკოლები BWN-ში

4.1. MAC-დონის ფუნქციები

IEEE 802.16-ის სტანდარტიზაციის საგანს წარმოადგენს ფიზიკური და MAC-დონეების აგების პრინციპები მუნიციპალური მასშტაბის ქსელების სხვადასხვა დანართებისათვის სატრანსპორტო გარემოს შესაქმნელად. ფიზიკური დონე უშუალოდ უზრუნველყოფს მონაცემების ნაკადის მიყვანას საბაზო სადგურიდან მომხმარებლის სადგურამდე (აბონენტამდე). გადასაცემი მონაცემების სტრუქტურების მრავალსახეობის ფორმირება და ძირითადი სისტემური პროცესების მართვა კი - MAC-დონის ფუნქციებია.

MAC-დონე ახორციელებს ფიზიკურ არხებთან შეღწევის მართვას (რაც შეესაბამება ISO/OSI მოდელის საარხო დონეს) და ქმნის ზედა დონის სხვადასხვა მომსახურებების მხარდაჭერის მექანიზმებს. ასე, მაგალითად, MAC-დონის პროტოკოლები მართავენ გადაცემის პარამეტრებს, განსაზღვრავენ კვანძების ურთიერთქმედების წესებს, შეღწევის რიგითობას, აკონტროლებენ შეერთებების მდგომარეობას და ა.შ. IEEE 802.16-ში ქსელის ელემენტების მართვა ცენტრალიზებულია - საბაზო სადგური აკონტროლებს გადაცემას როგორც პირდაპირ, ასევე უკუ არხებში.

ფიზიკურ დონეზე გამოყენებული სპეციფიკაციების მიუხედავად, IEEE 802.16-x სტანდარტებს გააჩნიათ ერთიანი MAC-პროტოკოლი, რომელიც აღწერს ქვედონეების ურთიერთქმედებას, მონაცემების ბლოკების ფორმატს, პოლინგის მექანიზმს და სხვ.

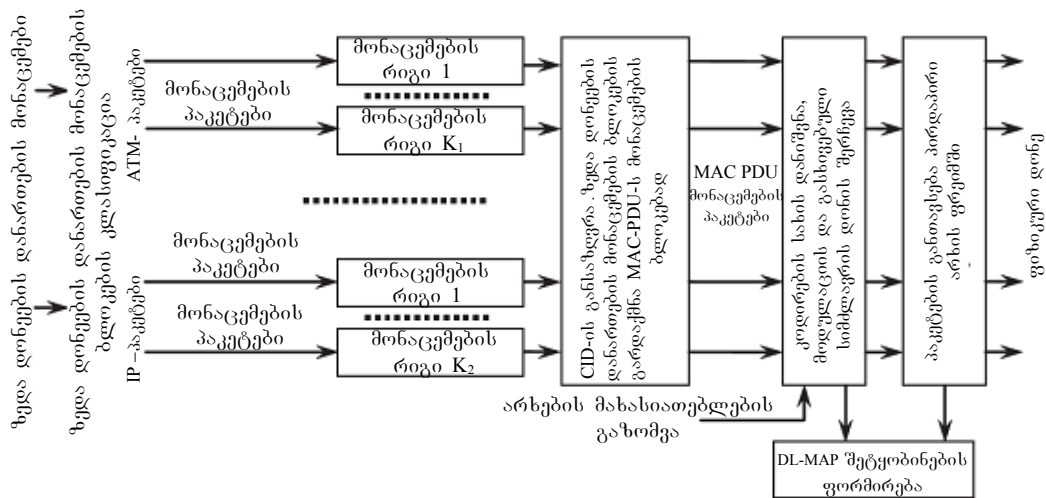
MAC-დონე ზედა დონეების დანართებიდან იღებს მონაცემების პაკეტებს და აფორმირებს მონაცემების ნაკადებს. კონკრეტულ დანართთან დაკავშირებულ მონაცემების ნაკადს სერვისული ნაკადი (Service Flow) ეწოდება, ხოლო ამ ნაკადის პაკეტებს მონაცემების სერვისული ბლოკები (Service Data Unit, SDU). პირდაპირ არხში შეღწევისა და გადაცემის პროცესში MAC-დონე ასრულებს [84, 85]:

- ✓ ზედა დონეების დანართების პროტოკოლების კლასიფიკაციას და მონაცემების ბლოკების (SDU) ფორმირებას;

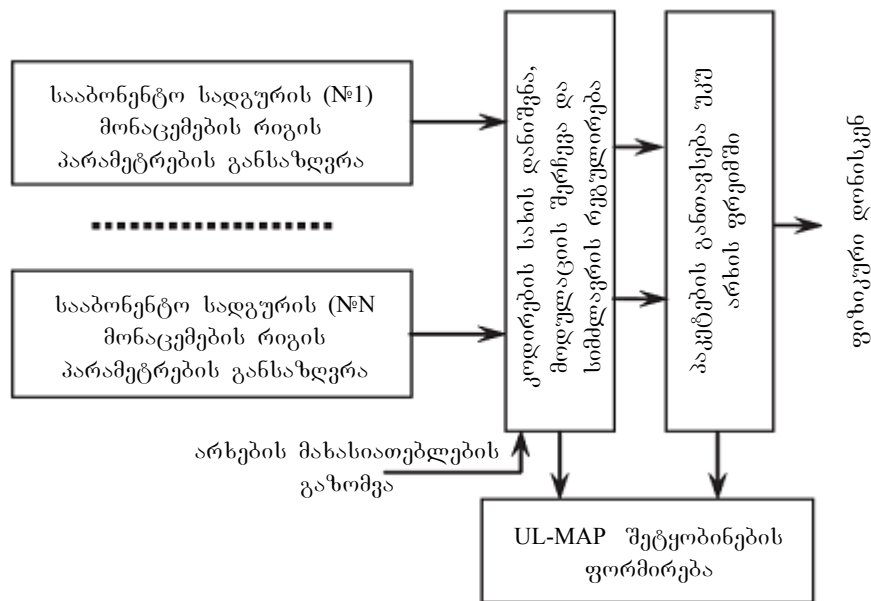
- ✓ განსაზღვრავს შეერთებების ტიპს და ანიჭებს მათ შეერთებების იდენტიფიკატორებს (Connection Identifier - CID). თითოეული CID შეესაბამება შეერთების თავის ტიპს და განსაზღვრავს ამ შეერთების პარამეტრებს;
- ✓ ზედა დონეებიდან მიღებულ მონაცემების პაკეტებს ინახავს რიგებში (თითოეული მონაცემების ნაკადისათვის გამოიყოფა ცალკე რიგი);
- ✓ გადაწყვეტილებას ღებულობს ამა თუ იმ რიგში MAC-დონის მონაცემების მიმდინარე ბლოკში მონაცემების პაკეტების რაოდენობის შესახებ;
- ✓ ზედა დონეების დანართებიდან მიღებულ მონაცემების ბლოკებს გარდაქმნის MAC-დონის PDU-ბლოკებად (მონაცემების პროტოკოლური ერთეული – Protocol Data Unit);
- ✓ MAC PDU ბლოკების დაშიფვრას;
- ✓ თითოეული MAC PDU-ს ნაკრებს უნიშნავს კოდირებისა და მოდულაციის სახეს, შეურჩევს გასხივებული სიმძლავრის დონეს. ამისათვის იყენებს სასამსახურო ინფორმაციას - თითოეული სერვისული ნაკადისათვის საჭირო QoS დონის, PDU-ს რაოდენობისა და სტრუქტურის, ასევე გადაცემის არხის მდგომარეობის შესახებ.
- ✓ განალაგებს MAC PDU ბლოკებს პირდაპირი/უკუ არხის ფრეიმებში. MAC-დონის ძირითადი ფუნქციები პირდაპირ და უკუ არხებში შეღწევისა და მართვის პროცესებში მოყვანილია შესაბამისად ნახ. 4.1 და 4.2.

უკუ არხით გადაცემის მართვის პროცესში MAC-დონე ასრულებს [85]:

- ✓ იღებს გადაწყვეტილებას სხვადასხვა რიგებში მონაცემების მოცულობის შესახებ, რომლებიც უნდა გადასცეს უკუ არხის მიმდინარე ფრეიმით;
- ✓ ნიშნავს კოდირებისა და მოდულაციის სახეებს, გასხივებული სიმძლავრის დონეს ცალცალკე მონაცემების თითოეული ნაკადისათვის;
- ✓ ნიშნავს დროით ინტერვალს გადაცემისათვის უკუ არხის ფრეიმში.



ნახ. 4.1. საბაზო სადგურის MAC-დონის ფუნქციები პირდაპირი არხით გადაცემის მართვის პროცესში

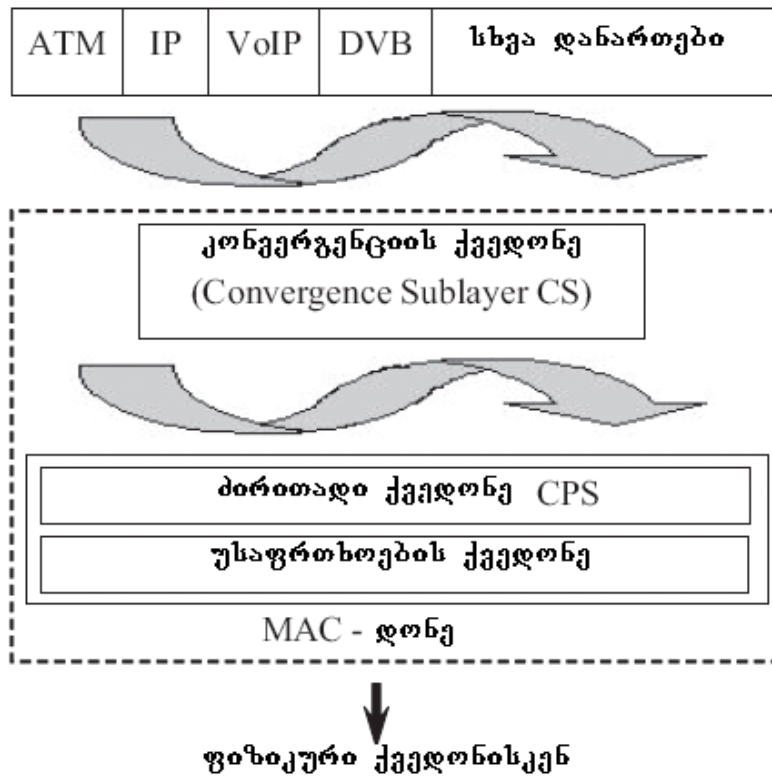


ნახ. 4.2. საბაზო სადგურის MAC-დონის ფუნქციები უკუ არხის გადაცემის მართვის პროცესში

პირდაპირი (უკუ არხის) ფრეიმში MAC PDU-ს ლოგიკური განთავსების შემდეგ ხორციელდება მათი გადაცემა ფიზიკური დონისაკენ და DL-MAP (UL-MAP) შეტყობინებების ფორმირება. ეს შეტყობინებები შეიცავენ მონაცემებს MAP PDU ნაკრებების რაოდენობისა და კოდირებისა და მოდულაციის დანიშნული სახეების შესახებ.

4.2. MAC-დონის არქიტექტურა

IEEE 802.16-ის MAC დონე ლოგიკურად იყოფა სამ ქვედონედ – კონვერგენციის ქვედონე (Convergence Sublayer, ან სერვისის გარდაქმნის ქვედონე), ე.წ. ძირითადი ქვედონე (Common Part Sublayer) და უსაფრთხოების ქვედონე (Privacy Sublayer), ნახ. 4.3.



ნახ. 4.3. IEEE 802.16 x-ის MAC-დონის არქიტექტურა

კონვერგენციის ქვედონე (სიგნალის გარდაქმნის ქვედონე) ასრულებს ზედა დონეების მონაცემების ნაკადების გარდაქმნასა და კლასიფიკაციას მათ შემდგომი გადაცემისათვის IEEE 802.16 ქსელში. მომსახურების ნაკადების ძირითად ტიპებს მიეკუთვნება ATM-დანართებისა და პაკეტური დანართების ნაკადები: IP, IEEE 802. 3 Ethernet, IEEE 802.1 Q და სხვ. (ცხრ. 4.1).

IEEE 802.16x სტანდარტების კონვერგენციის ქვედონეების მოდიფიკაციები

მხარდამჭერი პროტოკოლები	კონვერგენციის ქვედონის მოდიფიკაციები
ATM	CS ATM
IP	CS IPv4
IP	CS IPv6
IP	CS Ethernet (802.3)
IP	CS 802.1/Q VLAN (Virtual)
IP	CS IPv4 Ethernet-ზე
IP	CS IPv6 Ethernet-ზე
IP	CS IPv4 802.1/Q VLAN-ზე
IP	CS IPv6 802.1/Q VLAN-ზე
IP	CS Ethernet VLAN (ROHC)-ნიშნებით
IP	CS Ethernet VLAN (ERTCP)-ნიშნებით
IP	CS IPv4 ROHC (Robust Header Compression)-ით

გარდაქმნის მექანიზმი დანართების თითოეული ტიპისათვის სხვადასხვაა. ნაკადების კლასიფიკაცია აუცილებელია შემდგომში ფიზიკური არხით მათი გადაცემის პარამეტრების ოპტიმიზაციისათვის (მ.შ. სიხშირული ზოლების რაციონალური გამოყოფისათვის), მოცემული დანართის სპეციფიკაციის გათვალისწინებით. კლასიფიკაცია ხორციელდება დასამუშავებელი დანართის მონაცემების ბლოკის სასამსახურო თავსართის მიხედვით. შედეგად განისაზღვრება შეერთების იდენტიფიკატორი CID, რომელიც ერთნიშნად დაადგენს მომსახურების კატეგორიის პარამეტრებს და მოთხოვნილებებს მისი საჭირო ხარისხის უზრუნველყოფისათვის.

ამგვარად, კონვერგენციის ქვედონე უნდა განვიხილოთ, როგორც ზედა დონეების დანართების მონაცემების MAC და ფიზიკური დონეების მონაცემების ფორმატებთან ადაპტაციის საფეხური.

მონაცემების ბლოკებს კლასიფიკაციის შემდეგ ეწოდებათ მონაცემების სერვისული ბლოკები (SDU). რომელიმე ზედა დონის დანართთან ასოცირებულ მონაცემების ნაკადს ეწოდება სერვისული ნაკადი და მას გააჩნია საკუთარი იდენტიფიკატორი (Service Flow Identifier-SFID).

გარდა აღნიშნულისა, მონაცემების გადაცემის პროცესის ოპტიმიზაციის მიზნით, კონვერგენციის ქვედონეზე ხდება განმეორებადი პაკეტების თავსართების მოცილება. ეს ხორციელდება, მაგალითად, თუ პაკეტების წყარო და მიმღები გარკვეული დროის განმავლობაში არ იცვლებიან. შეერთების იდენტიფიკატორი ასოცირდება ამ ნაკადთან, ამიტომ დამატებითი მონაცემების გადაცემის აუცილებლობა არ არსებობს. მიმღებ მხარეზე თავსართები აღდგება. განმეორებადი თავსართების მოცილების მექანიზმს უწოდებენ – Payload Header Suppression.

ძირითადი ქვედონე (Common Part Sublayer – CPS). MAC-დონეზე მეორე ქვედონეა ე.წ. ძირითადი ქვედონე – CPS. აქ კონვერგენციის ქვედონეზე კლასიფიცირებული ზედა დონეების დანართების მონაცემების ბლოკები გარდაიქმებიან MAC-დონის მონაცემების ბლოკებად (MAC PDU ბლოკები). ეს ბლოკები ფიზიკურ პაკეტებად ინკაფსულირების შემდეგ გადაეცემა ფიზიკურ დონეს [84, 56]. ძირითად ქვედონეზე, მონაცემების სერვისული ბლოკების ფრაგმენტაციისა და MAC-PDU მონაცემების ბლოკებად გაერთიანების გარდა ხორციელდება QoS პარამეტრებისა და გადაცემაზე განმეორებითი შეკითხვების (ARQ) მართვა.

უსაფრთხოების ქვედონე (MAC-დონის მე-3 ქვედონე). ეს დონე უზრუნველყოფს უსაფრთხოების ძირითადი პროტოკოლების მხარდაჭერას: დაშიფვრას, დაშიფვრის გასაღებების მიმოცვლას, აუტენტიფიკაციას და სხვ. ქვედონე მხარს უჭერს ორ პროტოკოლს [86]:

- ✓ ინკაპსულაციის პროტოკოლი, რომელიც განსაზღვრავს კრიპტოგრაფიული პროტოკოლებისა და მათი MAC PDU-სთვის გამოყენების წესების კრებულს;

- ✓ გასაღებების მართვის პროტოკოლი (Privacy Key Management – PKM). ეს პროტოკოლი უზრუნველყოფს მომხმარებლის (სააბონენტო) სადგურებისათვის გასაღებების უსაფრთხო გადაცემას მათი ავტორიზაციისა და გასაღებების შემდგომი განახლების პროცესში.

მონაცემების კრიპტოგრაფიული დაცვის ყველა ოპერაცია სრულდება MAC PDU ბლოკებზე. მმართველი შეტყობინებები გადაიცემა დაუშიფრავად.

4.3. შეერთებების მართვისა და ორგანიზაციის თავისებურებები

სერვისული ნაკადები და ხარისხის მართვა. IEEE 802.16 ოჯახის სტანდარტებში მიწოდებული მომსახურების ხარისხის უზრუნველყოფის საკვანძო მექანიზმს წარმოადგენენ სერვისული ნაკადები. თითოეული ნაკადი ხასიათდება გადაცემის არხის მიმართ წაყენებული მოთხოვნებით, კერძოდ: სიგნალის დაყოვნების დროით და ამ დროის ფლუქტუაციით (ჯიტერი), გარანტირებული გამტარუნარიანობით და სხვ. თითოეულ სერვისულ ნაკადს მიეკუთვნება 32-თანრიგიანი სერვისული ნაკადის იდენტიფიკატორი (SFID), რომლის მიხედვითაც საბაზო სადგური განსაზღვრავს მოცემული შეერთების პარამეტრებს, დაკავშირებულს ამ სერვისულ ნაკადთან.

IEEE 802.16-ის სატრანსპორტო გარემო აფორმირებს მონაცემების ნაკადების გადაცემის საკომუნიკაციო არხებს სხვადასხვა დანართებისათვის (სერვისებისათვის): IP, ვიდეომონაცემები, ATM, E1 და VoIP ტიპის პაკეტები და ა.შ. თითოეულ დანართს გააჩნია თავისი მოთხოვნილება გადაცემის სიჩქარისადმი, საიმედოობისა და კრიპტოდაცვისათვის. თითოეული დანართის მონაცემები რადიოარხით გადაიცემა თავისი სპეციფიკის გათვალისწინებით. სტანდარტიზაციის მიზნით შემოღებული იქნა აგრეთვე სერვისული კლასის კატეგორიის ცნება (ეს არის გადაცემის პარამეტრების ნაკრები, ტიპური დანართებისათვის).

სერვისული ნაკადების კლასიფიკაცია ხორციელდება კონვერგენციის ქვედონეზე. ეს ოპერაცია დადის ზედა დონიდან მიღებული პაკეტის სათაურის შესაბამისი ველების შედარებაზე

კლასიფიკატორების ნაკრებთან. იდენტიფიკატორების თანხვედრის შემთხვევებში CID და SFID ასოცირდებიან პაკეტთან და სერვისული ნაკადების პარამეტრები გადაიცემა მმართველი DSC-RSP შეტყობინებაში (ე.წ. მომსახურების დინამიკური ცვლილების შეტყობინება [57, 86]).

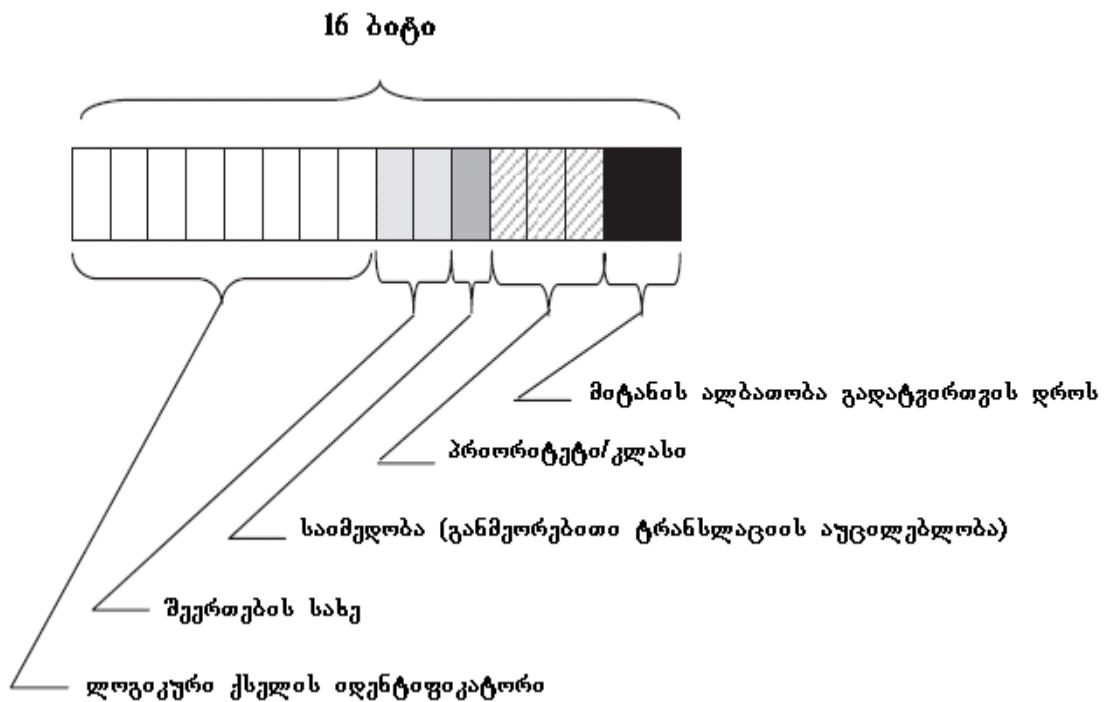
IEEE 802.16 სტანდარტში QoS-ის კონტროლისათვის ასევე გამოიყენება მექანიზმები: რიგების ფორმირება; სიხშირეების ზოლების რეზერვში შენახვა, (Unsolicited Grant Service, UCS); rt-PS-ს გამოკითხვა (Real Time Polling Service – რეალურ დროში მომსახურებისათვის); nrt-PC გამოკითხვა (Non-Real Time Polling service – მომსახურებისათვის რეალური დროის ხარისხის მოთხოვნის გარეშე); მომსახურება ნარჩენი პრინციპით (Best Effort, BE). ისეთი პარამეტრები, როგორებიცაა – მონაცემების გადაცემის პაკეტური და გარანტირებული სიჩქარეები (Peak Data Rate, Guaranteed DATA Rate) და მომხმარებლის პრიორიტეტი (მომსახურების კატეგორია) თითოეული მომსახურებისა და კავშირის მიმართულებისათვის ფორმირდება დამოუკიდებლად.

მმართველი შეტყობინებები. მმართველი შეტყობინებები წარმოადგენენ მართვის ძირითად მექანიზმს WiMAX ქსელებში. მართვის ყველა ფუნქცია – პაკეტების პროფილების აღწერა, შედწევის მართვა, კრიპტოდაცვა – რეალიზდება მმართველი შეტყობინებებით. შეერთების ტიპის მიხედვით შეტყობინებები იყოფა სამ კატეგორიად: ფართოსამაუწყებლო, საბაზისო და პირველადი. IEEE 802.16 სტანდარტის პირველ ვერსიებში (მაგ. 802.16.a) იყო 32 მმართველი შეტყობინება. სტანდარტის ბოლო ვერსიაში (IEEE 802.16.e) ეს რიცხვი კიდევ უფრო მაღალია და შეადგენს 256-ს [86, 87].

შეერთების ორგანიზაცია. IEEE 802.16-ში შეერთების ორგანიზაციის ქვეშ იგულისხმება MAC-დონეზე გადამცემ და მიმღებ მხარეებს შორის ლოგიკური კავშირების დამყარება სერვისული ნაკადების გადასაცემად. თითოეულ შეერთებას მიენიჭება 16-თანრიგიანი იდენტიფიკატორი (CID), რომელიც განსაზღვრავს შეერთების ტიპს და მახასიათებლებს. CID-ის ფორმატი მოყვანილია ნახ. 4.4 [86]. CID-ის მიხედვით საბაზო სადგური ერთმნიშვნელოვნად განსაზღვრავს სერვისულ ნაკადს და მისი გადაცემისათვის აუცილებელ

პარამეტრებს. როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული სხვადასხვა დანართს გააჩნია სხვადასხვა მოთხოვნილება გადაცემის სიჩქარის, ხარისხის და უსაფრთხოების მიმართ, რომლებიც გათვალისწინებული უნდა იქნას მონაცემების ნაკადის რადიოარხით გადაცემის დროს.

MESH ტოპოლოგიის ქსელებისათვის CID – იდენტიფიკატორის ჩვეულებრივ სტრუქტურას ემატება 8-ბიტანი თავსართი – Link ID.



ნახ. 4.4. შეერთებების იდენტიფიკატორის (CID) სტრუქტურა

როგორც აღნიშნული იყო შეერთებების კლასიფიკაცია ხორციელდება ზედა დონეების დანართების მონაცემების ბლოკების სამსახურებრივი სათაურების საშუალებით. ასე, მაგალითად, ATM-ის პროტოკოლების თანახმად შეერთებების კლასიფიკატორი წარმოადგენს ATM-უჯრედის პარამეტრების ნაკრებს, კერძოდ-ვირტუალური მარშრუტის 8-ბიტანი იდენტიფიკატორს (Virtual Path Identifier) და ვირტუალური არხის 32-ბიტანი იდენტიფიკატორს (Virtual Channel Identifier) [86, 87].

საარხო რესურსების გამოყოფის მექანიზმები. IEEE 802.16- არხებთან შედგენა ხორციელდება მომხმარებელი სადგურის (ტერმინალის, მობილური ტელეფონის) მიერ მომსახურებაზე მოთხოვნის (Demand Assigned Multiple Access – DAMA) გადაცემით [88]. განასხვავებენ

ორი ტიპის მოთხოვნას – შემთხვევითი და გეგმიური. ამასთანავე, სტანდარტით განისაზღვრება ორი კატეგორიის მოთხოვნა – მოთხოვნა რესურსის მიწოდებაზე და მოთხოვნა რესურსის შეცვლაზე. რეაქციას მოთხოვნაზე წარმოადგენს ნებართვა საინფორმაციო ნაკადების მიმოცვლაზე და ამასთანავე დროითი ინტერვალის დანიშვნა გადაცემაზე უკუ არხში. ეს ინფორმაცია აისახება პირდაპირი არხის სასამსახურო შეტყობინებაში UL-MAP. მოთხოვნა რესურსის შეცვლაზე გადაიცემა სასამსახურო შეტყობინებებით UCD (Uplink Channel Descriptor).

შემთხვევითი მოთხოვნა გადაიცემა საკონკურენტო საფუძველზე უკუარხის სპეციალურ სასამსახურო დროით სლოტში.

გეგმიური მოთხოვნების პროცედურებს სისტემური გამოკითხვა (Polling) ეწოდება [62]. საბაზო სადგური ადრეულად არეზერვებს დროით ინტერვალს სამომხმარებლო სადგურისათვის, ამ უკანასკნელის მიერ რესურსის მიღების ან შეცვლის მოთხოვნის გადასაცემად. როგორც, შედეგი ამ დროს სხვადასხვა მომხმარებელს შორის კონკურენცია შეღწევაზე არ არსებობს, რაც გამორიცხავს კოლიზიურ სიტუაციებს.

სისტემური გამოკითხვა სრულდება ორ რეჟიმში: რეალური დროის (Real-Time) და არარეალური დროის რეჟიმში (Non-Real-Time). რეალური დროის რეჟიმში საბაზო სადგური სამომხმარებლო სადგურს გამოუყოფს დროით სლოტებს უკუ არხით მოთხოვნის გადასაცემად, დროითი ინტერვალით, რომელიც შეესაბამება შეღწევის პირობების შეცვლაზე მოთხოვნის წარმოქმნის პროგნოზირებად პერიოდს. ეს რეჟიმი გამოიყენება ისეთი დანართებისათვის, რომელთა მონაცემების პაკეტების გამოჩენა პერიოდულია, ხოლო პაკეტების სიგრძე – ცვლადი (მაგ. MPEG – ვიდეოფორმატისათვის).

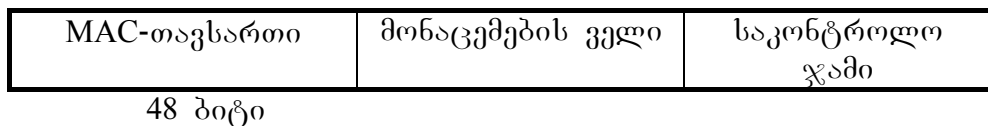
არა რეალური დროის რეჟიმში საბაზო სადგური სამომხმარებლოს აწვდის ანალოგიურ დროით ინტერვალს მოთხოვნისათვის, მაგრამ მოთხოვნის ინტერვალის მიწოდების პროცესის დაყოფნა გაცილებით დიდია ვიდრე რეალური დროის რეჟიმში. ეს რეჟიმი ხელსაყრელია FTR-პროტოკოლებით მომუშავე დანართებისათვის.

სამომხმარებლო სადგური საბაზო სადგურიდან ზოლის გამოყოფაზე პასუხის მიღების შემდეგ პირველი – სამი სატაქტო ინტერვალის განმავლობაში იწყებს მონაცემების გადაცემას. პასუხის მიუღებლობის შემთხვევაში სამომხმარებლო სადგური გაიმეორებს მოთხოვნას საჭირო ზოლის გამოყოფაზე.

სამომხმარებლო სადგურის მიერ საბაზო სადგურიდან 16 სატაქტო ინტერვალის განმავლობაში პასუხის მიუღებლობის შემთხვევაში სამომხმარებლო სადგური კარგავს უფლებას კონკურენტულ შეღწევაზე. ეს ნიშნავს, რომ საბაზო სადგურის რესურსი დროის ამ მომენტში სრულადაა გამოყენებული და იგი ვერ გამოუყოფს სამომხმარებლო სადგურს დროით ინტერვალს მონაცემების გადასაცემად.

4.4. MAC-დონის მონაცემების ბლოკები (MAC PDU)

MAC PDU წარმოადგენს იმ სასარგებლო დატვირთვის საბაზო ერთეულს, რომლის დამუშავება მიმდინარეობს WiMAX სისტემების MAC და ფიზიკურ დონეებზე. ის შედგება მმართველი თავსართისაგან, მონაცემების ველისაგან და საკონტროლო ჯამისაგან (ნახ. 4.5).



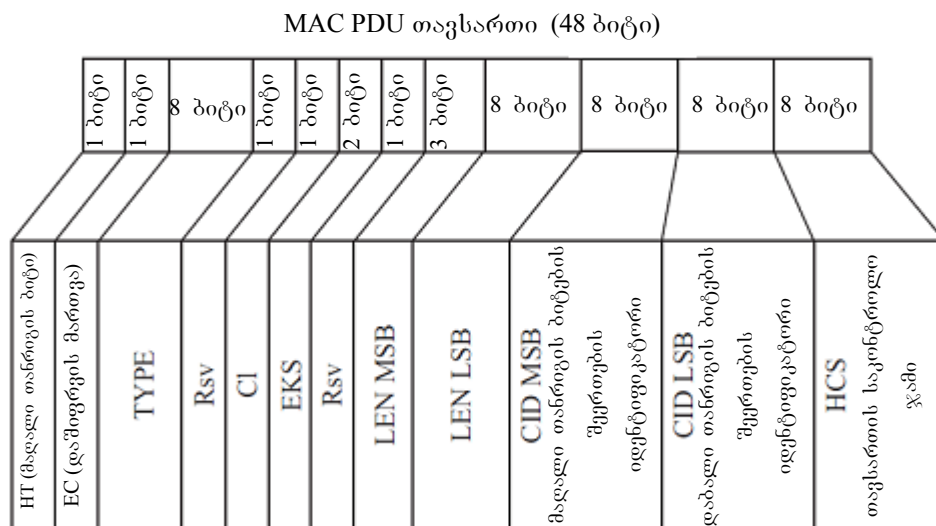
ნახ. 4.5. MAC PDU ბლოკის სტრუქტურა

სტანდარტით [86] განსაზღვრულია მმართველი MAC-თავსართების ორი ფორმატი (Frame Control Header, FCH):

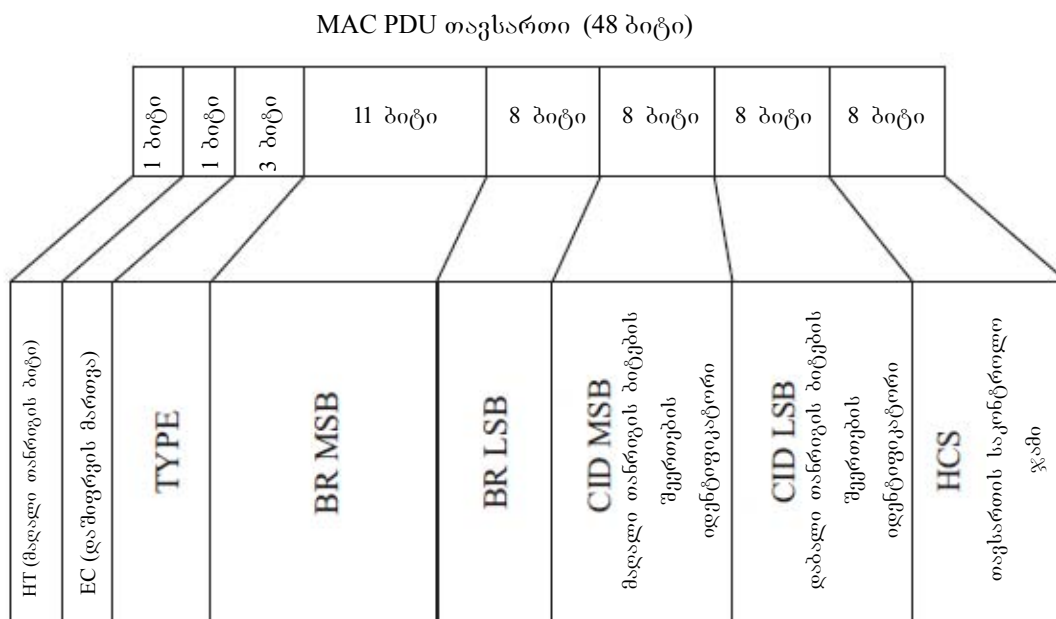
- ✓ მონაცემების MAC-ბლოკის თავსართი;
- ✓ გატარების ზოლის აკრძალვის თავსართი.

ზოლის მოთხოვნის დროს MAC-PDU-ში მონაცემების ველი არ არსებობს [86]. MAC-PDU-ს თავსართის საერთო სიგრძე 48 ბიტია (ნახ. 4.6). თავსართის თითოეულ ველს გააჩნია თავისი დანიშნულება და სიგრძე – ერთიდან რვა ბიტამდე [85, 86]. ველი HT განსაზღვრავს MAC-თავსართის დანიშნულებას (მონაცემების MAC-ბლოკი ან ზოლის შეზღუდვა). თუ ველის მაღალი თანრიგის ბიტი არის “0”, მაშინ

გენერირდება მონაცემების ბლოკის თავსართი, “1”-შემთხვევაში – სისშირული ზოლის აკრძალვის თავსართი. ველის მოთხოვნის ფორმირების დროს ველები R_{sv}, C1, EKS, R_{sv} და LEN იცვლება BR (Bandwidth Request) ველით (ნახ. 4.7) [85].



ნახ. 4.6. MAC-მონაცემების ბლოკის თავსართის სტრუქტურა



ნახ. 4.7. MAC-ფრეიმის თავსართის სტრუქტურა ზოლის მოთხოვნისას

EC (Encryption Control) ველი წარმოადგენს მონაცემების ველის დაშიფრვის ინდიკატორს. ველის ბიტი “0”-აღნიშნავს, რომ ველის მონაცემები დაუშიფვრავია, წინააღმდეგ შემთხვევაში (ბიტი “1”) - ხდება

დაშიფვრა. ზოლის მოთხოვნის შემთხვევაში EC-ველის ბიტი ყოველთვის “0”-ია.

TYPE-ველი მიუთითებს მონაცემების ველის ტიპზე: მონაცემების ველი - მონაცემების გადაცემისას და ზოლის მოთხოვნა – ზოლის მოთხოვნის შემთხვევაში.

დაშიფვრის გასაღების ინდექსის განსაზღვრისათვის თავსართი შეიცავს ველს EKS (Encryption Key Sequence – დაშიფვრის თანმიმდევრობის ველი ან დაშიფვრის გასაღების ინიციალიზაციის ვექტორი). რადგან დაშიფვრა მიმდინარეობს მხოლოდ მონაცემების გადაცემის პროცესში, ამიტომ ამ ველის არსებობას აზრი აქვს მაშინ, როდესაც EC-ველის ბიტი “1”-ია (რაც შეესაბამება მონაცემების დაშიფვრის არსებობას).

CI ველი წარმოადგენს ციკლური საკონტროლო ჯამის (CRC - Cycle Redundancy Check) არსებობის ინდიკატორს. თუ CI არის “1” მაშინ საკონტროლო ჯამი დამატებულია მონაცემების ველთან, წინააღმდეგ შემთხვევაში (CI - “0”) დამატება არ ხდება.

LER-ველი ასახავს მონაცემების ველისა და MAC-თავსართის სიგრძეს ბაიტებში. მისი საკუთარი სიგრძეა – 11 ბიტი (3 ბიტი – LEN MSB და 8 ბიტი – LEN LSB).

შეერთების იდენტიფიკაციის ველი მაღალი თანრიგის (CID MSB) და დაბალი თანრიგის (CID LSB) ბიტებისათვის შეიცავს 16 ბიტს, (2x8). ზოლის მოთხოვნის დროს შეერთების იდენტიფიკატორი მიუთითებს შეერთების იმ კლასზე, რომლისთვისაც მოითხოვება სისშირული ზოლი.

თავსართის 8-ბიტიანი შემოწმების ველი (Header Check Sequence) გამოიყენება თავსართში შეცდომების აღმოსაჩენად. BR-ველი განსაზღვრავს სამომხმარებლო (სააბონენტო) სადგურის მიერ უკუკავშირის არხით გადასაცემი ბაიტების მოთხოვნილ რაოდენობას. ამ რაოდენობის მიხედვით დაინიშნება სისშირული ზოლი.

MAC PDU შეიცავს [86]:

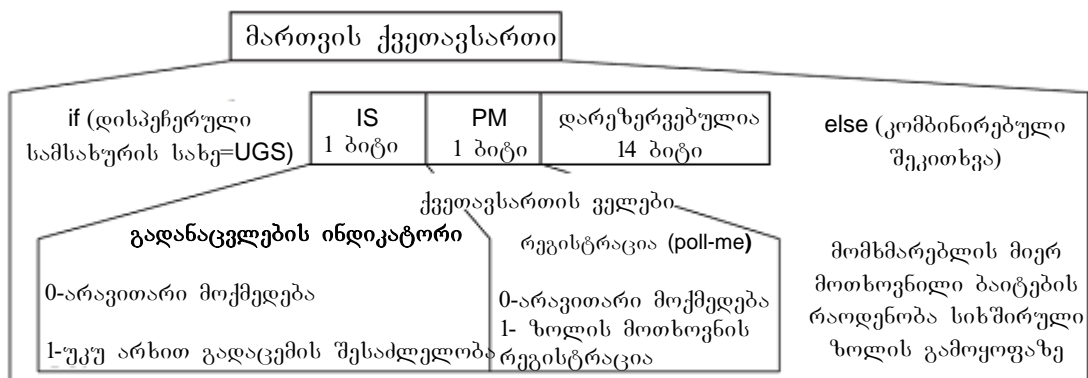
- ✓ MAC ქვეთავსართებს;
- ✓ მმართველ შეტყობინებებს;

✓ სასარგებლო მონაცემებს.

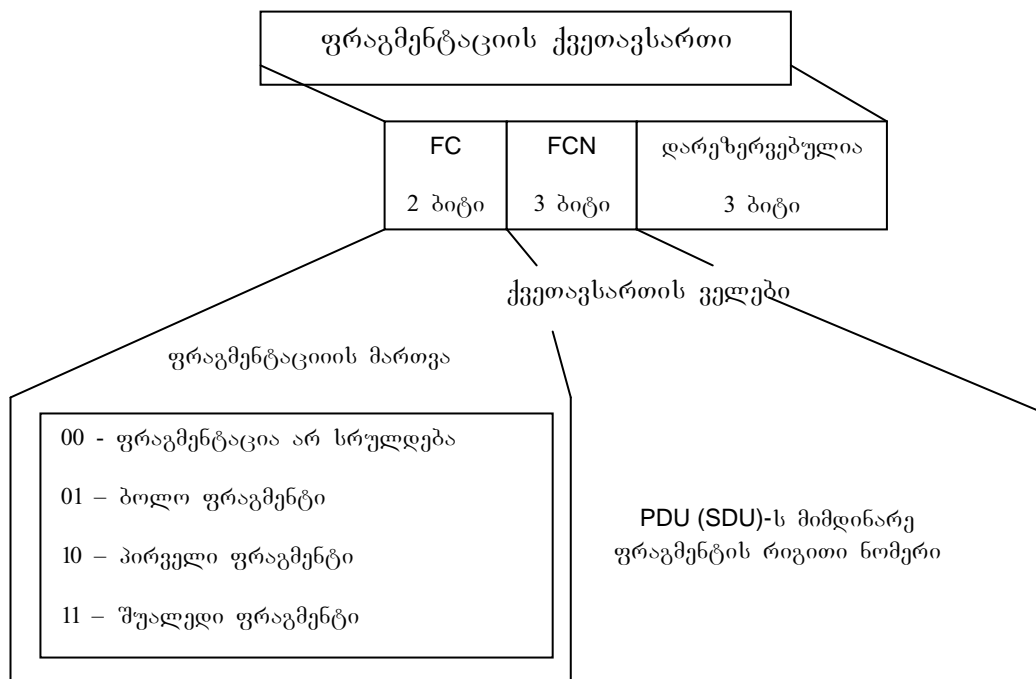
განასხვავებენ მართვის, ფრაგმენტაციისა და შეფუთვის ქვეთავსართებს. შეფუთვის ქვეთავსართები აუცილებელია, რადგან მონაცემების სერვისული ბლოკები, ტრაფიკის მოცულობიდან გამომდინარე, შეიძლება გადაიცემოდნენ ერთი ან რამდენიმე MAC PDU-ს შემადგენლობაში.

მართვის ქვეთავსართის ველის (Grand Manadement, GM) სიგრძე 2 ბაიტია. ეს ქვეთავსართი გამოიყენება სისშირული ზოლის მართვისათვის. შეფუთვის ქვეთავსართი გამოიყენება მაშინ, როდესაც ერთი MAC-PDU-ს მონაცემების ველი შეიცავს მონაცემების რამდენიმე SDU ბლოკს. ამის საწინააღმდეგოდ, ფრაგმენტაციის ქვეთავსართი გამოიყენება იმ შემთხვევაში, როდესაც ერთი SDU ბლოკი გადაიცემა რამდენიმე MAC-PDU-ბლოკით. SDU-ბლოკის ფრაგმენტაციის დროს თითოეული ფრაგმენტის პოზიცია მონიშნება რიგითი ნომრით, რაც საშუალებას აძლევს მიმღებს კორექტურად მოახდინოს დეფრაგმენტაცია. ქვეთავსართების ფორმატები ნაჩვენებია ნახ. 4.8-4.10 [86].

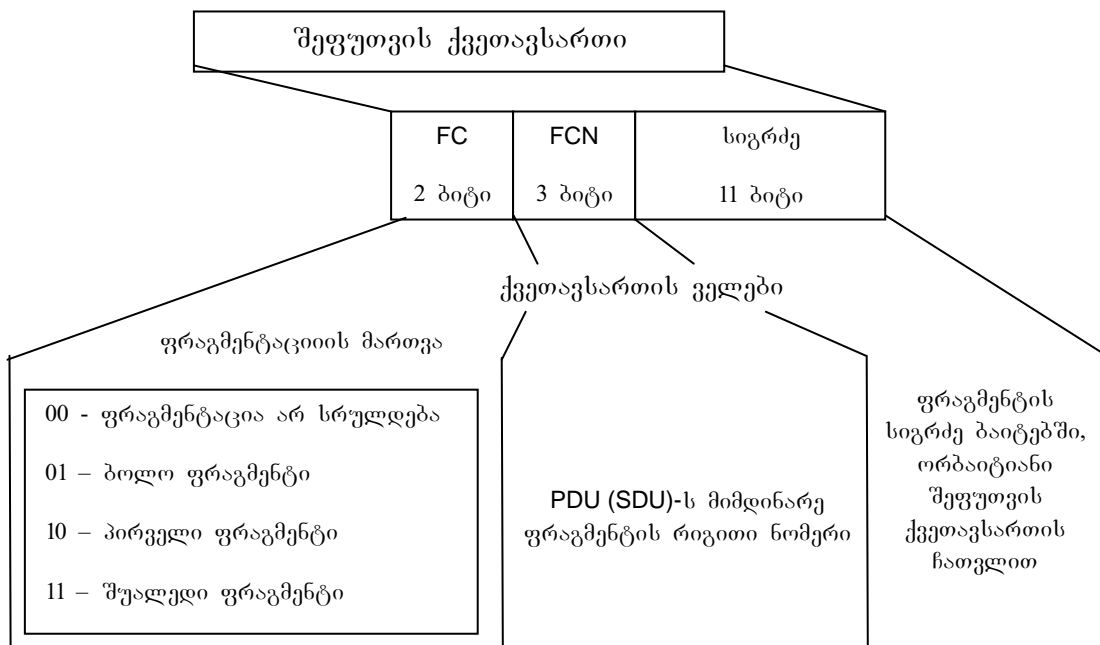
საკონტროლო ჯამის გამოთვლის პრინციპი დაფუძნებულია Ethernet-პროტოკოლზე და გამოიყენება ქვეთავსართისა და მონაცემების ველის ბიტებისათვის.



ნახ. 4.8. მართვის ქვეთავსართის სტრუქტურა



ნახ. 4.9. ფრაგმენტაციის ქვეთავსართის სტრუქტურა (FSH)



ნახ. 4.10. შეფუთვის ქვეთავსართის სტრუქტურა

4.5. MAC-დონის მონაცემების სტრუქტურა და ფიზიკური დონის პაკეტები

MAC-დონეზე ფორმირებული მონაცემების ბლოკები MAC-PDU ტრანსლირდება ფიზიკურ დონეზე, სადაც ისინი გარდაიქმნებიან ელექტრონულ სიგნალებად (ნახ. 4.11). ასეთი გარდაქმნის ერთ-ერთ ეტაპს წარმოადგენს მონაცემების გადაცემის ფორმატის ადაპტაცია, რომელიც გულისხმობს MAC-PDU-ბლოკების კონვერტაციას პაკეტებში (Burst). ეს უკანასკნელები წარმოადგენენ ფიზიკური დონის მონაცემების ელემენტარულ სტრუქტურულ ერთეულებს.

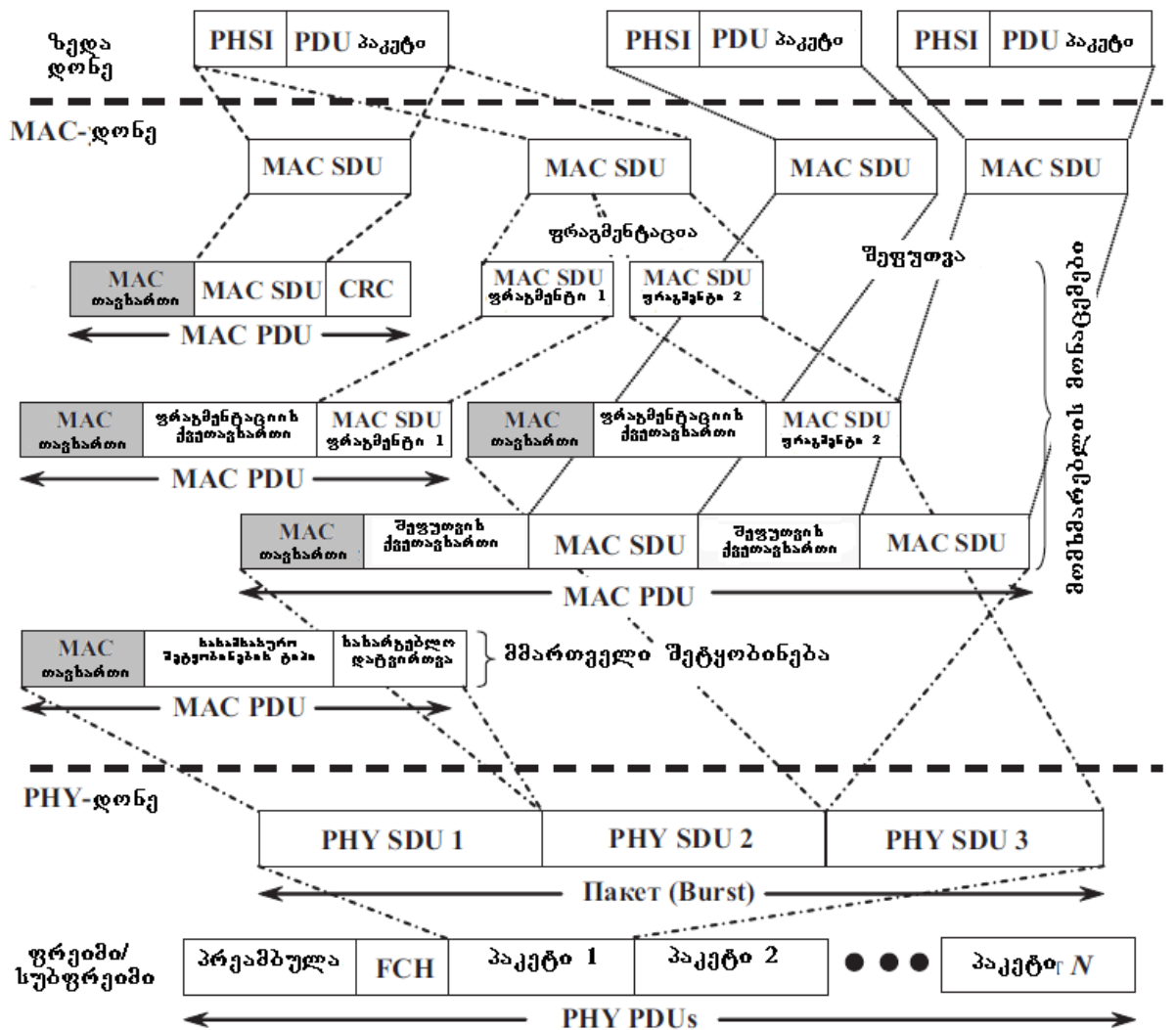
საბაზო და სამომხმარებლო (სააბონენტო) სადგურები ერთმანეთთან ათანხმებენ ფიზიკური პაკეტების პროფილებს (Burst Profile), მომსახურების ხარისხის (QoS) და გადაცემის ფიზიკური გარემოს გათვალისწინებით. პაკეტების პროფილი განისაზღვრება უნიკალური ინდიკატორით (Interval Usage Code DL/UL), რომელიც გადაიცემა მმართველი შეტყობინებით DCD/UCD. პაკეტის პროფილი შეიცავს ისეთ პარამეტრებს როგორებიცაა:

- ✓ მუშა სიხშირე;
- ✓ მაკორექტირებელი კოდირების სქემა;
- ✓ მოდულაციის სახე;
- ✓ სიგნალ-ხელშეშლის ზღვრული დასაშვები (SINR-Signal/(Interference+Noise) Ratio) და მინიმალური მნიშვნელობები, რომელიც მნიშვნელობების დროს შესაძლებელია გამოყენებული იქნას მოცემული პროფილი.

პაკეტები ავსებენ ფიზიკურ ფრეიმს, რომელიც წარმოადგენს ფიზიკური დონის მონაცემების ბლოკს (PHY PDU). ნახ. 4.11 ნაჩვენებია ზედა დონეების მონაცემების პროტოკოლური ბლოკების გადაცემა MAC და ფიზიკური დონეების გავლით, IEEE 802.16 სტანდარტით.

4.6. სამომხმარებლო (სააბონენტო) სადგურის ინსტალაცია ქსელში

სამომხმარებლო (სააბონენტო) სადგურის საბაზო სადგურთან პირველადი მიერთების (შეერთების დამყარების) დროს სრულდება მისი ინსტალაცია ქსელში (ნახ. 4.12).



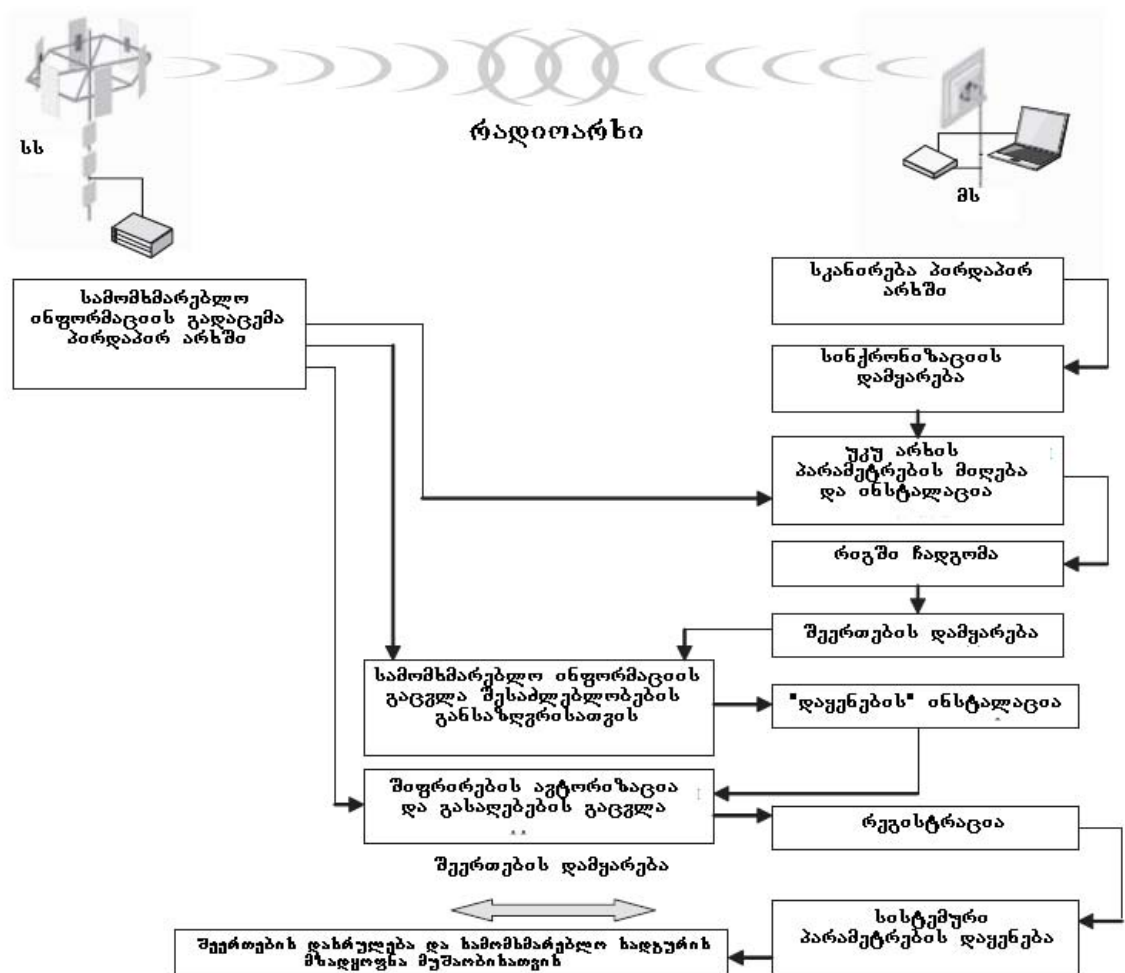
ნახ. 4.11. ზედა დონეების მონაცემების პროტოკოლური ბლოკების ადაპტაცია და მათი გადაცემა MAC და ფიზიკური დონეების გავლით IEEE 802.16.2004 სტანდარტით

სამომხმარებლო სადგურის იდენტიფიკაციისათვის გამოიყენება MAC-მისამართი, რომელიც მიენიჭება მოწყობილობის მწარმოებლის მიერ. ინსტალაციის პროცესი სრულდება ოთხ ეტაპად [87]:

- ✓ პირველი ეტაპი – მიმღების მიერ პირდაპირი არხის სისწორულ დიაპაზონის სკანირება საბაზო სადგურთან სინქრონიზაციისა და

მისგან გადაცემის აწეობისათვის საჭირო პარამეტრების მისაღებად;

- ✓ მეორე ეტაპი – სააბონენტო სადგურის ჩაყენება რიგში შეღწევის ნებართვის მიღებაზე;
- ✓ მესამე ეტაპი – საბაზო სადგურთან სასამსახურო ინფორმაციის მიმოცვლა საბაზო აწეობებისათვის (ინიციალიზაცია, ავტორიზაცია, დაშიფვრის გასაღებების გაცვლა, რეგისტრაცია და შეერთების შექმნა);
- ✓ მეოთხე ეტაპი – სისტემური აწეობების ინსტალაცია (ერთიან დროსა და თარიღის დაყენება, შეერთებების იდენტიფიკატორების ნაკრებების მიღება და ინსტალაცია და ა.შ.).



ნახ. 4.12. სამომხმარებლო (სააბონენტო) სადგურის ინსტალაცია პირველადი ჩართვის დროს

4.7. IEEE 802.16-x სტანდარტების MAC-დონის მართვის სპეციფიკაციები

WiMAX-სტანდარტებში გადაცემის გარემოში შეღწევის ეფექტურობა მართვამ მოითხოვა სისტემის ელემენტების ურთიერთქმედებისა და მიღწევის კონტროლის პროცედურების დეტალური აღწერა (კავშირის არხების კონტროლი, სისშირეების ზოლების დანიშვნა და სხვა). ამ მიზნით დამუშავებული იქნა ე.წ. MAC-დონის სპეციფიკაციები, რომლებიც განსაზღვრავენ ქსელური მოწყობილობების ურთიერთქმედებების წესებს.

თითოეული სპეციფიკაცია დამოკიდებულია ქსელის ტოპოლოგიაზე. WiMAX-ქსელებში ყველაზე ფართოდ გამოიყენება ქსელის ელემენტების ურთიერთქმედების ორი ტოპოლოგიური სქემა: სქემა “წერტილი-მრავალწერტილი” (Point-to-multipoint, PMP) და Mesh-სქემა (თითოეული-თითოეულთან და თითოეულის გავლით, ნახ. 4.13) [87, 88, 89].



სქემა “წერტილი-მრავალწერტილი”

Mech-სქემა

ნახ. 4.13. IEEE 802.16 ქსელების ტოპოლოგია

4.7.1. მართვა ქსელებში ტოპოლოგიით “წერტილი-მრავალწერტილი”

ასეთ ქსელებში მართვა პირდაპირ და უკუარხებში ხდება საბაზო სადგურის ბრძანებით. თითოეული საბაზო სადგური ერთდროულად ემსახურება მასთან პირდაპირ შეერთებულ (ჩართულ) რამდენიმე სამომხმარებლო სადგურს.

კონკრეტულ აბონენტებთან მონაცემების ბლოკების მისატანად გამოიყენება შეერთებების იდენტიფიკატორების (CID) ნაკრები და სამომხმარებლო სადგურების MAC-მისამართები [57]. განცხადებული მომსახურების ტიპის შესაბამისად სამომხმარებლო სადგური

ღებულობს არხთან ან უწყვეტი შეღწევის რეჟიმს, ან შეღწევის მოთხოვნას.

ქსელში დიდი რაოდენობის ერთდროულად მომუშავე სადგურების შემთხვევაში შეიძლება წარმოიქმნას კოლიზიები. მათი აღმოფხვრის მიზნით საბაზო სადგური მორიგეობით ატარებს სამომხმარებლო სადგურების გამოკითხვას, ამ გამოკითხვის შედეგად ადგენს ე.წ. “შეღწევის განრიგს”, აგრეთვე იყენებს დამატებით რესურსების გამოყოფის ხერხს. IEEE 802.16 სტანდარტებში კოლიზიების გადაწყვეტის კონკრეტული მექანიზმები განსაზღვრული არ არის. ქსელის მუშაობის ოპტიმიზაციისათვის ოპერატორები იყენებენ კოლიზიების გადაწყვეტის სხვადასხვა მეთოდებს და პროტოკოლებს.

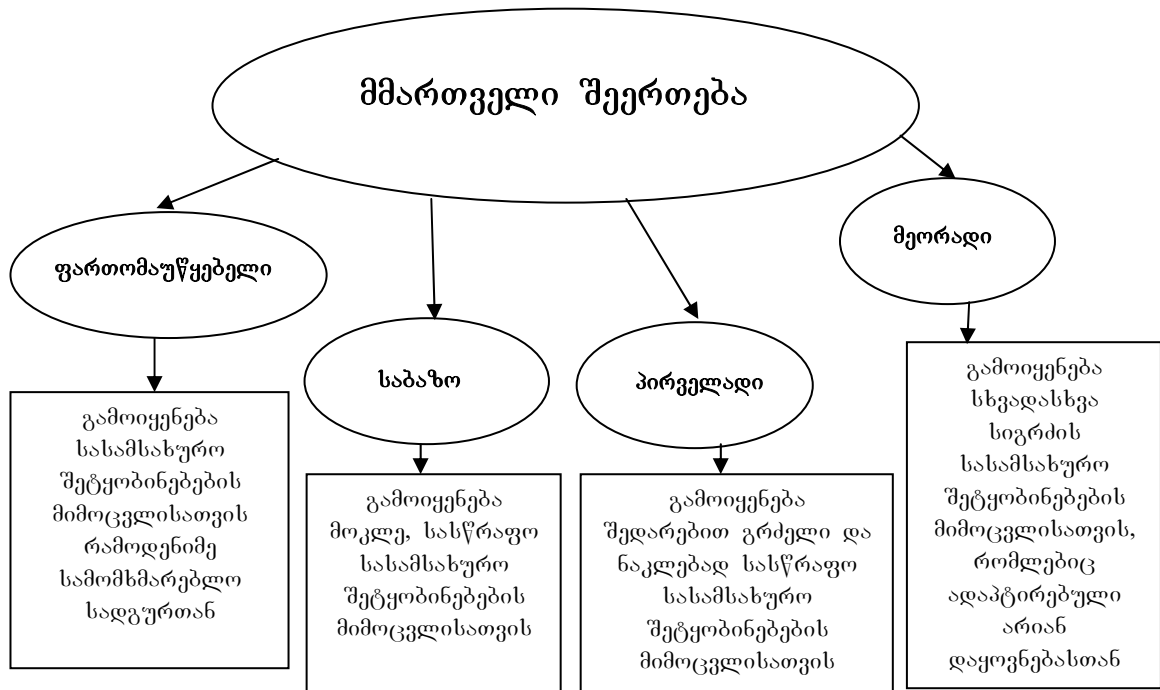
სასამსახურო ინფორმაციის მიმოცვლისათვის გამოიყენება ოთხი სახის სასამსახურო მმართველი შეერთება: ფართო სამაუწყებლო, საბაზო, პირველადი და მეორადი [88]. მმართველი შეტყობინებების ტიპი დამოკიდებულია სასამსახურო ინფორმაციის სასწრაფოების კატეგორიაზე (ნახ. 4.14). საჭიროა აღინიშნოს, რომ მეორადი მმართველი შეერთებები გამოიყენება მხოლოდ მართული სამომხმარებლო სადგურებისათვის.

4.7.2. მართვის თავისებურებები Mesh-ქსელებში

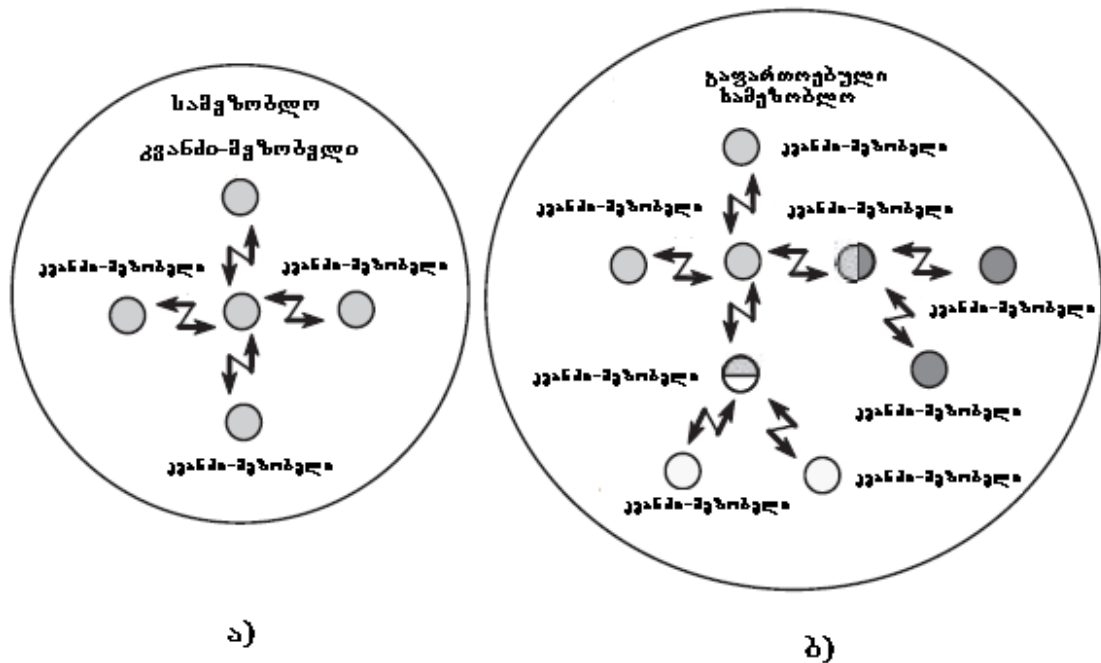
“წერტილი-წერტილი” და “Mesh”-ქსელების ტოპოლოგიების ძირითადი განსხვავება მარშრუტიზაციის პრინციპებშია. თუ ქსელში “წერტილი-წერტილი” ტრაფიკი მარშრუტიზირდება უშუალოდ სამომხმარებლო და საბაზო სადგურებს შორის, Mesh ქსელში ტრაფიკი შეიძლება გადადიოდეს მეზობელი სამომხმარებლო სადგურების გავლით. ამასთან თუ სადგურს გააჩნია პირდაპირი შეერთება სამომხმარებლო სადგურთან მას ეწოდება საბაზო, სხვა შემთხვევაში ეწოდებათ ქსელის კვანძები [88].

Mesh-ქსელებში ყველა კვანძს, რომლებსაც გააჩნიათ პირდაპირი შეერთება ე.წ. “ცენტრალურ” კვანძთან (ნახ. 4.15), უწოდებენ კვანძ-მეზობლებს (neighbor). ასეთი კვანძების ერთობლიობა ადგენენ სამეზობლოს (Neighborhood). გაფართოებული სამეზობლო (extended

neighborhood) დამატებით აერთიანებს ერთ-ერთი კვანძის ყველა მეზობელს თავისი სამეზობლოს საზღვრებში.



ნახ. 4.14. მმართველი შეერთებების სახეები



ნახ. 4.15. ჩვეულებრივი (ა) და გაფართოებული (ბ) მეზობლობა

საბაზო სადგური ვერ გადასცემს შეტყობინებას ქსელის სხვადასხვა კვანძს ტრაფიკის მარშრუტიზაციის კოორდინაციის გარეშე. ამისათვის იგი აგროვებს სასამსახურო ინფორმაციას, ისეთებს როგორებიცაა მონაცემები ქსელის რესურსების შესახებ, განცხადებული მომსახურებების მოთხოვნები, ამ მომსახურებების მიწოდების შესაძლებლობები და სხვა, ხოლო შემდეგ ამ მონაცემების საფუძველზე გამოიანგარიშებს თითოეული სამომხმარებლო სადგურებისათვის საჭირო რესურსს. სამომხმარებლო სადგურებმა უნდა შეათანხმონ ტრაფიკის ტრანზიტის რიგითობა, როგორც მინიმუმ გაფართოებული სამეზობლოს ფარგლებში (მონაკვეთი Mesh-ქსელის სამ კვანძს შორის). სამომხმარებლო სადგურები მიღებული სასამსახურო შეტყობინებებით განსაზღვრავენ თავიანთ რიგს (განრიგს) გამოყოფილ რესურსთან შეღწევაზე.

Mesh-ქსელში დამისამართება და შეერთებები ხორციელდება MAC-მისამართებითა და შეერთებების იდენტიფიკატორებით. თუ სამომხმარებლო სადგური წარმოადგენს კვანძს, MAC-მისამართი გამოიყენება მხოლოდ მისი პირველადი ჩართვის დროს. სამომხმარებლო სადგურის აუტენტიფიკაციის შემდეგ მასზე დამაგრდება სამისამართო კოდი – კვანძის იდენტიფიკატორი (Node ID), რომელიც გამოიყენება ყველა შემდგომი შეერთების დროს.

შეერთებების მარშრუტის ფორმირების დროს განისაზღვრება იმ მეზობელ კვანძებთან შეერთების რიგითობა, რომლებიც აწარმოებენ ტრაფიკის ტრანზიტს. ამისათვის გამოიყენება შეერთებების სახის იდენტიფიკატორი (Link ID). ეს წარმოადგენს 8-ბიტის სამისამართო კოდს, რომელიც შედის შეერთებების იდენტიფიკატორის შემადგენლობაში [86].

4.8. MAC-დონის ფუნქციების რეალიზაციის

თავისებურებები WiMAX მობილურ ვერსიაში

მობილობის მართვა. რეგიონალური ან ქალაქის ქსელის საბოლოო მომხმარებლის მობილურობის უზრუნველყოფა წარმოადგენს არატრადიციულ ამოცანას. პირველ რიგში – საჭიროა უზრუნველყოფილი იქნას აბონენტის თავისუფალი გადაადგილება დიდ

გეოგრაფიულ სივრცეში, ე.ი. მომსახურების ესთაპეტური გადაცემა საბაზო სადგურებს შორის აბონენტის გადაადგილების პროცესში, კავშირის ხარისხის გაუარესების გარეშე. მეორეს მხრივ მობილობის მხარდაჭერა გულისხმობს ქსელური რესურსების ოპერატიულ მართვას.

სტანდარტი IEEE 802.16.e წარმოადგენს IEEE 802.16-2004-ის ლოგიკურ განვითარებას მობილური შეღწევის შესაძლებლობების რეალიზაციის კუთხით, კერძოდ ფიზიკურ და საარხო (MAC) დონეებზე. MAC-დონეზე ძირითადი ცვლილებები შეეხო მობილობის მართვას, QoS-ის კონტროლს და ოპერატორული მომსახურების მიწოდების პროცედურებს. IEEE 802.16.e-ში შემოტანილი იქნა რიგი ახალი განსაზღვრებებისა, რომლებიც ეხება შეერთებების კლასიფიკაციასა და მონაცემების მიტანის სამსახურებს (ცხრ. 4.2).

სამომხმარებლო სადგურების გამოყენების რეჟიმები. IEEE 802.16.e-სტანდარტებში მობილურ ტერმინალების მუშაობის ორ ძირითად რეჟიმს – აქტიურს და პასიურს – ემატება კიდევ ორი რეჟიმი “ძილის” რეჟიმი (Sleep Mode) და ლოდინის რეჟიმი (Idle Mode) [57, 89]. ეს რეჟიმები შემოღებულია კვების წყაროს რესურსის ეკონომიის მიზნით. “ძილის” რეჟიმში მობილური სადგურები მონაცემების მიღება/გადაცემას ვერ ახორციელებს, მაგრამ რჩება ქსელში დარეგისტრირებულად. მობილური სადგური აქტიურიდან “ძილის” რეჟიმში გადასვლის წინ საბაზო სადგურს უგზავნის სასამსახურო შეტყობინებას SLP-REQ (Sleep Request). საბაზო სადგურიდან დადასტურების (SLP-RSP-Sleep Resphone Message) მიღების შემდეგ იგი გადადის “ძილის” რეჟიმში. ამ რეჟიმში მობილური სადგური იყენებს ორ სამუშაო დროით ფანჯარას: “ძილის” ფანჯარას (Sleep Window) და “მოსმენის” ფანჯარას (Listen Window). ამ ფანჯრების მინიმალურ და მაქსიმალურ ზომებს ადგენს საბაზო სადგური და მობილურ სადგურებს გადასცემს სასამსახურო შეტყობინებებს SLP-REQ/SLP-RSP [89].

IEEE802.16.e სტანდარტის სპეციფიკური ტერმინები და განსაზღვრებები

IEEE 802.16.d განსაზღვრება	IEEE 802.16.e	
	განსაზღვრება	შენიშვნა
შეერთება	სატრანსპორტო შეერთება	-
სერვისული ნაკადი	სერვისული ნაკადი	განისაზღვრება არა მთლიანად ქსელისათვის, არამედ “საბაზო სადგური-სააბონენტო სადგური“-წყვილისათვის
სერვისული კლასი	გლობალური სერვისული კლასი	კლასის დასახელება რჩება მუდმივი ყველა საბაზო სადგურისათვის
საბაზო სადგური	მომსახურე საბაზო სადგური	ბოლო საბაზო სადგური, რომელშიც რეგისტრირებული იყო მობილური სადგური
	მეზობელი საბაზო სადგური	საბაზო სადგური (განსხვავებული სერვისული საგან), რომლისგანაც მობილურ სადგურს შეუძლია მონაცემების მიღება
	საბაზო სადგური “ლუზა”	ხენდოვერის რეჟიმში მომსახურე საბაზო სადგური (MDHO)
ფართოზოლოვანი გადაცემა	ჯგუფური და ფართოზოლოვანი გადაცემა	გადაცემა მობილური სადგურების ჯგუფის ან ყველა სადგურის მისამართის
გადაცემის დაგეგმვის სამსახურები (3 კლასი) 1. შემთხვევითი (არა მოთხოვნილი) გადაცემა (Unsolicited Grant Service – UGS) 2. გადაცემა რეალურ დროში ცვალებადი სინქარით (real Time) 3. გადაცემა არა რეალურ დროში (non real Time)	გადაცემის დაგეგმვის სამსახურები (5 კლასი) (scheduling Services) 1. შემთხვევითი (არა მოთხოვნილი) გადაცემა (Unsolicited Grant Service – UGS) 2. გადაცემა რეალურ დროში ცვალებადი სინქარით (real Time) 3. გადაცემა რეალურ დროში ცვალებადი სინქარით და გაფართოებული შესაძლებლობებით (extended real-time with variable rate); 4. გადაცემა არა რეალურ დროში ცვალებადი სინქარით (non real Time with variable rate); 5. გადაცემა შეძლებისდამიხედვით (The best-effort service)	ყოველი სერვისისათვის განისაზღვრება ნორმირებული პარამეტრების სია

“ძილის” ფანჯარაში ყოფნის დროს მობილური სადგური გამორთავს უმრავლეს სამუშაო სქემას, რითაც მინიმუმამდე დაყავს მოხმარებული ენერგია. თუ ამ დროს ჩნდება ამ მობილური სადგურის მისამართით გამოგზავნილი პაკეტები, ისინი ბუფერიზდებიან საბაზო სადგურებში და დგებიან მობილური სადგურებისაკენ გაგზავნის რიგებში. “ძილის” ფანჯრის ზომა ცვალებადია. თუ მოცემული მობილური სადგურის მისამართით პაკეტები არ არის ამ ფანჯრის ზომა იზრდება (ორმაგდება) მაქსიმალურის შეღწევამდე. აუცილებლობის შემთხვევაში, ნებისმიერ დროს საბაზო სადგურს შეუძლია ფანჯრის ზომა დააბრუნოს საწყის მნიშვნელობამდე.

მოსმენის ფანჯარაში მობილური სადგური შედის სინქრონიზაციაში საბაზო სადგურთან და ამოწმებს პირდაპირ არხში ტრაფიკის არსებობის შეტყობინების ნიშანს (TRF-IND, Traffic Indication). თუ ეს შეტყობინება არის მაშინ მობილური სადგური გადადის აქტიურ რეჟიმში და ღებულობს მის მისამართით არსებული მონაცემების პაკეტებს.

“ძილის რეჟიმის” პარამეტრები განსაზღვრავენ ენერგოდაზოგვის კლასს. IEEE 802.16.e სტანდარტში გათვალისწინებულია ენერგოდაზოგვის 3 კლასი:

- ✓ პირველი კლასი – “მოსმენის ფანჯრის” ზომა ფიქსირებულია, ხოლო “ძილის ფანჯრის” ზომა ცვალებადია და ორმაგდება მაქსიმუმის შეღწევამდე;
- ✓ მეორე კლასი – ორივე ფანჯრის ზომები ფიქსირებულია;
- ✓ მესამე კლასი – არის მხოლოდ ერთადერთი “ძილის ფანჯარა”.

ლოდინის რეჟიმში მობილურ სადგურს შეუძლია მიიღოს მონაცემები საბაზო სადგურიდან ქსელში რეგისტრაციის გარეშე. ეს საშუალებას იძლევა დაიზოგოს მოხმარებული ენერგია ისეთი პროცედურების შესრულებაზე, როგორებიცაა: ესთაფეტური გადაცემა, საბაზო სადგურის სიგნალის ძებნა და სხვ. მობილური სადგური ჩაირთვება მხოლოდ მოსმენის ფანჯრის განმავლობაში. ასეთ რეჟიმს ზოგჯერ პეიჯინგის რეჟიმსაც უწოდებენ. ლოდინის რეჟიმში გადასვლა ხდება საბაზო სადგურის ბრძანებით, სამსახურებრივი შეკითხვის გადაცემითა და დადასტურების მიღებით. მობილური სადგურის

აქტივაცია კი ხდება საბაზო სადგურიდან მიღებული სიგნალით, მობილური სადგურისათვის შეტყობინებების (ტრაფიკის) არსებობის შესახებ.

ამ რეჟიმის ეფექტურობის ამაღლების მიზნით ქსელის ყველა საბაზო სადგური იყოფა პეიჯინგურ ჯგუფებად და თითოეული ეს ჯგუფი ფარავს დიდ მომსახურე ტერიტორიებს [89].

მობილური სადგურის ლოდინის რეჟიმში გადასვლის დროს, საბაზო სადგური განსაზღვრავს სინქრონიზაციის წესს, მოსმენის ინტერვალებისა და პეიჯინგური შეტყობინებების გადაცემის პარამეტრებს. ლოდინის რეჟიმიდან აქტიურ რეჟიმში სწრაფი გადასვლის მიზნით საბაზო სადგურს შეუძლია დროებით შეინარჩუნოს მობილური სადგურის ქსელური აწყობები, რომლებიც რეგისტრაციის პერიოდული შემოწმებების შემდეგ დაიშლებიან. აქტიურ რეჟიმში გადასვლის დროს მობილური სადგური არჩევს მისაღებ საბაზო სადგურს და სინქრონიზირდება მასთან. შემდეგ ხორციელდება სასამსახურო შეტყობინებების მიმოცვლა და განისაზღვრება რესურსებთან შეღწევის რიგითობა.

ჰენდოვერის პროცედურა. IEEE802.16.e სტანდარტის ჰენდოვერი განისაზღვრება, როგორც იმ პროცედურებისა და გადაწყვეტილებების ნაკრები, რომლებიც საშუალებას აძლევენ მობილურ სადგურებს გადაადგილდეს ქსელის დაფარვის ზონაში, მიიღოს მომსახურება სხვადასხვა საბაზო სადგურებიდან კავშირის გაწყვეტის გარეშე, მოძრაობის დროსაც. ჰენდოვერის პროცედურა შედგება რამდენიმე ეტაპისგან [89]:

- ✓ **ფიჭის შერჩევა.** ამ ეტაპზე მობილური სადგური სკანირებას უკეთებს რამდენიმე პრიორიტეტულ საბაზო სადგურს და ირჩევს მისთვის მისაღებს. ამისათვის გამოყოფილია დროითი ინტერვალები – სკანირების ინტერვალები. სკანირების დროს მობილური სადგურები ირჩევენ საბაზო სადგურს და იმავდროულად ინახავს მონაცემებს კანდიდატ საბაზო სადგურების შესახებ. ასეთი სკანირების შედეგს ეწოდება ასოცირება (association).

- ✓ **გადაწყვეტილების მიღება და ჰენდოვერის პროცედურის აქტივაცია.** ჰენდოვერის ინიცირება იწყება მომსახურების ერთი საბაზო სადგურიდან მეორეზე გადატანის გადაწყვეტილებების მიღებით. ეს გადაწყვეტილება შეიძლება მიიღოს მობილურმა ან საბაზო სადგურებმა, ან WiMAX ქსელის სხვა მმართველმა ელემენტმა. თუ გადაწყვეტილებას ღებულობს მობილური სადგური, მაშინ ის მოთხოვნას უგზავნის საბაზო სადგურს და ამასთანავე მიუთითებს ერთ ან რამდენიმე საბაზო სადგურს ჰენდოვერისათვის. მოთხოვნას შეიცავს სასამსახურო შეტყობინება MSHO-REQ (mobile Station Handoff Request). თუ გადაწყვეტილებას ღებულობს საბაზო სადგური ის აგზავნის შეტყობინებას მობილური სადგურისაკენ BSHO-RSP (Base Station Handoff Response), რომელშიც მიუთითებს იმ საბაზო სადგურებს, რომლებიც შეიძლება გამოყენებული იქნან ესთაფეტური გადაცემისათვის. პასუხად მობილური სადგური საბაზოს უბრუნებს შეტყობინება-ჩვენებას MSHO-IND (Mobile Station Handoff Indication), რომელშიც მითითებულია თუ რომელ ახალ საბაზო სადგურს ირჩევს ის ესთაფეტური გადაცემისათვის. ასეთ საბაზო სადგურს უწოდებენ მიზნობრივ საბაზო სადგურს (target BS).
- ✓ **სინქრონიზაცია მიზნობრივ საბაზო სადგურთან.** მიზნობრივი საბაზო სადგურის განსაზღვრის შემდეგ, მობილური სადგური სინქრონიზირდება მასთან პირდაპირ არხის ფრეიმების პრეამბულით და საბაზო სადგურიდან სასამსახურო შეტყობინებების (DL-MAP, UL-MAP, DCD, UCD და სხვ. იხ. §5.4) მიღების შემდეგ განსაზღვრავს პირდაპირ და უკუ არხებში შეღწევის წესსა და რიგითობას.
- ✓ **რანჟირება მიზნობრივ საბაზო სადგურიდან.** მობილური სადგური რანჟირების არხის გამოყენებით სინქრონიზირდება მიზნობრივ საბაზო სადგურთან უკუ არხით გადაცემისათვის და ღებულობს მისგან ინფორმაციას სიმძლავრის საჭირო დონის შესახებ.
- ✓ **მუშაობის დასრულება მომსახურე საბაზო სადგურთან.** მიზნობრივ საბაზო სადგურთან კავშირის დამყარების შემდეგ მობილური სადგური ასრულებს შეერთების პროცესს მომსახურე

საბაზო სადგურთან. ამისათვის იგი მომსახურე საბაზო სადგურებს გადასცემს ინფორმაციას მიზნობრივი სადგურის იდენტიფიკაციის შესახებ (HO-UND), რომლის მიხედვითაც მომსახურე საბაზო სადგური რთავს რესურსების შენახვის ტაიმერს (resource 0 zeta timer) და აგროვებს მობილური სადგურისაკენ დამისამართებულ მონაცემების ყველა ბლოკს. ამის შემდეგ ჰენდოვერის პროცედურა დასრულებულია.

ჰენდოვერის რეალიზაციის აღწერილი ვარიანტის გარდა IEEE802.16.e-ში გათვალისწინებულია კიდევ ორი ოპციური პროცედურა: ჰენდოვერი მაკრო განცალკევებით (macro diversity handover, MDHO) და სწრაფი გადართვა საბაზო სადგურებს შორის (Fast Base Station Switching, FBSS).

MDHO რეჟიმში მობილური სადგური ერთდროულად მუშაობს რამდენიმე საბაზო სადგურთან, რომლებიც გადასცემენ მას იდენტურ (ერთსადაიგივე) ინფორმაციებს ერთსადაიგივე სიხშირულ არხებში. ამისათვის დგება იმ საბაზო სადგურების სია (Diversity Set, DS), რომლებიც მხარს უჭერენ ამ რეჟიმს. ამ სიის ყველა საბაზო სადგური ინახავს მონაცემებს მობილური სადგურის შესახებ, მათ შორის მისი პირველად რეგისტრაციისა და აუტენტიფიკაციის შესახებ. მობილური სადგური ღებულობს სასამსახურო ინფორმაციას DS-სიის ყველა საბაზო სადგურისაგან ერთდროულად, ან მხოლოდ ერთი საბაზო სადგურიდან, რომელსაც ეწოდება “ღუზა” სადგური (anchor BS). ამ ბოლო შემთხვევაში “ღუზა” სადგურის მმართველი შეტყობინება შეიცავს ინფორმაციას DS-სიის ყველა დანარჩენი სადგურების შესახებ და ასევე მობილური სადგურის მისამართით არსებული მონაცემების პაკეტების შესახებ [90].

FBSS-რეჟიმში მობილური სადგური მუშაობს მხოლოდ DS-სიის ერთ-ერთ საბაზო სადგურთან. ამ შემთხვევაში “ღუზა”-სადგური შეიძლება იყოს ნებისმიერი საბაზო სადგური. FBSS-რეჟიმის თავისებურება იმაშია, რომ მომსახურების გადართვა საბაზო სადგურებს შორის ხდება სწრაფად, რადგან უკვე არსებობს

სინქრონიზაცია და სადგურებს გააჩნიათ სრული ინფორმაცია მობილური სადგურის შესახებ [90].

4.9. დასკვნები მეოთხე თავთან დაკავშირებით

1. ნაჩვენებია MAC-დონის საკვანძო როლი IEEE 802.16 სტანდარტის ფართოზოლოვან უგამტარო ქსელებში.
2. გაანალიზებულია MAC-დონის ფუნქციები, მისი არქიტექტურა, მომხმარებლის სადგურის ინსტალაცია ქსელში, IEEE 802.16-x MAC-დონის მართვის სპეციფიკაციები, მართვის თავისებურებები და შეერთების ორგანიზება, MAC-დონის მონაცემთა ბლოკები, ასევე MAC-დონის ფუნქციების რეალიზების თავისებურებები WiMAX-ის „მობილურ“ ვერსიაში.
3. სისტემატიზირებულია ყველა აუცილებელი მონაცემები, რომლებიც აუცილებელია WiMAX 802.16 და Wi-Fi 802.11 სტანდარტის მრავლობითი შედწევის პროტოკოლის იმიტაციური მოდელის შემუშავებისთვის

თავი 5. MAC-პროტოკოლის პაკეტების დაყოფნა WiMAX სისტემებში და მათი მინიმიზაციის გზები

5.1. ზოგადი მონაცემები

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access - სტანდარტი IEEE 802.16) სისტემის ფიზიკურ დონეზე წყდება მონაცემთა ნაკადის საბაზო სადგურიდან სააბონენტო სადგურებამდე მიწოდების ამოცანები. ამ მონაცემების სტრუქტურის ფორმირების ფუნქციები, ასევე სისტემის მუშაობის მართვის რეალიზება, სრულდება გადაცემის გარემოში შეღწევის მართვის დონეზე (MAC - Medium Access Control). არსთან MAC-დონის მიერ უზრუნველყოფილი შეღწევის კონტროლის მექანიზმი, ცნობილია ასევე როგორც მრავლობითი შეღწევის პროტოკოლი [1].

მოცემული ნაშრომის ამოცანას წარმოადგენს WiMAX 802.16 სტანდარტის მრავალჯერადი შეღწევის პროტოკოლის იმიტაციური მოდელის დამუშავება და იმის ჩვენება, თუ ქსელში მომუშავე რა რაოდენობის სამომხმარებლო სადგურების დროსაა ოპტიმალური ინფორმაციის დაყოფნების მნიშვნელობა ციკლური გამოკითხვის (Polling) პირობებში.

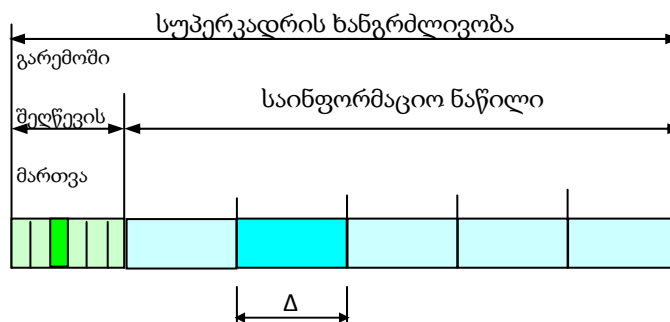
მოდელის დამუშავებისათვის ვიყენებთ MathCad [92].

5.2. პაკეტების დაყოფნის ალგორითმის დამუშავება

პირველ რიგში ვუჩვენებთ, რომ WiMAX სისტემის საბაზო სადგური (BS) „გამოკითხავს“ სააბონენტო სადგურებს მათ მიერ ზოლის რესურსის მოთხოვნის შესახებ. ამ მიზნით საბაზო სადგური პერიოდულად გადასცემს კადრებს, დაყოფილს დროითი ინტერვალებით: დროითი ღერძი იყოფა სუპერკადრებად, რომლებიც შედგებიან სამსახურებრივი და საინფორმაციო ნაწილებისაგან (ნახ 5.1). აქ Δ (დროის ფარდობითი ერთეული) – ერთი საინფორმაციო პაკეტის ხანგრძლივობაა, რომელიც მოდელის უმცირეს დროით ერთეულს წარმოადგენს [13].

თითოეული სააბონენტო სადგური თავის სლოტში საბაზო სადგურს ატყობინებს აქვს თუ არა მას მონაცემების პაკეტი გადასაცემად.

ამ დროს წარმოიქმნება პრობლემა, რომელიც იმაში მდგომარეობს, რომ კადრის ფორმატი ფიქსირებულია, ე.ი. თუ აბონენტთა მონაცემებისათვის სუპერ კადრში გამოყოფილია 3 ფანჯარა, გადაიცემა მონაცემების 3 პაკეტი, თუნდაც 10-ის გადაცემა იყოს მოთხოვნილი. მეორეს მხრივ, თუ განაცხადი მხოლოდ ერთია, საბაზო სადგური უქმად ხარჯავს რესურს კიდევ ორი არ არსებული პაკეტისათვის. ცხადია, რომ არხი არაეფექტურად გამოყენება და მოითხოვება არხის რესურსების უფრო დინამიკური მართვა. ამოცანა მდგომარეობს იმაში, რომ იმიტაციური მოდელირებით ჯერ მიღებულ იქნეს ასეთი სისტემის ალბათურ-დროითი მოდელი, შემდეგ კი ვიზრუნოთ უფრო მწარმოებლური MAC-პროტოკოლების განვითარებაზე, რომლებიც უზრუნველყოფენ არხის რესურსების უფრო ეფექტურ მართვას.



ნახ 5.1. სუპერკადრის ხანგრძლივობა

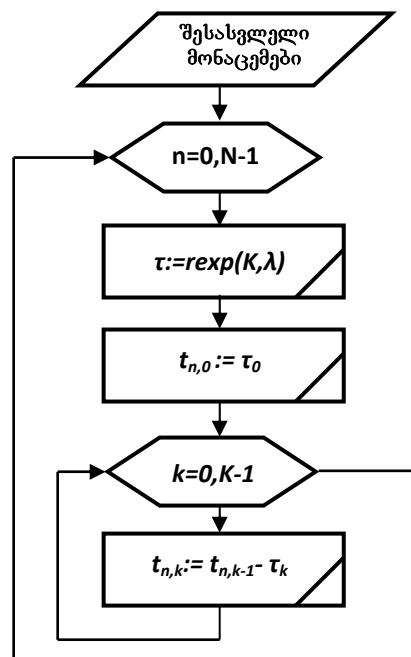
იმიტაციური მოდელირების განხორციელებისათვის საჭიროა სისტემის შესავალი პარამეტრების წარმოდგენა, ასეთი პარამეტრებია:

- G** - შესავალი დატვირთვის ჯამური ინტენსივობა (0-დან 1 ერლანგამდე);
- N** - სააბონენტო სადგურების რიცხვი (პროგრამაში წარმოვადგენთ კონსტანტით, რომელიც პრინციპში ვარიირებადი პარამეტრია);
- K** - პაკეტების რიცხვი თითოეულ სადგურში (წარმოდგენილია კონსტანტით, შემდგომში მონაცემთა მასივებთან მუშაობის მოხერხებულობისათვის);

- T_{sys} - სისტემური დრო – მოდელირების დრო;
- T_{pac} - პაკეტის მოცულობა დროის სისტემურ ტაქტებში;
- T_{Req} - მოთხოვნის მოცულობა სისტემურ ტაქტებში;
(დაყენდება საკმაოდ დიდი სიდიდე – ინტერვალი, რომელშიც მოდელირება მიმდინარეობს);
- N_{pac} - აბონენტების საინფორმაციო პაკეტების სუპერკადრებში ფანჯრების რიცხვი;
- λ - შემომავალი დატვირთვის ინტენსივობა თითოეული სადგურისაგან
(პირობათადაც მას ვიღებთ თანაბარს ყველა სადგურისათვის, ამიტომ $\lambda = \frac{G}{N \cdot T_{pac}}$).

იმავდროულად, სადგურის პაკეტების შემოსვლის დრო ექვემდებარება ექსპონენციალურ განაწილებას - $\tau_n = -\frac{1}{\lambda} \ln(rand_n)$.

თითოეული სადგურისთვის პაკეტების შემოსვლის მომენტების განსაზღვრისათვის ვქმნით ალგორითმს (ნახ. 5.2) [93].



ნახ. 5.2. თითოეული სადგურისთვის პაკეტების შემოსვლის მომენტების განსაზღვრის ალგორითმი

პირობის თანახმად, სადგურში შეიძლება შემოვიდეს K რაოდენობის პაკეტი, ხოლო ყოველი შემდგომი პაკეტის მომსახურება

კი შესაძლებელია წინამდებარე პაკეტების მომსახურების შემდეგ (პოლინგის ამომწურავი დისციპლინა). ამ მიზეზით ნებისმიერ სადგურს უნდა გააჩნდეს პაკეტების დამახსოვრების საშუალება, ე.წ. ბუფერული მახსოვრობა, სადაც პაკეტები დაელოდებიან საბაზო სადგურის მხრიდან მათ მომსახურებას. ბუფერული მახსოვრობის $N \times K$ მოცულობის მატრიცაში ნიშანი "1" თავისი არსით წარმოადგენს ალამს, რომელიც მიუთითებს, რომ n სადგურის k -ური პაკეტი არ არის მომსახურებული. მომსახურების შემდეგ კი ნიშანი "1" შეიცვლება "0"-ით.

ამგვარად, $for\ n=0,N-1$

$for\ k=0,K-1$

$buf(n,k):=1$

სუპერკადრი – მოდელის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი პარამეტრია. იგი შედგება სამსახურებრივი და საინფორმაციო ნაწილებისაგან.

სუპერკადრის ზომა (ხანგრძლივობა) განისაზღვრება ასე:

$$D_{Frame} = N \cdot T_{Req} + N_{Pac} \cdot T_{Pac}.$$

მოდელირების პროცესში სუპერკადრების მთელი რიცხვი N_{Frame} ტოლია:

$$N_{Frame} = floor(T_{sys} / D_{Frame}).$$

სისტემური დროის ღერძზე დროის მომენტები, როდესაც კადრები იწყება, წარმოვადგინოთ მასივით:

$for\ f=0,N_{Frame}-1$

$tfr_start(f) = D_{Frame} \cdot f$

$tfr_start(f) = tfr_start(f) + D_{Frame}$

პირველ ციკლში გავივლით სუპერკადრებს, შემდგომი ციკლი – თითოეულ სადგურის თითოეულ პაკეტი და გამოწმებთ განაცხადების მიღების დროებს სუპერკადრში მოხვედრის პირობაზე.

ფორმირებას ვუკეთებთ მასივს (რომლის სიგრძე – მოდელირების დროში სუპერკადრების რიცხვია), რომლის ელემენტები იქნებიან 0 ან 1 აღმების შემცველი $N \times K$ ზომის მატრიცები. შემცველები დროშების.

„1“ - განაცხადი ხვდება სუპერკადრში, „0“ - განაცხადი მოხვდა არა ამ კადრიდან. მასივი გამოიყურება ასე:

for f=1, N_{Frame}-1

for n=0, N-1

for k=0, K-1

if [tfr_start(f) <= t(n,k) < tfr_end(f)]

m(n,k)=1

m(n,k)=0 otherwise

flag(f)=m.

ვმუშაობთ მატრიცების ამ მასივთან – სადგურთან ერთიანების რაოდენობით ვსაზღვრავთ თუ რამდენი პაკეტი აღმოჩნდა მასთან ერთი სუპერკადრის განმავლობაში. საჭიროა დასამუშავებლად გაგზავნილ იქნეს ერთი პაკეტი (მოდელის გამმარტივებელი შეზღუდვა), ყველა დანარჩენი კი დაძრულ იქნეს რაღაც შემთხვევითი რიცხვით. ასე გაივლიან ყველა გამოკითხული სადგურები ერთ ციკლში (ციკლური გამოკითხვა) [91, 93].

შემდგომი მომენტი, რომელიც გათვალისწინებული უნდა იქნეს უკვე ამ ეტაპზე – ერთ სადგურთან სუპერკადრის განმავლობაში რამდენიმე პაკეტის არსებობა (ერთ სადგურს სუპერკადრის განმავლობაში შეუძლია გადასცეს მხოლოდ ერთი კადრი. IEEE 802.16 სტანდარტში ასეთ განაცხადებს Bandwidth Request – BWR უწოდებენ). ამ აღრიცხვის ვარიანტი იქნება თითოეულ სადგურთან ალამთა ჩვეულებრივი ათვლა ერთი სუპერკადრის განმავლობაში. შესაბამისად, გვექნება მატრიცა ზომით $N \times N_{Frame}$, ე.ი.

$$sum_{f,n} = \sum_{k=0}^{K-1} (flag_f)_{n,k}$$

იმ სადგურთა რიცხვის განსაზღვრისათვის, რომელთაც გააჩნიათ გადასაცემი პაკეტები, ვუმატებთ კიდევ ერთ ამჯამავს. ყველა სადგური ვერ შეძლებს პაკეტის გაგზავნას, როდესაც მსურველთა რიცხვი აღარბებს სუპერკადრში გამოყოფილი სლოტების რაოდენობას.

პაკეტები, რომლებიც ვერ მოხვდნენ გადასაცემად კადრში, გადაღებულ იქნებიან მინიმუმ კიდევ ერთი კადრით, ე.ი.

$$sum_N_{f,k} = \sum_{n=0}^{N-1} (flag_f)_{n,k}.$$

იმისთვის, რომ მოვაწესრიგოთ თითოეულ სადგურთან პაკეტების შემოსვლა, საჭიროა მათი განაწილება ზრდის მიხედვით ისე, რომ ერთი სუპერკადრის განმავლობაში მოხვდეს ერთი განაცხადი პაკეტზე. „ზედმეტი“ პაკეტების დროითი ძვრა საჭიროა, რათა შექმნილ იქნეს რაღაც ვირტუალური რიგის მსგავსი – თითქოს როდესაც პაკეტი შემოდის, იმის გამო რომ მომსახურებაზე უკვე იმყოფება ერთი (სხვა) პაკეტი, ის იცდის.

ამ ამოცანის გადაწყვეტისათვის ვსარგებლობთ შემდეგი მოსაზრებებით:

$s2=s1$ გადავსების მრიცხველს ვაკუთვნებთ სხვა ცვლადს, რათა გვქონდეს უკუ ათვლის შესაძლებლობა, %;

$for f=0, N_{Frame}$ ციკლი კადრების მიხედვით, %;

$if (s1(f)>J)$ გადავსების პირობის შემოწმება, %;

J ერთ კადრში ტაქტების რიცხვი სააბონენტო პაკეტებისთვის, %;

$for n=0, N-1$ ციკლი სადგურების მიხედვით, %;

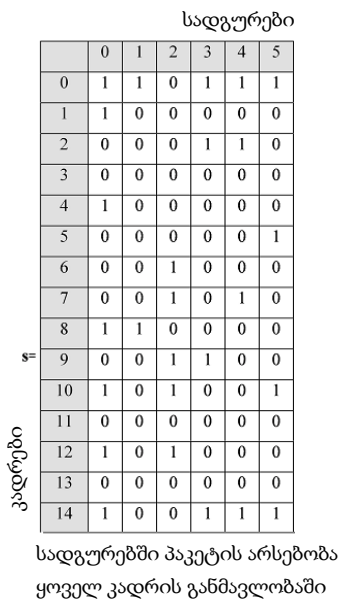
$for k=0, K-1$ ციკლი პაკეტების მიხედვით, %;

$if (flag(f))=1 \& s2(f) \neq s1(f)-J$ ორმაგი პირობა (პაკეტის არსებობა და თუ არის კიდევ მისთვის აღვილი კადრში), %;

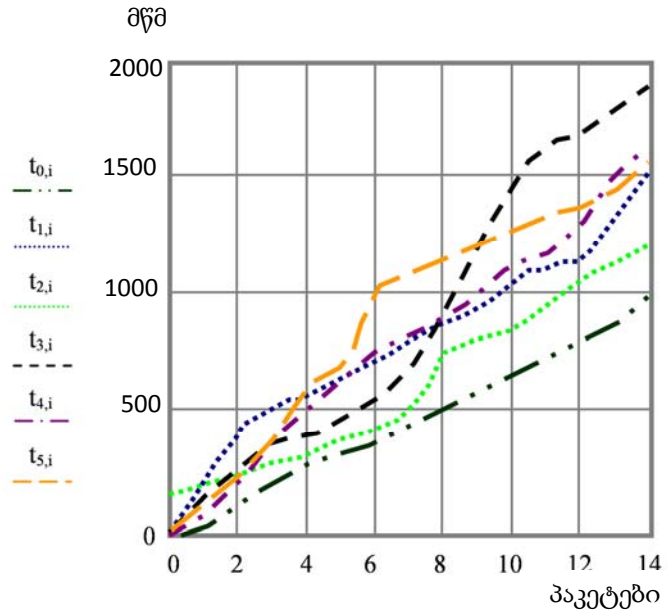
$s2(f)=s2(f)-1$ ვიღებთ ერთ აღვილს კადრიდან, %.

თითოეულ სადგურთან (აქ ნაჩვენებია 6 სადგური) პაკეტების არსებობის (1) ან არარსებობის (0) სურათი კადრის (სულ ნაჩვენებია 15 მათგანი) განმავლობაში მოყვანილია ნახ. 5.3, ა, ხოლო პაკეტების შემოსვლის დრო ნაჩვენებია ნახ. 5.3, ბ.

განათავსეთ რა პაკეტების შემოსვლის მომენტები კადრებს შორის, გადავლივართ მათ დამუშავებაზე. აქ აქტიურად გვაქვს ორი შემთხვევა – ელემენტარული და კადრის გადავსებით.



ა)



ბ)

ნახ. 5.3. ა) სადგურებში პაკეტების არსებობა; ბ) სადგურებიდან პაკეტების შემოსვლის დრო

1) პირველი (ელემენტარული) შემთხვევაა, როდესაც სუპერკადრში სააბონენტო პაკეტებისათვის გამოყოფილ ფანჯარათა რიცხვი საკმარისია სუპერკადრის ინტერვალზე შემოსულ მოთხოვნათა დასაკმაყოფილებლად;

$$\begin{aligned}
 & \text{for } f \in 0..N_{Frame}-1 \\
 & \text{for } n \in 0..N-1 \\
 & \text{for } k \in 0..K-1 \\
 & t_{დაყ,n,k} \leftarrow t_{n,k} \text{ if } (N_{Pac} - sl_f \geq 0) \wedge (flag_f)_{n,k} = 1
 \end{aligned}$$

ეს მარტივი შემთხვევაა – კადრის გადავსების გარეშე – დაყოვნების დრო $t_{დაყ}$ იანგარიშება გამოსახულებით:

$$t_{დაყ,n,k} = t_{fr_end\ f} - t_{n,k} + D_{Frame} + N \cdot T_{Req} + T_{Pac} \cdot j,$$

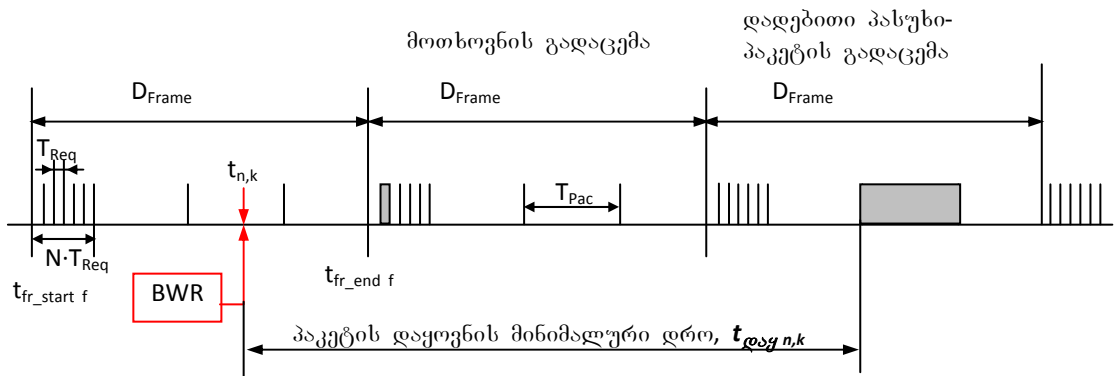
სადაც

$t_{დაყ,n,k}$ - პაკეტის დაყოვნის მინიმალური დროა;

BWR - ზოლის მოთხოვნაა;

D_{Frame} - კადრის ზომაა;

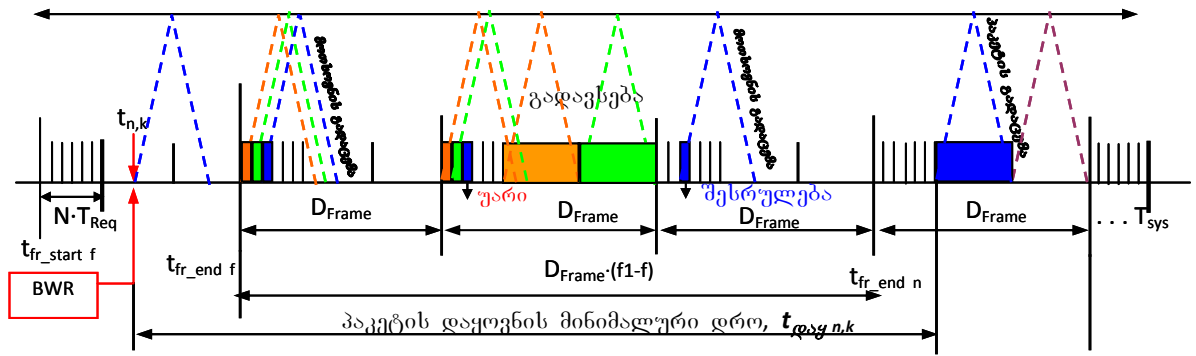
- T_{Req} - ზოლის მოთხოვნის ზომაა;
- T_{Pac} - პაკეტის ზომაა;
- $t_{n,k}$ - პაკეტის შემოსვლის დროა;
- j - პაკეტის რიგითი ნომერია კადრში;
- $t_{fr_start f} / t_{fr_end f}$ - კადრის დაწყების/ დასრულების დროა.



ნახ. 5.4. დაყოვნების დროის სივრცულ-დროითი დიაგრამა კადრის გადავსების გარეშე

2) მეორე შემთხვევა – კადრის გადავსებით (ნახ. 5.5), როდესაც ვიდებთ $N_{Pac} - s1_f < 0$. ამ შემთხვევაში მოთხოვნათა რიცხვი ჭარბობს სუპერკადრში არსებული ადგილების რაოდენობას. ამოცანა მდგომარეობს იმაში, რომ ზედმეტი მოთხოვნები გადატანილ იქნენ შემდგომ კადრში. გადაგვაქვს რა პაკეტები შემდგომ კადრში, იქმნება ალბათობა იმისა, რომ იქ შეგვხვდეს კიდევ ერთი პაკეტი იმავე სადგურისაგან. ეს იმას ნიშნავს, რომ საჭირო იქნება კვლავ განისაზღვროს ყველა ალბიანი მატრიცა და განმეორებით გავიაროთ მთელი ციკლი.

ამოცანის გადასაწყვეტად კადრისათვის გადავსებით იქმნება მასივი $Free(f)$, რომელიც გვიჩვენებს, თუ რამდენი ადგილი დარჩა ან არ დარჩა თითოეულ კადრში. თუ ამ მასივში მნიშვნელობა დადებითია - მისი შესაბამისი ადგილი დარჩა კადრში პაკეტების გადაცემის შემდეგ; თუ ნულია – გადაიცემა სრულად შევსებული კადრი; თუ მნიშვნელობა უარყოფითია – ამ კადრში ყველა პაკეტი ვერ ჩაეტი.



ნახ. 5.5. დაყოვნების დროის სივრცულ-დროითი დიაგრამა კადრის გადაცემით

$Free(f) = J - sI(f)$, სადაც J - ადგილების რიცხვია კადრში;

$sI(f)$ - განაცხადთა რიცხვია თითოეულ კადრში.

ყოველივე ზემოთ თქმულის გათვალისწინებით, ჩვენს მიერ შექმნილია ალგორითმი პაკეტების დაყოვნების დროის ანგარიშისთვის.

ამ ალგორითმმა იმ პაკეტების დაყოვნების ანგარიშისათვის, რომლებიც ვერ განთავსდნენ თავიანთ სუპერკადრში და საჭირო შეიქმნა მათი გადანაცვლება შემდგომ კადრში, შემდეგი სახე მიიღო:

for $n \in 0..N-1$

if $(s_f > J) \wedge (t_{დაყ n,0} = 0) \wedge (t_{fr_start f} \leq t_{n,0} < t_{fr_end f})$

```

FL ← 0
for fl ∈ f + 1..F - 1
  break if FL = 1
  for j ∈ 0..J - 1
    if mestofl,j = 0
       $t_{დაყ n,0} \leftarrow t_{fr\_end f} - t_{n,0} + D_{Frame} + N \cdot T_{Req} + T_{Pac} \cdot (j + 1) + (fl - f) \cdot D_{Frame}$ 
      mestofl,j ← 1
      FL ← 1 if j = J - 1
       $s_f \leftarrow s_f - 1$ 
      break
  continue if mestofl,j ≠ 0

```

წარმოდგენილი ალგორითმი საშუალებას გვაძლევს გაანგარიშებულ იქნეს პაკეტების დაყოვნება $T_{დაყ}$ როგორც

დაყოვნების დროის საშუალო მნიშვნელობა ყველა სადგურის ყველა პაკეტისათვის:

$$T_{\text{დავ}} \leftarrow \frac{1}{K \cdot N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{K-1} t_{\text{დავ } n,k}.$$

5.3. დაყოვნების დროის მახასიათებლები უგამტარო კავშირის ქსელებში დამუშავებული ალგორითმის მიხედვით

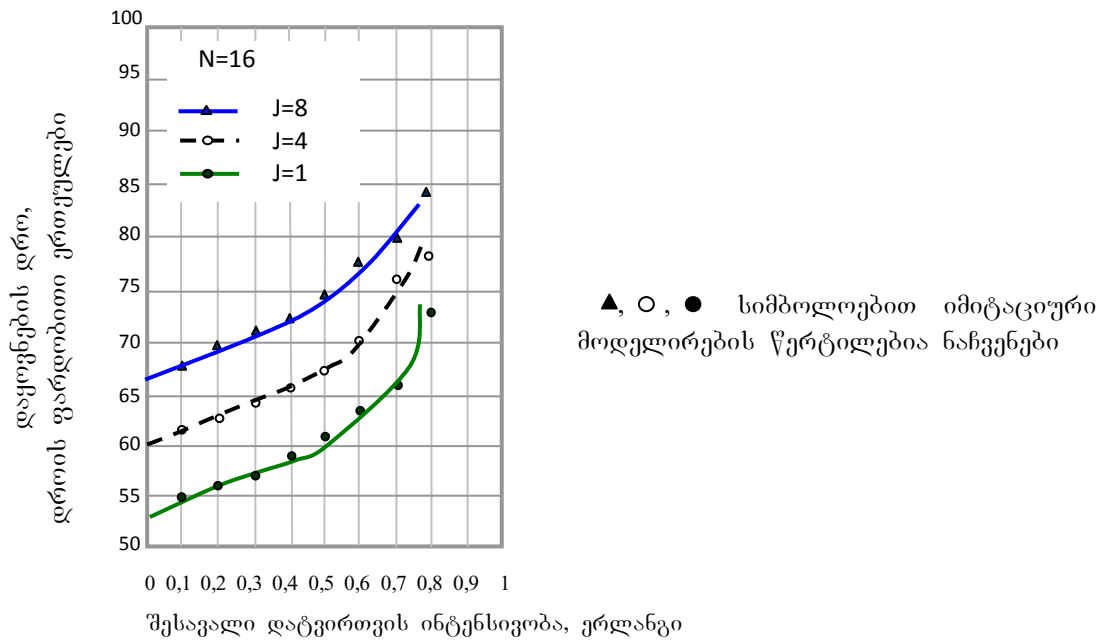
წარმოდგენილი ალგორითმის შესაბამისად რეალიზებულ იქნა იმიტაციური მოდელირება.

მოდელირების საწყისი მონაცემებია: აღმაგალი და დამაგალი არხების დუბლექსირების რეჟიმი; სააბონენტო სადგურების რიცხვი $N=16$; მართვაზე (ზოლის მოთხოვნა) ფარდობითი დანახარჯების სიდიდე – 0,02; სააბონენტო მონაცემების პაკეტების ხანგრძლივობა – დროის ერთი ფარდობითი ერთეული; გადაცემა – შეცდომების გარეშე; გაგრძელების დრო - უმცირესი (სუპერკადრის ხანგრძლივობაზე მნიშვნელოვნად ნაკლები).

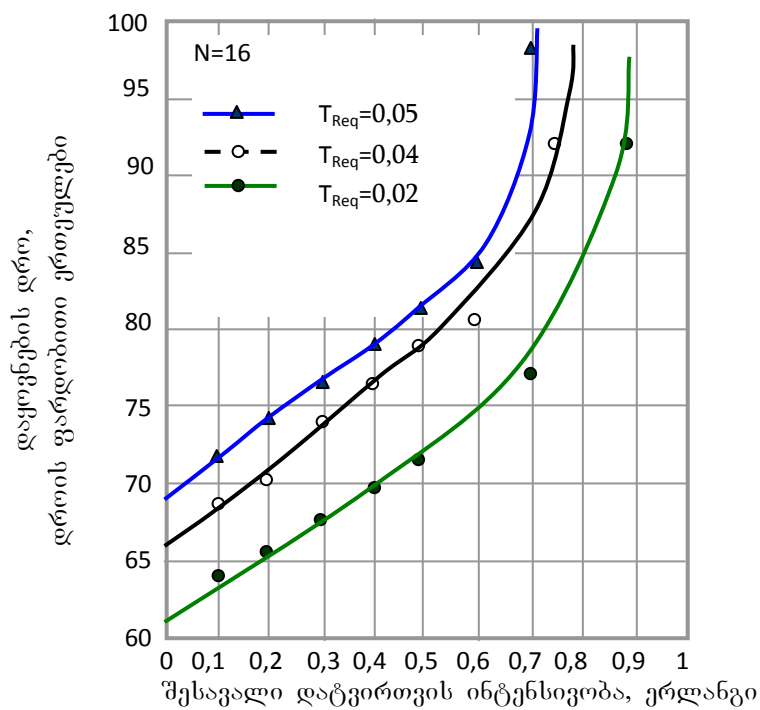
ნახ. 5.6-ზე წარმოდგენილია MAC WiMAX-პროტოკოლის კადრების დაყოვნების მიღებული მახასიათებლები ფუნქციაში შესავალი დატვირთვის ინტენსივობასთან სუპერკადრის სხვადასხვა ზომის დროს ($J=1; 4; 8$).

პაკეტების დაყოვნების დროების მიღებული მახასიათებლების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ სუპერკადრის ზომების გაზრდასთან ერთად (კადრში სააბონენტო პაკეტების გადასაცემად დანიშნული საინფორმაციო ფანჯრების რიცხვის გაზრდის ხარჯზე), დაყოვნებათა სიდიდეები მატულობენ.

მიღებული მახასიათებლების ფუნქციალური დამოკიდებულება შესავალი დატვირთვის ინტენსივობასთან მოთხოვნილი ზოლის სხვადასხვა ზომების შემთხვევაში ($T_{\text{Req}}=0.02; 0.04; 0.05$) ნაჩვენებია ნახ. 5.7-ზე



ნახ. 5.6. დაყოვნების დროის დამოკიდებულება შესავალი დატვირთვის ინტენსივობაზე საინფორმაციო ტაქტების რიცხვის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის (J=1, 4, 8)

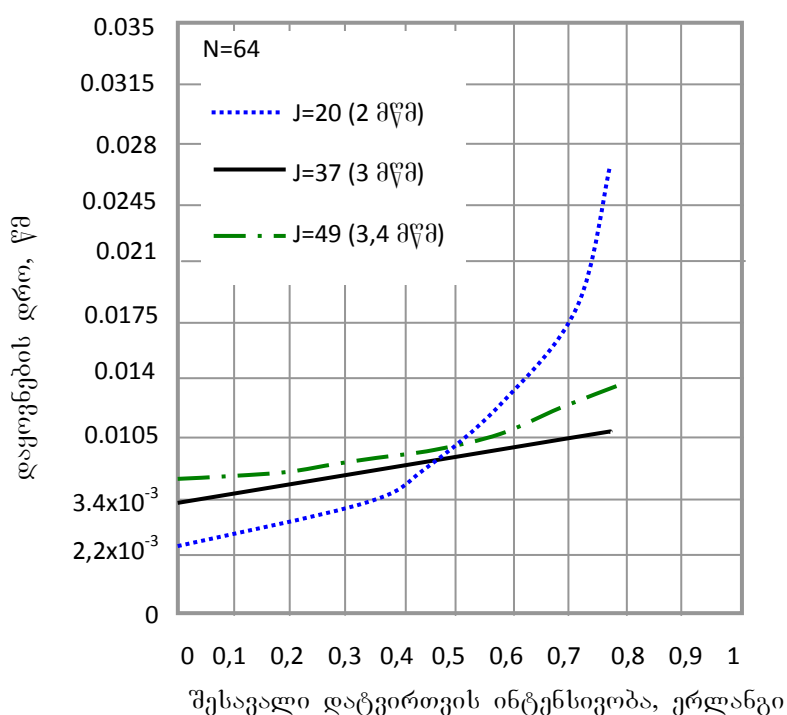


ნახ. 5.7. დაყოვნების დროის დამოკიდებულება შესავალი დატვირთვის ინტენსივობაზე ზოლის ზომების ცვლილებისას

$$(T_{Req}=0,02; 0,04; 0,05)$$

ნახ. 5.7 წარმოდგენილი პაკეტების დაყოვნების დროთა მახასიათებლების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ დაყოვნებათა უკეთესი მაჩვენებლები მიიღება მოთხოვნილი ზოლის ყველაზე მცირე ($T_{Req}=0.02$) მნიშვნელობის დროს.

ნახ. 5.8 წარმოდგენილია WiMAX-ის MAC-პროტოკოლის დაყოვნების დროის რეალური მახასიათებლების დამოკიდებულება შესავალ დატვირთვაზე საინფორმაციო ტაქტების რიცხვის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის ($J=20, 37, 49$).



ნახ. 5.8. დაყოვნების დროის დამოკიდებულება შესავალ დატვირთვის ინტენსიობაზე საინფორმაციო ტაქტების რიცხვის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის ($J=20, 37, 49$).

იმიტაციური მოდელირებით მიღებული შედეგების ანალიზი ამ შემთხვევაში გვიჩვენებს, რომ სამივე შემთხვევისათვის ($J=20, 37, 49$) მახასიათებლები საწყის ეტაპზე, დატვირთვის ნაკლები ინტენსიობისას, აკმაყოფილებენ დაყოვნებისადმი წაყენებულ მოთხოვნებს. ინტენსიობის ზრდასთან ერთად დაყოვნების მაჩვენებლები მნიშვნელოვნად იცვლება.

განსაკუთრებით მკვეთრად ეს შესამჩნევია შემთხვევისათვის $J=20$, როდესაც აღარ არის საქმარისი ფანჯარათა რიცხვი სააბონენტო

პაკეტებისათვის; ასევე ზრდაა შესამჩნევი შემთხვევისათვის J=49, რისი ახსნაც შესაძლებელია კადრის ფორმატის ზომების უკიდურესი გაზრდით.

WiMAX სისტემებში MAC-პროტოკოლის პაკეტების დაყოვნების პროცესების შესწავლისა და ანალიზის მიზნით ჩატარებული იმიტაციური მოდელირების შედეგების საფუძველზე ჩვენს მიერ შემუშავებულ იქნა შემდეგი რეკომენდაცია:

WiMAX სისტემებში, იმისთვის, რომ უზრუნველყოფილ იქნეს ზოლის რესურსების განაწილებისა და მომსახურების ხარისხის QoS დიფერენციალური მაჩვენებლების დინამიკური მართვა, მიზანშეწონილია კადრის ფორმატის ადაპტაცია შესავალი დატვირთვის ინტენსივობის ცვლილებასთან. კადრის ფორმატის ადაპტაცია კი გულისხმობს საინფორმაციო ტაქტების რიცხვის მდოვრედ როგორც გაზრდას, ასევე შემცირებას, ანუ ინფორმაციის გადაცემის სიჩქარის ადაპტაციას შემოსულ დატვირთვასთან.

5.4. დასკვნები მეხუთე თავთან დაკავშირებით

1. დამუშავებულია MAC-პაკეტების შემოსვლის დროის განსაზღვრის ალგორითმი WiMAX ქსელის თითოეული საბაზო სადგურისათვის.
2. ნაჩვენებია, რომ MAC-პროტოკოლების პაკეტების დაყოვნება დამოკიდებულია შესავალი დატვირთვის ინტენსივობაზე და MAC-პროტოკოლით გადაცემული კადრების რაოდენობაზე.
3. დამტკიცებულია, რომ WiMAX ქსელის სიხშირული ზოლის ეფექტური გამოყენება შესაძლებელია QoS-ის მიმართ დიფერენცირებული მიდგომით.

დასკვნა

მიღებული შედეგები საშუალებას გვაძლევს შევაფასოთ პაკეტების დაყოვნებები (და, შესაბამისად, მიღებული ლაპარაკის ხარისხი) WiMAX (Wi-Fi) ქსელებში დატვირთვის (ტრაფიკის) შესაბამისად, რაც შეიძლება გამოყენებულ იქნეს ქსელის რესურსების გადასაწყობად გადატვირთვების დროს. ნაშრომის მასალების მიხედვით შეიძლება ფორმულირებულ იქნეს კონკრეტული WiMAX ქსელებისათვის ტრაფიკის მართვის კონკრეტული რეკომენდაციები.

შედეგები, მიღებული ნაშრომში, ასევე შეიძლება გამოყენებულ იქნეს LTE ქსელების გაშლის დროს, ამ ქსელებში პაკეტების დასაშვები/არდასაშვები დაყოვნებების განსაზღვრის ნაწილში.

ძირითადი შედეგები, მიღებული ნაშრომში, შეიძლება შემდეგი სახით იქნეს ფორმულირებული.

1. სისტემატიზირებულია მიდგომები უგამტარო კავშირის ძირითად სტანდარტებთან. ჩატარებულია BWN-ის ორი მიმართულების - Wi-Fi/WiMAX და UMTS/LTE ანალიზი და ურთიერთშედარება. ნაჩვენებია, რომ WiMAX და LTE თანაარსებობას 2020 წლამდე გააგრძელებენ: თითოეულ მათგანს აქვს და შემდგომშიც ექნება თავისი ადგილი და როლი ტელეკომუნიკაციური ტექნოლოგიების საერთაშორისო ბაზარზე.
2. შემუშავებულია მისაღები მეტყველების პაკეტების დაკარგვის და დაყოვნების დროის ხარისხის სუბიექტური და ობიექტური შეფასების მეთოდოლოგია.
3. შემუშავებულია BWN-ის მახასიათებლების შეფასების მეთოდოლოგია პოლინგის სხვადასხვა მეთოდების გამოყენებისას.
4. შემუშავებულია MAC-პროტოკოლების ანალიზის მეთოდები BWN-ის WiMAX "მობილურ" ვერსიაზე გადასვლისას. განსაზღვრულია Handover-ის პროცედურათა განსხვავება "სტაციონალურ" და "მობილურ" WiMAX შორის.
5. შემუშავებულია პაკეტების დაყოვნების განსაზღვრის მეთოდოლოგია ქსელის დატვირთვიდან (ტრაფიკიდან) გამომდინარე და

შემოთავაზებულია ქსელის რესურსების დინამიკური გადანაწილების პროცედურა ამ დაყოვნებების მინიმიზაციისათვის.

6. შემუშავებულია MAC-პაკეტების მოსვლის დროის განსაზღვრის ალგორითმი WiMAX-ის თითოეული საბაზო სადგურისათვის.
7. დამტკიცებულია, რომ WiMAX ქსელის სისწორული ზოლის ეფექტური გამოყენება შესაძლებელია მომსახურების ხარისხისადმი QoS დიფერენცირებული მიდგომით.

გამოყენებული ლიტერატურის სია

1. Гепко И.А., Олейник В.Ф., Чайка Ю.Д., Бондаренко А.В. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития.- К.: "ЕКМО", 2009. - 672 с.
2. IEEE Std 802.11-2007, New York, USA, June, 2007.
3. IEEE Std 802.16e-2005, New York, USA, February 2006.
4. Ноздрин В.В. Состояние и прогноз развития широкополосных местных сетей связи. Мобильные системы, №7, 2004.
5. Ghosh A., Zhang J., Andrews J.G., Muhamed R. Fundamentals of LTE. Communications Engineering and Emerging Technologies Series, Prentice-Hall, June 2010.
6. Кучерявый Е.А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. СПб.: Наука и техника, 2004.
7. Мак-Квери С., Мак-Грю К, Фой С. Передача голосовых данных по сетям Cisco Frame Relay, АТМ и IP. М.: Издательский дом "Вильямс", 2002.
8. Bellamy J.C. Digital Telephony. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc, 2000.
9. Chen J.-C., Zhang T. IP-Based Next-Generation Wireless Networks: Systems, Architectures, and Protocols. New York: Wiley-Interscience, 2004.
10. Johnson C.R., Kogan Y., Levy Y., Saheban F., Tarapore P. VoIP Reliability: A Service Provider's Perspective. IEEE Communications Magazine, July 2004.
11. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб.: "Питер", 2000.
12. Кучерявый А.Е., Гшъченко Л.З., Иванов А.Ю. Пакетная сеть связи общего пользования. СПб.: Наука и техника, 2004.
13. Вишнеvский В.М., Портной С.А., Шахнович И.В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. – М.: Техносфера, 2009. - 472 с.
14. Walke B., Mangold S., Berlemann L. IEEE 802 Wireless Systems: Protocols, Multi-Hop Mesh/Relaying, Performance and Spectrum Coexistence / Wiley, Chichester, 2007. - 382 p.
15. Дeарш Ю.В., Бурцев КВ., Крутиков К.А., Цым А.Ю. Прогноз развития сотовой связи в России. Вестник связи, №4, 2005.
16. Beridze J., Burkadze T. Transition from MSN (Multi Service Network) Conception to NGN (Next Generation Networks) Networks Conception. // "Computing and Computational Intelligence: Proceedings of the 3rd International Conference on COMPUTATIONAL INTELLIGENCE (CI'09)", Tbilisi, Georgia, 2009.- P. 290-293.
17. Быховский М.А. Пионеры информационного века. История развития теории связи Вып. 4. –М.: Техносфера, 2006. - 376 с. Серия изданий "История электросвязи и радиотехники".
18. Farley T. Mobile Telephone History // Teletronika 3/4, 2005. – <http://www.privateline.com>.

19. Шиллер Й. Мобильные коммуникации : Пер. с англ. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2002. – 384 с.
20. Walke В.Н. Mobile Radio Networks: Networking and Protocols, John Wiley& Sons, Ltd., Chichester, 1999.
21. Кшиштоф В. Системы подвижной радиосвязи / Под ред. Ледовского А.И. (перевод с польск). –М.: "Горячая линия – Телеком", 2006. – 538 с.
22. CDMA: прошлое, настоящее и будущее / Под ред. Л. Е. Шинакова. – М.: МАС, 2003. – 604 с.
23. Берлин А.Н. Сотовые системы связи. - М.: Интернет-Университет информационных технологий БИНОМ; Лаборатория знаний, 2009.
24. Grag V.K. Wireless Network Evolution: 2G to 3G. Prentice Hall Communication Engineering and Emerging Technologies Series. Published by Prentice Hall, 2002.
25. Forouzan Behrouz A. TCP/IP protocol Suite –3 rd. McGraw Hill, 2006. – 861 p.
26. Вишнеvский В. М., Ляхов А. И., Портной С. Л., Шахнович И. В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
27. Holma Н., Toskala А. WCDMA for UMTS. Radio Access for Third Generation Mobile Communications. –2nd ed. – New York: John Wiley&Sons, 2002. – 384 p.
28. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б.. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура. — М.: Эко-Трендз, 2010. – 284 с.
29. Garcia Albert Leon. Communication network fundamental concepts and key architectures. Mc Graw Hill Higher Education, 2004. - 900 p.
30. Overview of 3GPP Release 99. Summary of all Release 99 Features, 2004.
31. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: Пер.с англ. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. – 1104 с.
32. Ghosh A., Zhang J., Andrews J.G., Muhamed R. Fundamentals of LTE. Communications Engineering and Emerging Technologies Series, Prentice-Hall, June 2010.
33. Overview of 3GPP Release 4. Summary of all Release 4 Features, 2004.
34. Kaaranen Н., Ahtiainen А., Laitinen L., Naghian S., Nienu V. UMTS Networks: Architecture, Mobility and Service (Second Edition), John Wiley&Sons, Ltd., 2005.
35. 3GPP TS 25.308 V.6.4.0. UTRA High Speed Downlink Packet Access (HSDPA): Overall Description; Stage 2. – 3G Partnership Project, April 2007.
36. 3GPP TS 23.234. Technical Specification Group Services and System Aspects; 3GPP system to Wireless Local Area Network (WLAN) interworking; System description (Release 6).

37. W-CDMA for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications. Edited by Harri Holma and Antti Toskala. (Third Edition), John Wiley&Sons, Ltd., 2005.
38. Тихвинский В.О., Терентьев С.В. Управление и качество услуг в сетях GPRS/UMTS. — М.: Эко-Трендз, 2007.
39. 3GPP TS 22.234. Technical Specification Group Services and System Aspects; Requirements on 3GPP system to Wireless Local Area Network (WLAN) interworking (Release 7).
40. Nakamura T., Abeta S. Super 3G Technology Trends. — June 2008. <http://www.nttdocomo.com>. — P. 52–56.
41. 3GPP TS 36.300 –v8.0.0, E-UTRA and E-UTRAN Overall Description.
42. 3GPP TS 36.211. Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (Release 8).
43. UMTS Evolution from 3GPP Release 7 to Release 8 HSPA and SAE/LTE. — <http://www.3gamericas.org>.
44. 3GPP TR 36.913 V8.0.0. Requirements for Further Advancements for E-UTRA (LTEAdvanced), Release 8.— 3GPP, 06.2008.
45. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Минаев И.В. Стандартизация, спецификации, эволюция технологии и архитектура базовой сети LTE// Сети и средства связи, №2(10). Специальный выпуск "Сети доступа". — 2009. №3. — С. 34-39.
46. Григорьев В. А., Лагутенко О. И., Распаев Ю. А. Сети и системы. — М.: Эко-Трендз, 2005. — 384 с.
47. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. СПб.: Питер, 2010 г.
48. Таненбаум Э. Компьютерные сети. Пер. с англ. СПб, 2005.
49. Галкин В.А., Григорьев Ю.А. Телекоммуникации и сети. — М.: Из-во МГТУ им. Баумана Н.Э., 2003.
50. Weber S., Andrews J., Yang X., Veciana G. Transmission capacity of wireless ad hoc networks with successive interference cancellation // IEEE Transactions on Information Theory.— 2007.— Vol. 53, № 8.— P. 2799-2814.
51. Рошан П., Лизри Д. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11: Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. — 304 с.
52. Шахнович И. Стандарт широкополосного доступа IEEE 802.16–2004. Режим OFDMA и адаптивные антенные системы. Электроника: Наука, Техника, Бизнес.2005. № 2.
53. *Berlemann L., Hoymann C, Hiertz G., Mangold S.* Coexistence and interworking of IEEE 802.16 and IEEE 802.11(e) // Proc. of the 63rd IEEE Vehicular Technology Conference. — Vol. 1. — 2006. — P. 27-31.
54. Гольдштейн Б. С. Сети связи: Учебник для ВУЗов. СПб.: БХВ-Петербург, 2010.

55. Буркадзе Т.О., Беридзе Дж.Л. Обзор беспроводных сетей стандартов IEEE 802.11 и IEEE 802.16 с целью внедрения их в Грузии.// Труды ГТУ, №1 (467), 2008. - С. 21-24.
56. IEEE утверждает стандарт IEEE 802.16m.
<http://news.ferra.ru/hard/2011/04/02/109821>
57. Andrews J.G., Ghosh A., Muhamed R. Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking. Prentice Hall PTR, 2007.
58. Годовой отчет Национальной регулирующей комиссии по коммуникациям Грузии (GNCC).
<http://bizzone.info/communications/2011/1311894248.php>.
59. Andreev S., Dubkov K., Turlikov A. IEEE 802.11 and 802.16 cooperation within multi-radio stations // Proc. of the 11th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications. — 2008. — P. 1-5.
60. Cho D., Song J., Kim M., Han K. Performance analysis of the IEEE 802.16 wireless metropolitan network // Proc. of the 1st International Conference on Distributed Frameworks for Multimedia Applications. — 2005. — P. 130-136.
61. Gyorfı L., Gyori S., Massey J. Multiple Access Channels: Theory and Practice / Ed. by E. Biglieri, L. Gyorfı.— IOS Press, Amsterdam, 2007.—Vol. 10. - P. 214-249.
62. ბურკაძე ტ., ბერიძე ჯ. ფართოზოლოვანი უგამტარო ტელეკომუნიკაციური ქსელების ანალიზისა და სინტეზის პოლინგის სისტემები//მოხსენებების კრებული. საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია, "ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები", ქუთაისი, საქართველო, 2010 - გვ. 249–253.
63. Bordenave G, McDonald D., Proutiere A. Random multi-access algorithms: a mean field analysis // Proc. of the 43rd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. — 2005. — P. 494-503.
64. Гольденберг Б.С., Соколов Н.А., Яновский Г.Г. Сети связи. СПб.: БХВ-Петербург, 2010.
65. Шмалько А.В. Цифровые сети связи. М.: Эко-трендз, 2001.
66. Листопад Н.И. Системы и сети цифровой радиосвязи. Минск: "Изд-во Гревцова", 2009.
67. Кох Р., Яновский Г.Г. Эволюция и конвергенция в электросвязи. –М.: Радио и связь, 2001.
68. Буркадзе Т, Беридзе Дж. Особенности расчета сетей передачи данных.//Тезисы докладов. Международная научная конференция "Информационные и компьютерные технологии, моделирование, управление", Тбилиси, Грузия, 2010. - С. 79-80.

69. Буркадзе Т, Беридзе Дж. Особенности расчета сетей передачи данных.//Труды.Международная научная конференция "Информационные и компьютерные технологии, моделирование, управление", Тбилиси, Грузия, 2010. – С. 44-45.
70. Гольдштейн Б.С. и др. IP-телефония. –М.: Радио и связь, 2006.
71. Соколов Н.А. Беседы о телекоммуникациях. Монография в четырех главах. – М.: Альварес Паблишинг, 2003 – 2004.
72. Беридзе Дж., Буркадзе Т. Технические аспекты доставки пакетов в мультисервисных IP-сетях.// Труды. "Автоматизированные системы управления", Тбилиси, Грузия, 2011. – С. 279-282.
73. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. -М.: Машиностроение, 1979.
74. Takagi H. Analysis of polling systems. MIT Press, 1986. 175 p.
75. Borst S.C. Polling systems. Amsterdam. Sticing Mathematisch Centrum. 1996.
76. Lin L., Jia W., Lu W. Performance analysis of IEEE 802.16 multicast and broadcast polling based bandwidth request // Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference. — 2007. — P. 1854-1859.
77. Вишне夫斯基 В.М., Семенова О.В. Математические методы исследования систем поллинга//Автоматика и телемеханика. 2006. №2. С. 3-56.
78. Browne S., Yechiali U. Dynamic routing in polling systems// Teletraffic Science (m. Bonatti, Ed.), Proceedings of ITC-12, 1988. - P.1455-1466.
79. Levy H., Sidi M., Voxma O.J. Dominance relations in polling systems// Queueing Systems. 1990. Vol. 6. P. 155-172.
80. Fricker C., Jaibi R. Monotonicity and stability of periodic polling models// Queueing Systems. 1994. Vol. 15. P. 211-238.
81. Stoyan D. Comparison methods for queues and other stochastic models. 1983. John Wiley& Sons.
82. Вишне夫斯基 В.М. Беспроводные сети широкополосного доступа к ресурсам Интернета// Электросвязь. 2000. №10. С. 9-13.
83. Вишне夫斯基 В.М., Лаконцев Д.В., Семенова О.В., Шпилев С.А. Модель системы поллинга для исследования широкополосных беспроводных сетей// Автоматика и телемеханика. 2006. №12. С. 123-135.
84. Moraes L., Maciel P. Analysis and evaluation of a new MAC protocol for broadband wireless access // Proc. of the International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing. — Vol. 1. — 2005. — P. 107-112.
85. Гармонов А.В., Савинков А.Ю., Филин С.А., Моисеев С.Н., Кондаков М.С. Технический обзор стандарта IEEE 802.16// Мобильные системы. – М., 2005. -№11. - С. 16-24.

86. IEEE Standard 802.16-2004: IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Network. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems.– IEEE, 2004. - 895 p.
87. Сюваткин В.С., Есипенко В.И., Ковалев И.П., Сухоробров В.Г. WiMAX - технология беспроводной связи: теоретические основы, стандарты, применение. СПб.: БХВ-Петербург, 2—5. - 368 с.
88. Walke B., Mangold S., Berlemann L. IEEE 802 Wireless Systems: Protocols, Multi-Hop Mesh/Relaying, Performance and Spectrum Coexistence / Wiley, Chichester, 2007. - 382 p.
89. Шахнович И.В. Широкополосная мобильность: IEEE 802.16e. Часть 1: MAC-уровень// Электроника.-НТБ, 2007.-№2. - С.18-27.
90. Берлин С.Н. Системы сотовой цифровой связи. М.: Эко-трендз, 2007.
91. Вишневецкий В.М., Семёнова О.В. Системы поллинга: теория и применение в широкополосных беспроводных сетях. – М.: Техносфера, 2007. - 309 с.
92. Кирьянов Д. Mathcad 13. БХВ-Петербург, 2006. - 598 с.
93. Буркадзе Т., Беридзе Дж. Характеристики времени задержки пакетов MAC-протоколов в системах WiMAX. // Тбилиси, "INTELLECTUAL", №19, 2012. - С. 246-254.