

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ბურკაძე ტატიანა

ფართოზოლოგანი უკაბელო ტელეკომუნიკაციური ქსელების
გამტარუნარიანობის კვლევა პოლინგის მეთოდით

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად
წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეფერატი

თბილისი

2013 წელი

ნაშრომის ზოგადი დახასიათება

პრობლემის აქტუალობა. ფართოზოლოვანი უგამტარო ქსელები (Broadband Wireless Network - BWN) წარმოადგენენ რადიოკავშირის ქსელების ერთ-ერთ ნაირსახეობას, რომლებიც უზრუნველყოფენ ინფორმაციის გაცვლას დამაბოლოებელ მომხმარებლებს (აბონენტებს) შორის მგბიტ/წმ რიგისა და მეტი სიჩქარით.

თაობათა ევოლუციურმა ცვლამ და ტრაფიკის მკვეთრმა ძვრამ მონაცემებისა და ვიდეოს მიმართულებით მიგვიყვანეს BWN-ში ინფორმაციის გადაცემის ახალი კონცეფციის დამუშავების აუცილებლობამდე. ასეთ კონცეფციად შეიქმნა ნებისმიერი საწყისი ინფორმაციის (ლაპარაკი, მონაცემები, ვიდეო) გადაცემა პაკეტების სახით (ინტერნეტ პროტოკოლის - IP ტექნოლოგია). შესაბამისად, ნებისმიერი თეორიული და პრაქტიკული გამოკვლევა ინფორმაციის გაცვლისა უგამტარო ქსელებში წარმართულია აუცილებელი სიჩქარეების გადაცემის მიღწევისაკენ სათანადო ხარისხით უგამტარო კავშირით დაფარულ მთელ ტერიტორიაზე.

სამუშაოს მიზანი. ფართოზოლოვან უგამტარო ქსელებში გავლისას პაკეტების დაყოვნების შეფასების მეთოდების დამუშავება, პაკეტების დაყოვნებასთან დაკავშირებული მიღებული სიგნალების ხარისხის რაოდენობრივი შეფასების მეთოდის დამუშავება და BWN-ში პაკეტების დაყოვნების მინიმიზაციის გზების მოძიება. პოლინგის მეთოდების მახასიათებლების შეფასების კრიტერიუმების შერჩევა, პოლინგის მეთოდების შეფასება "ბოლო მილის" ან "მონაცემთა შეგროვების" რეჟიმში ყოფნისას, BWN-ის გამტარუნარიანობის შერჩეულ მეთოდზე და ქსელის დატვირთვაზე დამოკიდებულების განსაზღვრა.

კვლევის ობიექტი. კვლევის ობიექტს წარმოადგენს პოლინგის მეთოდების მახასიათებლები; მიღებული სიგნალების ხარისხის რაოდენობრივი შეფასება პაკეტების დაყოვნებასთან დამოკიდებულებაში.

ძირითადი ამოცანები. დასახელებული მიზნების მისაღწევად ჩამოყალიბებულია ძირითადი ამოცანები:

1. BWN-ში IP ტექნოლოგიით ზგერის 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 მეთოდიკა; მიღებულია შემოსული სიგნალების ხარისხის გაუარესების რაოდენობრივი შეფასებები პაკეტების დაყოვნებისა და დაკარგვისას.
3. დამუშავებულია BWN მახასიათებლების შეფასების მეთოდიკა 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 მეთოდიკა 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 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).

ნაშრომის სტრუქტურა. სადისერტაციო ნაშრომი შედგება შესავლის, ხუთი თავისა და დასკვნისაგან; ის შეიცავს 153 გვერდ ნაბეჭდ ტექსტს, 35 ნახაზს და 12 ცხრილს. აგრეთვე მოცემულია გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხა და შემოკლებათა სია.

კუბლიკაციები. დისერტაციის შედეგები ასახულია რეცენზირებად ჟურნალებში გამოქვეყნებულ 7 ნაშრომში (მათი ჩამონათვალი მოცემულია ავტორეფერატის ბოლოს).

ნაშრომის შინაარსი

შესავალში დასაბუთებულია თემის აქტუალობა, მოყვანილია გამოსაკვლევი საკითხების მოკლე მიმოხილვა, ჩამოყალიბებულია სადისერტაციო ნაშრომის მიზნები და ამოცანები, აგრეთვე - დასაცავად გამოტანილი ძირითადი დებულებები.

უკანასკნელ წლებში საქსელო ინდუსტრიის განვითარების ერთ-ერთ ძირითად მიმართულებად წარმოჩნდება ინფორმაციის გადაცემის უგამტარო ქსელები. ქვეყნებისათვის, რომელთა დიდი ტერიტორია ერწყმის

მოსახლეობის მცირე სიმკვრივეს, ფართოზოლოვანი უგამტარო გადაწყვეტილებები განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენენ, ვინაიდან საშუალებას იძლევიან ეკონომიურად და ოპერატიულად შეიქმნას ტელეკომუნიკაციური ინფრასტრუქტურა დიდ ტერიტორიებზე. ეს განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია საქართველოს შორეული და სასოფლო რეგიონებისათვის.

უგამტარო ქსელების მახასიათებლების შეფასებისათვის ფართოდ გამოიყენება პოლინგის სტოქასტიკური მოდელები, რომელთა კვლევაც მიმდინარეობს გასული საუკუნის 50-იანი წლების ბოლოდან. მიუხედავად იმისა, რომ ლიტერატურულ წყაროებში მოცემულია პუბლიკაციები, სადაც მოყვანილია მოცემულ სფეროში თეორიული რეზულტატების სისტემატიზაცია და განზოგადოებები, ფართოზოლოვანი უგამტარო ქსელების მძაფრმა განვითარებამ მოითხოვა პოლინგის სისტემის ანალიზისა და სინთეზის ახალი მეთოდების დამუშავება.

უგამტარო ქსელებში ინფორმაციის გადაცემის ახალი კონცეფციის საფუძველი გახდა ნებისმიერი საწყისი ინფორმაციის (ლაპარაკი, მონაცემები, ვიდეო) გადაცემა პაკეტების სახით (IP ტექნოლოგიით). ამ კონცეფციასთან დაკავშირებით, მნიშვნელოვანი გახდნენ საკითხები დაკავშირებულნი ფართოზოლოვანი უგამტარო ქსელების (BWN) გამტარუნარიანობის გამოკვლევებთან პოლინგის მეთოდით, რადგან იგი წარმართულია უგამტარო კავშირით დაფარვის მთელ ტერიტორიაზე საჭირო ხარისხის გადაცემათა მოთხოვნილი სიჩქარეების უზრუნველყოფისკენ. შესაბამისად ამ საკითხების გამოკვლევა წარმოადგენს მნიშვნელოვან სამეცნიერო-ტექნიკურ ამოცანას.

პირველი 0.530 ეძღვნება უგამტარო კავშირების ძირითადი სტანდარტებისა და სისტემების გამოკვლევას. გაანალიზებულია BWN-ის განვითარების გზები 2000 წლიდან ორი მიმართულებით - უგამტარო LAN და MAN ქსელები და UMTS/LTE ქსელების შექმნა. მოცემულია მახასიათებლები ორივე მიმართულებისათვის და განსაზღვრულია მათი თანაარსებობის პრინციპები მობილური კავშირების ფარგლებში.

BWN-ბი უზრუნველყოფენ სადღესასწაულოდ გამოყენებული ყველა სახის შეტყობინების გადაცემას: ხმოვანი და ვიდეოშეტყობინებების (მოძრავისა და უძრავის), მონაცემების, ტექსტის, ფაქსიმილური შეტყობინებების და სხვა.

ქსელის კვანძების ტერიტორიული განთავსებისა და მათი დაფარვის ზონების ზომების მიხედვით BWN-ბი იყოფიან ოთხ ძირითად სახედ: პერსონალური უგამტარო ქსელები (Wireless Personal Area Network – WPAN), ლოკალური უგამტარო ქსელები (Wireless Local Area Network – WLAN), მუნიციპალური/საქალაქო უგამტარო ქსელები (Wireless Metropolitan Area Network – WMAN) და ფიჭური კავშირის მობილური ქსელები (Networks of cellular mobile communication).

მომსახურების ზონის ფარგლებში კვანძებს შორის შეტყობინებათა გაცვლისათვის სიხშირულ-ტერიტორიალურ გარემოში მრავლობითი შეღწევის უზრუნველყოფა დამახასიათებელია შეღწევის ქსელების (BWA - Broadband Wireless Access) ისეთი ნაირსახეობებისათვის, როგორებიცაა PAN, LAN, MAN.

ფიჭური კავშირისა და BWA ქსელებისათვის დამახასიათებელია გარკვეული ტერიტორიული არის (ფიჭის) ფარგლებში საბაზო სადგურების (Base Station – BS), და მათთან რადიონტერფეისით დაკავშირებული, სააბონენტო სადგურების (Mobile Station – MS) ერთობლივი არსებობა.

რადიონტერფეისის (რომლის საშუალებითაც საბაზო სადგურები კოორდინირებას უწევენ სააბონენტო სადგურების რადიოარხში შეღწევას) თავისებურებები, საქსელო რესურსების გამოყენებისა და საბაზო და სააბონენტო სადგურებს შორის შეტყობინებათა გაცვლის წესები განსაზღვრავენ შეღწევის მრავალსადგურიან ტექნოლოგიებს.

ფიჭური კავშირის ძირითადი მიზნობრივი ფუნქცია: ”კავშირი ნებისმიერ ადგილზე და ნებისმიერ დროს” განსაზღვრავს მრავლობითი შეღწევის ისეთი მეთოდების გამოყენებას, როგორებიცაა FDMA (Frequency Division Multiple Access - მრავლობითი შეღწევა სიხშირული დაყოფით), TDMA (Time Division Multiple Access - მრავლობითი შეღწევა დროთი დაყოფით) და CDMA (Code

Division Multiple Access - მრავლობითი შეღწევა კოდური დაყოფით). ეს მეთოდები დამახასიათებელია ქსელებისათვის კონტროლირებადი შეღწევით.

BWA-ქსელებში მრავალი სადგურის მიერ რესურსების ერთობლივი გამოყენება ხორციელდება სხვა მიზნობრივი ფუნქციით: "ქსელის კვანძების კავშირში შესვლის უზრუნველმყოფა ნებისმიერ დროს, წარმოშობილი მოთხოვნის შესაბამისად", რაც ვარაუდობს სააბონენტო მოწყობილობების მუდმივი კონტროლის არ არსებობას ქსელის მხრიდან და ქსელთან აბონენტების მიერთებას აუცილებლობის შემთხვევაში.

ფიჭური კავშირის ტექნოლოგიების განვითარება, ჩვეულებრივად, დაკავშირებულია სისტემის ყველა მდგენელის ცვლილებასთან: მიწოდებული მომსახურების, ქსელის შესაძლო სტრუქტურული კომპონენტებისა და მათ შორის კავშირების, საქსელო არქიტექტურის. ამ განვითარების პროცესში განასხვავებენ 4 თაობას (ეტაპს): 1G, 2G, 3G და 4G.

ცხრ. 1-ში მოყვანილია ახალი 3G და 4G ტექნოლოგიების მახასიათებლები.

ცხრილი 1

3G და 4G ტექნოლოგიების მახასიათებლების შეჯერებითი მონაცემები

ტექნოლოგია	ბაზარზე გამოჩენის წელი	მონაცემების გადაცემის სიჩქარე ხაზით "ქვემოთ" (DL)	მონაცემების გადაცემის სიჩქარე ხაზით "ზემოთ" (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 წ.	1 გგბიტ/წმ	500 მგბიტ/წმ

თუ 1G თაობა მიეკუთვნება XX საუკუნის 80-იან წლებს, მაშინ 3G და 4G უკვე XXI საუკუნეს განეკუთვნებიან. გადაცემის სიჩქარეების გაზრდისათვის ბრძოლა ძირითადად მიმდინარეობს იმისათვის, რომ მობილური კავშირის აბონენტებს მიეცეთ ქსელ ინტერნეტში მაღალსიჩქარიანი შეღწევისა და მათი ფართო მულტიმედიური მომსახურებით უზრუნველყოფის საშუალება.

სადღესოდ ყველაზე პერსპექტიული BWA ქსელებს, ინტერნეტში შეღწევისა და მულტიმედიური მომსახურების მიწოდების თვალსაზრისით, წარმოადგენენ Wi-Fi (**Wireless Fidelity**) და WiMAX (**Worldwide Interoperability for Microwave Access**).

ცხრ. 2-ში მოყვანილია Wi-Fi და WiMAX სტანდარტების მახასიათებლები.

ცხრილი 2

Wi-Fi და WiMAX სტანდარტების მახასიათებლები

ტექნოლოგია	სტანდარტი	გამოყენება	გამტარუნარიანობა	მოქმედების რადიუსი	სიხშირეები
1	2	3	4	5	6
Wi-Fi	802.11a	WLAN	54 მგბიტ/წმ-მდე	300 მ-დე	5,0 გგჰც
Wi-Fi	802.11b	WLAN	11 მგბიტ/წმ-მდე	300 მ-დე	2,4 გგჰც
Wi-Fi	802.11g	WLAN	54 მგბიტ/წმ-მდე	300 მ-დე	2,4 გგჰც
Wi-Fi	802.11n	WLAN	450 გგჰც (პერსპექტივაში 600 მგბიტ/წმ-მდე)	300 მ-დე	2,4 — 2,5 ან 5,0 გგჰც
WiMAX	802.16d	WMAN	75 მგბიტ/წმ-მდე	25-80 კმ	1,5-11 გგჰც
WiMAX	802.16e	Mobile WMAN	40 მგბიტ/წმ-მდე	1-5 კმ	2.3-13.6 გგჰც
WiMAX	802.16m	WMAN, Mobile WMAN	1 გგბიტ/წმ-მდე (WMAN), 100 მგბიტ/წმ-მდე (Mobile WMAN)	-	-

ელექტრონიკისა და ელექტროტექნიკის ინჟინერთა ინსტიტუტმა (IEEE) 2011 წლის აპრილში დაამტკიცა სტანდარტი IEEE 802.16m, ცნობილი როგორც WirelessMAN-Advanced და WiMAX-2. ეს სტანდარტი აკმაყოფილებს მეოთხე თაობის სტანდარტის მოთხოვნებს.

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 კპც-დან გაიზარდა 20 მგპც-მდე, შესაბამისად მონაცემების გადაცემის სიჩქარე გაიზარდა 1 გგბიტ/წმ-მდე. ამ ევოლუციის შედეგად, უგამტარო კავშირის 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 კომპანიის 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.

მეორე თავში ეძღვნება BWN IP-ქსელებით ბგერითი ინფორმაციის გადაცემის ხარისხის შეფასების მეთოდიკას. ძირითადი ყურადღება დათმობილი აქვს მიღებული სიგნალის ხარისხის დამოკიდებულებას ქსელში პაკეტების გავლის დაყოვნებაზე. შემოთავაზებულია პაკეტების დაყოვნების

(დაკარგვის) პირობებში მიღებული სიგნალების ხარისხის შეფასების სუბიექტური და ობიექტური მეთოდები.

გამტარუნარიანობა ასახავს მონაცემების მაქსიმალურ შესაძლო მოცულობას, ქსელის ან მისი ნაწილის მიერ გადაცემულს დროის ერთეულში. გამტარუნარიანობა მიუთითებს ქსელის შიდა ოპერაციების შესრულების სიჩქარეზე - მონაცემების პაკეტების გადაცემაზე ქსელის კვანძებს შორის, სხვადასხვა საკომუტაციო მოწყობილობის გავლით. იგი უშუალოდ ახასიათებს ქსელის მიერ ძირითადი ფუნქციის შესრულებას - შეტყობინების ტრანსპორტირებას. ქსელის გამტარუნარიანობის საკითხები ფართოდაა დაკავშირებული ცნებასთან "მომსახურების ხარისხი" (Quality of Service, QoS).

QoS-ს უზრუნველყოფის მექანიზმების რეალიზება შედარებით ახალ ტენდენციას წარმოადგენს. კომპიუტერული ქსელები დიდხანს ასეთი მექანიზმების გარეშე არსებობდნენ, და ეს აიხსნება ძირითადად ორი მიზეზით. 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 დაკარგვას. მეორეც, თვით გამტარუნარიანობა ბევრ შემთხვევაში არ იყო დეფიციტური.

BWN-ში მომსახურების ხარისხის შეფასებისას აუცილებელია გათვალისწინებულ იქნეს, რომ მათი გამოყენების სხვადასხვა შემთხვევისათვის საქსელო მახასიათებლების მიმართ წაყენებული მოთხოვნები, მნიშვნელოვნად განსხვავდებიან იმის და მიხედვით, გამოყენება ეხება მონაცემების გადაცემას, თუ ბგერის გადაცემას. 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 ბგერი 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 გადაიცემიან;
- 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 რამდენიმე მლწმ-მა დაყოვნებებმაც კი შეიძლება წარმოშვან ბგერითი სიგნალების მნიშვნელოვანი დამახინჯებები, VoIP ტექნოლოგიის გამოყენების შემთხვევაში.

მომსახურების ხარისხის განსაზღვრა შეიძლება დაფუძნებულ იყოს როგორც სუბიექტურ, ასევე ობიექტურ შეფასებებზე. ყველაზე ფართოდ გამოყენებადი ხარისხის სუბიექტური შეფასების მეთოდიკა აღწერილია რეკომენდაციაში P.800 და ცნობილია, როგორც MOS (Mean Opinion Score) მეთოდიკა. MOS მეთოდიკის შესაბამისად ბგერის ხარისხი, მიღებული სიგნალის გავლისას ინფორმაციის წყაროდან ინფორმაციის მიმღებამდე კავშირის სისტემის გავლით, შეფასდება როგორც საშუალო არითმეტიკული ყველა შეფასებებისა, რომლებიც წარმოდგენილი იქნება ექსპერტების მიერ ტესტირებადი გადაცემის ტრაქტის მოსმენის შემდეგ. MOS მოდელში არ არის შესაძლებლობა რაოდენობრივად გათვალისწინებულ იქნეს ბგერის ხარისხზე მოქმედი ფაქტორები. კერძოდ, არ მიიღება მხედველობაში:

- გამჭოლი (end-to-end) დაყოვნება ტელეფონით მოლაპარაკებებს შორის;
- დაყოვნების ვარიაციების, ჯიტერის, გავლენა;

- პაკეტების დანაკარგების გავლენა.

G.107 რეკომენდაციაში ჩადებულია ე.წ. E-მოდელი, რომელმაც გახსნა ახალი მიმართულება მომსახურების ხარისხის შეფასებაში, დაკავშირებულია ტერმინალებისა და ქსელების მახასიათებლების გაზომვასთან. E-მოდელის შექმნის შემდეგ ჩატარებულ იქნა გამოცდების დიდი რიცხვი, რომლებშიც იცვლებოდა საქსელო ფაქტორების დამახინჯების დონეები. გამოთვლების შედეგს, E-მოდელის შესაბამისად, წარმოადგენს რიცხვი, რომელსაც R-ფაქტორი ეწოდება (ე.წ. რეიტინგის კოეფიციენტი).

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:

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

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 მნიშვნელობა;

I_s - კოდეკებისა 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.

R-ფაქტორის ანგარიშის დროს ერთ-ერთი მდგენელი I_s , შემამცირებელი R-ფაქტორის მნიშვნელობის, განისაზღვრება დამახინჯებებით, წარმოშობილით კოდეკში ბგერითი სიგნალის პაკეტიზაციის დროს. პაკეტური კომუტაციის ქსელებში გადაცემული ბგერის ხარისხი უკანასკნელი წლების განმავლობაში მნიშვნელოვნად გაუმჯობესდა ეფექტური კოდეკების შექმნის გზით, რომლებიც უზრუნველყოფენ ბგერითი სიგნალების კარგ გარკვეულობას მიმღებ მხარეს.

საპაკეტო ქსელებში ბგერის ხარისხზე ასევე გავლენას ახდენს პაკეტების მიწოდების დაყოვნება. პაკეტების მიწოდების დაყოვნება განისაზღვრება წყაროდან მიმღებამდე პაკეტის გადატანის დროთ. დაყოვნების დრო იცვლება ქსელში ტრაფიკზე და საქსელო რესურსების მისაწვდომობაზე დამოკიდებულებით, კერძოდ, ქსელის მიწოდების მომენტში გამტარუნარიანობაზე. ლაპარაკი წარმოადგენს ტრაფიკს, მგრძნობიარეს დაყოვნებაზე, მაშინ როდესაც მონაცემების გადაცემის უმეტესი გამოყენებები შედარებით მდგრადნი არიან დაყოვნების მიმართ. თუ პაკეტის მიწოდების დაყოვნება აჭარბებს გარკვეულ მნიშვნელობას, პაკეტი უგულვებულყოფილი იქნება. შედეგად, დიდი რაოდენობის პაკეტების დაკარგვის შემთხვევაში ბგერის ხარისხი უარესდება, რაც აისახება კიდეც ზემოთ მოყვანილ R-ფაქტორის ფორმულაში, სადაც დაყოვნება გათვალისწინებულია I_d მდგენელით.

ერთ-ერთი ბუნებრივი კითხვაა, როგორი დაყოვნებაა დასაშვები ბგერის პაკეტური გადაცემის დროს. ბგერითი სიგნალის ხარისხის შესწავლის შედეგად დადგენილ იქნა, რომ ადამიანი იწყებს ბგერითი სიგნალის ხარისხის გაუარესების შეგრძნობას, თუ დაყოვნება აღემატება 150 მლწმ, და გრძნობს შესამჩნევ დისკომფორტს, თუ დაყოვნება აღემატება 250 მლწმ. 300 მლწმ დაყოვნების დროს ლაპარაკი უკვე იყოფა ფრაგმენტებად, რომელთა შეკავშირებაც შერწყმულ ლაპარაკად შეუძლებელია.

ჩვენს მიერ კი დადგენილ იქნა, რომ საერთო დანიშნულების ინტერნეტ ქსელში ბგერითი სიგნალის დაყოვნების დრომ ადვილად შეიძლება გადააჭარბოს 150 მლწმ, რაც უკვე დაუშვებელია ხარისხიანი კავშირისათვის.

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 დაბალსიხიაროანი კოდეკები მოითხოვენ გამტარუნარიანობის გაცილებით ნაკლებ მნიშვნელობებს, მაგრამ გაცილებით მეტ გავლენას ახდენენ ბგერითი სიგნალის ხარისხზე მაღალსიხიაროანი კოდეკებთან 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.

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

აქვე მოყვანილია BWN IP-ქსელებში პაკეტების დაყოვნების ანალიზი ცენტრალიზებული გამოკითხვის მექანიზმის (პოლინგის) მეთოდით. მოცემული მეთოდი, რომელიც კარგად გამოიყენება IP მონაცემთა გადაცემის ქსელებში, არასაკმარისად არის შესწავლილი ბგერითი ინფორმაციის (VoIP) გადაცემის ქსელებისათვის. შემოთავაზებულია ადაპტური დინამიკური პოლინგი BWN-ში, რაც ქსელის მუშაობის ეფექტურობის მნიშვნელოვანი ამაღლების საშუალებას იძლევა, რიგების ჩვეულებრივ ციკლურ გამოკითხვასთან შედარებით.

პოლინგის სისტემები წარმოადგენენ რამდენიმე რიგის და საერთო მომსახურების მოწყობილობის 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. პოლინგის სისტემებში სერვერი პრიორიტეტებს აკუთვნებს რიგებს განსაზღვრული წესის მიხედვით.

BWN-ში მთელი რადიოფიჭის მართვის ფუნქცია ეკისრება საბაზო სადგურს. მოწყობილობა, რომელიც უზრუნველმყოფს ცენტრალიზებული მართვის ორგანიზებას, ეფექტურად იყენებს BWN-ის ორ ყველაზე ღირებულ რესურსს: სიხშირულ და გამტარუნარიანობის რესურსებს. ცენტრალიზებული მართვა რეგიონალურ ქსელებში საშუალებას გვაძლევს განთავისუფლდეთ ე.წ. "დაფარული სადგურების" პრობლემისაგან, ასევე საშუალებას იძლევა მკაფიოდ დაიგეგმოს სადგურების მონაცემთა გადაცემის გარემოსთან შედწმენის თანმიმდევრობა, რადიოფიჭის მუშაობის მოქნილად მართვის და მისი პარამეტრების ცვლილების საშუალებას კონკრეტული მდგომარეობიდან გამომდინარე, მხოლოდ საბაზო სადგურის გაწყობით დამაბოლოებელი სადგურების შეუხებლად.

ცენტრალიზებული მართვის საფუძველში დევს ცენტრალიზებული გამოკითხვის (პოლინგის) მექანიზმი; ზუსტად პოლინგის კონკრეტულ მექანიზმზე, და ასევე მის პარამეტრებზეა დამოკიდებული ცენტრალიზებული მართვის მქონე ფართოზოლოვანი რეგიონალური უგამტარო ქსელის მუშაობის ეფექტურობა.

ციკლური გამოკითხვის და რიგებთან მუშაობის დისციპლინის მეთოდების შერჩევა დამოკიდებულია რეგიონალური BWN-ის კონკრეტული გამოყენების წესზე.

შემდგომში ჩავთვალთ, რომ რადიოფიჭა მუშაობს რეჟიმში "ბოლო მილი", თუ განიხილება სიტუაცია მეტწილად ტრაფიკით "ზევიდან-ქვევით"

და - რეჟიმში "მონაცემთა შეგროვება", თუ განიხილება სიტუაცია, სადაც ტრაფიკში ჭარბობს გადაცემა "ქვევიდან-ზევით".

როდესაც რადიოფიჭა მუშაობს "ბოლო მილის" რეჟიმში, შეიძლება უგულვებელყოფილ იქნეს მონაცემთა ნაკადი დამაბოლოებელი სადგურიდან საბაზო სადგურისკენ და განხილულ იქნეს მხოლოდ დამავალი ნაკადი საბაზო სადგურიდან დამაბოლოებლისკენ. შემოთავაზებულია რიგის მომსახურება მხოლოდ იმ შემთხვევაში მოხდეს, თუ მისი სიგრძე აღემატება გარკვეულ მოცემულ სიდიდეს - ზღურბლს. სისტემის გამტარუნარიანობის მაქსიმუმიზაციისთვის დამაბოლოებელი სადგურების რიგები მომსახურებული უნდა იქნეს მათ სრულ ამოწურვამდე, თუმცადა თუკი ერთი ან რამდენიმე რიგი იქნება ძალიან გრძელი, კადრის რიგში ყოფნის საშუალო დრო იქნება ძალიან დიდი, რაც დაუშვებელია ზოგიერთი ქსელური გამოყენებისათვის. აქედან გამომდინარე, სისტემის მეტად მნიშვნელოვან პარამეტრებს წარმოადგენენ რიგის საშუალო სიგრძე და კადრების საშუალო დაყოვნება რიგში. სწორედ ამ პარამეტრების შეფასება ხორციელდება მოცემულ ნაშრომში ანალიზური და იმიტაციური მოდელების დახმარებით სისტემებისათვის, ზღვრული ამომწურავი მომსახურების დისციპლინით.

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

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

მოთხოვნათა მომსახურებების დრო i -ურ რიგში ექსპონენციალურად განაწილებულია პარამეტრით μ_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 ნაკლები i -ური რიგისთვის), სერვერი ჩერდება მანამ, სანამ მოთხოვნათა რიცხვი ერთ-ერთ რიგში არ მიაღწევს საჭირო ზღვარს. 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)

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

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

$$S_i^j = \sum_{r \in \chi_i} r_j p_i(r), \quad i, j = \overline{1, N}; \quad (2)$$

3. j -ური რიგის საშუალო სიგრძე სერვერის უქმადყოფნის მომენტში

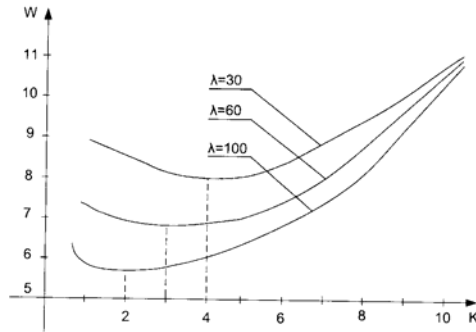
$$U^j = \sum_{r \in \Lambda} r_j a(r), \quad j = \overline{1, N}; \quad (3)$$

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

j -ურ რიგში ლოდინის საშუალო დრო ასე განისაზღვრება:

$$M[W_i] = \frac{[1 + h_i \rho_i^{h_i+1} + (h_i + 1) \rho_i^{h_i}] \rho_i}{(1 - \rho_i^{h_i+1})(1 - \rho_i) \lambda_i} - \frac{1}{\mu_i} + \frac{1}{\mu_i \rho_i T_i} \cdot \left(\sum_{r \in \Lambda} r_i a(r) + \sum_{m=1}^N \sum_{r \in \chi_m} r_i \rho_m(r) + \sum_{m=1}^N \sum_{\substack{r \in \Pi_m \\ m \neq 1}} r_i q_m(r) \right), \quad i = \overline{1, N}. \quad (4)$$

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



ნახ. 1. ლოდინის საშუალო დროის დამოკიდებულება ზღურბლის სიდიდეზე

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.

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

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.

ზემოთ აღწერილი BWN-ის, რომელიც ფუნქციონირებს ”მონაცემთა შეგროვების” რეჟიმში, მახასიათებლების კვლევისთვის ადეკვატურ მოდელს

წარმოადგენს პოლინგის სისტემა რიგების ადაპტური გამოკითხვით და მომსახურების რაბული სახის დისციპლინით.

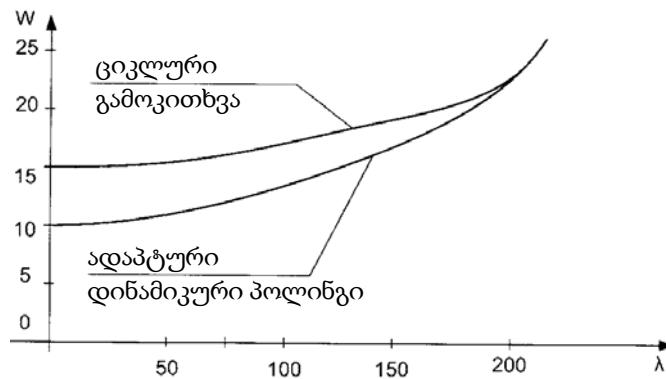
რიგის გამოკითხვათა მომენტებს შორის საშუალო დრო წარმოადგენს ციკლის საშუალო დროს და განხილული სისტემისათვის განისაზღვრება ტოლობით:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N q_i u_i + \tau \prod_{i=1}^N (1 - u_i)}{1 - \rho} \quad (5)$$

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).

მოდელირების შედეგები მოყვანილია ნახ. 2-ში.



ნახ. 2. ლოდინის საშუალო დროის დამოკიდებულება λ -ზე ციკლური გამოკითხვისას ადაპტური მექანიზმით

ნახ. 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.

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.

მეოთხე თავი ეძღვნება გადაცემის გარემოში შეღწევის მართვის (Medium Access Control - MAC) დონის პროტოკოლებს WiMAX ქსელის სისტემებისათვის. განსაზღვრულია MAC-დონის ფუნქციები როგორც "ზევით" (uplink), ასევე "ქვემოთ" (downlink) გადაცემისას. ასევე განსაზღვრულია MAC-ის ქვედონეების მუშაობის ფუნქციები და მექანიზმები. გაანალიზებულია MAC-დონის ფუნქციების თავისებურებები WiMAX ქსელის "სტაციონალური" რეჟიმიდან "მობილურ" რეჟიმში გადასვლისას.

MAC-დონე ახორციელებს ფიზიკურ არხებთან შეღწევის მართვას, უზრუნველყოფს რა ზედა დონის სხვადასხვაგვარი სერვისების მხარდაჭერის მექანიზმებს. ასე მაგალითად, MAC-დონის პროტოკოლები პასუხს აგებენ გადაცემის პარამეტრების მართვაზე, განსაზღვრავენ კვანძების ურთიერთქმედების თანმიმდევრობას, შეღწევის რიგითობას, აკონტროლებენ შეერთების მდგომარეობას და სხვა. IEEE 802.16 ქსელში ელემენტების მართვა ცენტრალიზებულია: საბაზო სადგური აკონტროლებს გადაცემას, როგორც პირდაპირი, ასევე უკუ მიმართულების არხში.

ფიზიკური დონის სპეციფიკაციის გამოყენებისგან დამოუკიდებლად, IEEE 802.16-x სტანდარტის ერთობლიობას აქვს ერთიანი MAC- პროტოკოლი, რომელიც აღწერს ქვედონეების ურთიერთქმედების რიგს, მონაცემთა ბლოკების ფორმატს, პოლინგის მექანიზმებს და სხვ.

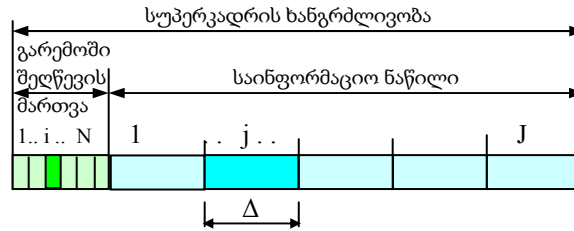
დასკვნები მეოთხე თავთან დაკავშირებით

1. ნაჩვენებია MAC-დონის საკვანძო როლი IEEE 802.16 სტანდარტის ფართოზოლოვან უგამტარო ქსელებში.
2. გააანალიზებულია MAC-დონის ფუნქციები, მისი არქიტექტურა, მომხმარებლის სადგურის ინსტალაცია ქსელში, IEEE 802.16-x MAC-დონის მართვის სპეციფიკაციები, მართვის თავისებურებები და შეერთებების ორგანიზება, MAC-დონის მონაცემთა ბლოკები, ასევე MAC-დონის ფუნქციების რეალიზების თავისებურებები WiMAX-ის "მობილურ" ვერსიაში. ყველა ზემოთ მოცემული მონაცემები აუცილებელია WiMAX 802.16 და Wi-Fi 802.11 სტანდარტის მრავლობითი შეღწევის პროტოკოლის იმიტაციური მოდელის შემუშავებისთვის.

მეოთხე თავში მიძღვნილია WiMAX 802.16 სტანდარტის მრავლობითი შეღწევის პროტოკოლის იმიტაციური მოდელის დამუშავებისადმი. შემოთავაზებული მოდელი საშუალებას იძლევა გამოთვლილ იქნეს პაკეტების დაყოვნებები ქსელის დატვირთვის (ტრაფიკის) სხვადასხვა მნიშვნელობების დროს. ნაშრომში მოყვანილია დაყოვნების დროის რეალური მახასიათებლები ფუნქციალურ დამოკიდებულებაში შესავალი დატვირთვის ინტენსივობასთან და პაკეტების სუპერკადრების ზომებთან.

პაკეტების დაყოვნების გაანგარიშების ალგორითმის დამუშავებისათვის ვთვლით, რომ WiMAX სისტემაში საბაზო სადგური "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. 3.). აქ Δ (დროის ფარდობითი ერთეული) - ერთი საინფორმაციო პაკეტის

ხანგრძლივობაა, რომელიც მოდელის უმცირეს დროით ერთეულს წარმოადგენს.



ნახ. 3. სუპერკადრის ხანგრძლივობა

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

საბაზო სადგურის მიერ არხის ეფექტური გამოყენებისათვის მოითხოვება არხის რესურსების უფრო დინამიკური მართვა. ამოცანა მდგომარეობს იმაში, რომ იმიტაციური მოდელირებით მიღებულ იქნეს ისეთი სისტემის ალბათურ-დროითი მახასიათებლები, რომლებიც უზრუნველყოფენ არხის რესურსების უფრო ეფექტურ მართვას.

იმიტაციური მოდელირების განხორციელებისათვის საჭიროა სისტემის შესავალი პარამეტრების წარმოდგენა, ასეთებია:

- G** - შესავალი დატვირთვის ჯამური ინტენსივობა (0-დან 1 ერლანგამდე);
- N** - სააბონენტო სადგურების რიცხვი (პროგრამაში წარმოვადგენთ კონსტანტად, რომელიც პრინციპში ვარიირებადი პარამეტრია);
- K** - პაკეტების რიცხვი თითოეულ სადგურში (წარმოდგენილი კონსტანტად, შემდგომში მონაცემთა მასივებთან მუშაობის მოხერხებულობისათვის);
- T_{sys}** - სასისტემო დრო - მოდელირების დრო (დაყენდება საკმაოდ დიდი სიდიდე - ინტერვალი, რომელშიც მოდელირება მიმდინარეობს);
- T_{Pac}** - პაკეტის მოცულობა დროის სისტემურ ტაქტებში;
- T_{Req}** - მოთხოვნის მოცულობა სისტემურ ტაქტებში (დაახლოებითსაინფორმაციო პაკეტის ხანგრძლივობის 2%);
- N_{Pac}** - აბონენტების საინფორმაციო პაკეტებში ფანჯრების რიცხვი სუპერკადრში;

λ - შემომავალი დატვირთვის ინტენსივობა თითოეული სადგურისაგან
(მას ვიღებთ თანაბარს ყველა სადგურისათვის, ამიტომ $\lambda = \frac{G}{N \cdot T_{Pac}}$).

პირობის თანახმად, სადგურში შეიძლება შემოვიდეს K რაოდენობის პაკეტი, ხოლო ყოველი შემდგომი პაკეტის მომსახურება კი შესაძლებელია წინამდებარე პაკეტების მომსახურების შემდეგ. ამ მიზეზით ნებისმიერ სადგურს უნდა გააჩნდეს პაკეტების დამახსოვრების საშუალება, ე.წ. ბუფერული მახსოვრობა, სადაც პაკეტები დაელოდებიან საბაზო სადგურის მხრიდან მათ მომსახურებას. ბუფერული მახსოვრობის $N \times K$ მოცულობას 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,
$$\begin{aligned} & \text{for } n=0, N-1 \\ & \text{for } k=0, K-1 \\ & \text{buf}(n, k) := 1 \end{aligned}$$

ნახ. 4,ა-ზე, როგორც მაგალითი, ნაჩვენებია სადგურებში (მათი რიცხვი ექვსია) პაკეტების არსებობის (ნიშანი "1") და არ არსებობის (ნიშანი "0") კადრის განმავლობაში (წარმოდგენილია სულ 15 კადრი). პაკეტების შემოსვლის დრო ნაჩვენებია ნახ. 4,ბ-ზე.

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:

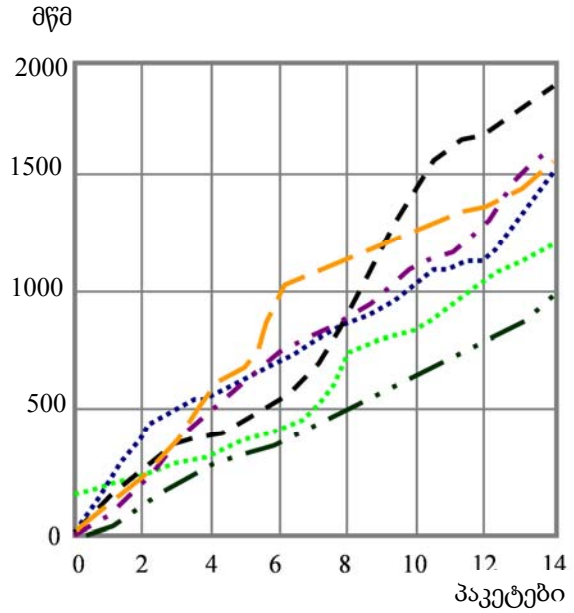
$$N_{Frame} = \text{floor}(T_{sys} / D_{Frame}).$$

განვათავსეთ რა პაკეტების შემოსვლის მომენტები (ნახ.4,ა) კადრებს შორის, გადავდივართ მათ დამუშავებაზე. აქ ფაქტიურად გვაქვს ორი შემთხვევა - ელემენტარული და კადრის გადავსებით.

სადგურები

	0	1	2	3	4	5
0	1	1	0	1	1	1
1	1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	0
3	0	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1
6	0	0	1	0	0	0
7	0	0	1	0	1	0
8	1	1	0	0	0	0
9	0	0	1	1	0	0
10	1	0	1	0	0	1
11	0	0	0	0	0	0
12	1	0	1	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0
14	1	0	0	1	1	1

სადგურში პაკეტის არსებობა
ყოველ კადრის განმავლობაში



ნახ. 4. ა) სადგურში პაკეტების არსებობა; **ბ)** სადგურებიდან პაკეტების შემოსვლის დრო

- 1) ელემენტარული შემთხვევაა, როდესაც სუპერკადრში სააბონენტო პაკეტებისათვის გამოყოფილ ფანჯარათა რიცხვი საკმარისია სუპერკადრის ინტერვალზე შემოსულ მოთხოვანთა დასაკმაყოფილებლად;
- 2) ეს შემთხვევაა კადრის გადავსებით, როდესაც ვიღებთ $N_{pac} - s_{1f} < 0$ (სუპერკადრში ადგილების რაოდენობისა და მოთხოვნათა რიცხვის შორის არსებობს სხვაობა - მოთხოვნა ჭარბობს ფანჯარათა რიცხვს). აქ ამოცანა მდგომარეობს იმაში, რომ ზედმეტი მოთხოვნები გადატანილ იქნეს შემდგომ კადრში.

პაკეტების დაყოვნება $T_{დაყ}$ გაიანგარიშება, როგორც დაყოვნების დროის საშუალო მნიშვნელობა ყველა სადგურის ყველა პაკეტისათვის:

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

პაკეტების დაყოვნების დროის გაანგარიშებისათვის შედგენილ იქნა ალგორითმი.

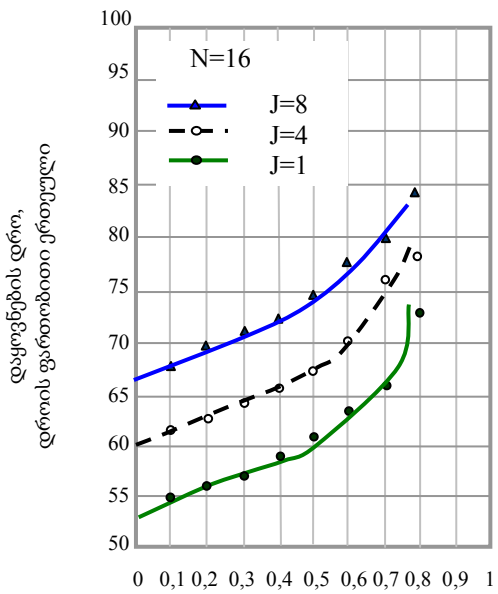
ქვემოთ წარმოდგენილია იმ პაკეტების დაყოვნების ანგარიშის ალგორითმი, რომლებიც ვერ განთავსდნენ თავის სუპერკადრში და საჭირო შეიქნა მათი გადანაცვლება შემდგომ კადრში:

```

for n ∈ 0..N-1
if (sf > J) ∧ (tდამn,0 = 0) ∧ (tfr_startf ≤ tn,0 < tfr_endf)
| FL ← 0
| for fl ∈ f + 1..F - 1
| | break if FL = 1
| | for j ∈ 0..J - 1
| | | if mestofl,j = 0
| | | | tდამn,0 ← tfr_endf - tn,0 + DFrame + N · TReq + TPac · (j + 1) + (fl - f) · DFrame
| | | | mestofl,j ← 1
| | | | FL ← 1 if j = J - 1
| | | | sf ← sf - 1
| | | | break
| | continue if mestofl,j ≠ 0

```

ნახ. 5-ზე წარმოდგენილია MAC WiMAX-პროტოკოლის კადრების დაყოვნების მახასიათებლები ფუნქციაში შესავალი დატვირთვის ინტენსივობასთან სუპერკადრის სხვადასხვა ზომის დროს (J=1; 4; 8).



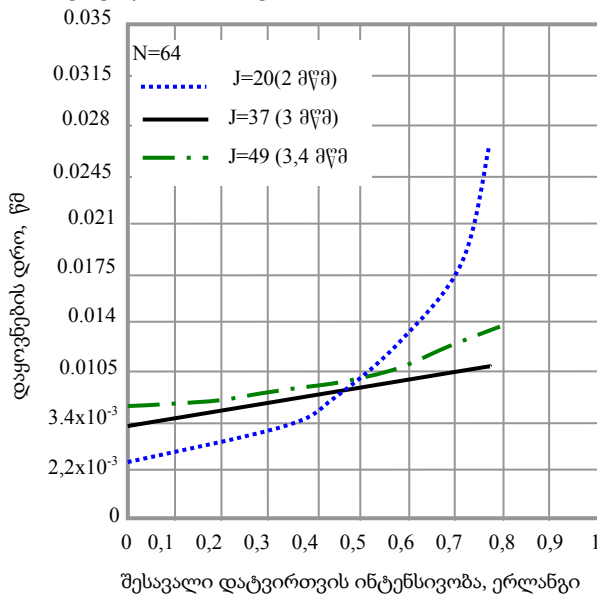
▲, ○, ● - სიმბოლოებით იმიტაციური მოდელირების წერტილებია აღნიშნული

ნახ. 5. დაყოვნების დროის დამოკიდებულება შესავალი დატვირთვის ინტენსივობაზე საინფორმაციო ტაქტების რიცხვის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის (J=1, 4, 8)

წარმოდგენილი შედეგები მიღებულია იმიტაციური მოდელით. მოდელირების საწყისი მონაცემებია: აღმავალი და დამავალი არხების რეჟიმი; სააბონენტო სადგურების რიცხვი $N=16$; მართვაზე (ზოლის მოთხოვნა) ფარდობითი დანახარჯების სიდიდე - 0,02; სააბონენტო მონაცემების პაკეტების ხანგრძლივობა - დროის ფარდობითი ერთეული; გადაცემა - შეცდომების გარეშე; გავრცელების დრო - უმცირესი (სუპერკადრის ხანგრძლივობაზე მნიშვნელოვნად ნაკლები).

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.

ნახ. 6-ზე ასევე წარმოდგენილია WiMAX-ის MAC-პროტოკოლის დაყოვნების დროის რეალური მახასიათებლების დამოკიდებულება შესავალი დატვირთვაზე საინფორმაციო ტაქტების რიცხვის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის ($J=20, 37, 49$).



ნახ. 6. დაყოვნების დროის დამოკიდებულება შესავალი დატვირთვის ინტენსივობაზე საინფორმაციო ტაქტების რიცხვის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის ($J=20, 37, 49$)

ამ შემთხვევაში იმიტაციური მოდელირებით მიღებული შედეგები გვიჩვენებენ, რომ სამივე შემთხვევისათვის ($J=20, 37, 49$) მახასიათებლები საწყის ეტაპზე, დატვირთვის ნაკლები ინტენსივობისას, აკმაყოფილებენ დაყოვნებისადმი წაყენებულ მოთხოვნებს. ინტენსივობის ზრდასთან ერთად

დაყოვნების მაჩვენებლები მნიშვნელოვნად იცვლება. განსაკუთრებით მკვეთრად ეს შესამჩნევია, შემთხვევისათვის $J=20$, როდესაც აღარ არის საკმარისი ფანჯარათა რიცხვი სააბონენტო პაკეტებისათვის; ასევე ზრდაა შესამჩნევი შემთხვევისათვის $J=49$, რისი ახსნაც შესაძლებელია კადრის ფორმატის ზომების უკიდურესი გაზრდით.

ჩატარებული იმიტაციური მოდელირების შედეგების ანალიზის საფუძველზე ჩვენს მიერ შემუშავებულ იქნა შემდეგი რეკომენდაცია:

WiMAX ქსელებში, იმისთვის, რომ უზრუნველყოფელ 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.

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.

სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი დასკვნები

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 ზგერების პაკეტების დაკარგვის და დაყოვნებების დროის ხარისხის სუბიექტური და ობიექტური შეფასების მეთოდისა.
3. შემუშავებულია BWN-ის მახასიათებლების შეფასების მეთოდისა 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 მეთოდისა 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 სიხშირული ზოლის ეფექტური გამოყენება შესაძლებელია მომსახურების ხარისხისადმი QoS დიფერენცირებული მიდგომით.

პუბლიკაციები დისერტაციის თემაზე

1. Т. О. Буркадзе, Д. Л. Беридзе. 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.
2. Jemal Beridze, Tatiana Burkadze. 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.
3. 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.
4. Буркадзе Татьяна, Беридзе Джемал. Особенности расчета сетей передачи данных.// Тезисы докладов. Международная научная конференция "Информационные и компьютерные технологии, моделирование, управление", Тбилиси, Грузия, 2010. - С. 79-80.

5. Буркадзе Татьяна, Беридзе Джемал. Особенности расчета сетей передачи данных.// Труды. Международная научная конференция "Информационные и компьютерные технологии, моделирование, управление", Тбилиси, Грузия, 2010. – С. 44-45.
6. Беридзе Джемал, Буркадзе Татьяна. Технические аспекты доставки пакетов в мультисервисных IP-сетях.// Труды. "Автоматизированные системы управления", Тбилиси, Грузия, 2011. – С. 279-282.
7. Татьяна Буркадзе, Джемал Беридзе. Характеристики времени задержки пакетов MAC-протоколов в системах WiMAX. // Тбилиси, "INTELLECTUAL", №19, 2012. - С. 246-254.

ავტორის პირადი ვვლილი. ყველა შედეგი, რომელიც წარმოადგენს სადისერტაციო ნაშრომის ძირითად შინაარსს, მიღებულია უშუალოდ ავტორის მიერ სამეცნიერო ხელმძღვანელთან ერთად.

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 for defend 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.