

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი  
ხელნაწერის უფლებით

ხელნაწერის უფლებით

ბაკურ წიკლაური

ინფოსატელეკომუნიკაციო ქსელებით სიგნალების გადაცემის  
ხარისხობრივი მაჩვენებლების ამაღლების მექანიზმის  
დამუშავება და გამოკვლევა კოდირების ადაპტური მეთოდების  
გამოყენებით

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად  
წარდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი  
2013 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის  
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის ტელეკომუნიკაციის  
დეპარტამენტის ტელეკომუნიკაციის თეორიისა და სისტემების  
მიმართულებაზე

სამეცნიერო ხელმძღვანელი: სრული პროფესორი - ჯანიკო ხუნწარია  
რეცენზენტები: 1. სრული პროფესორი – ჯემალ ბერიძე  
2. აკადემიური დოქტორი – მერაბ კოტია

დაცვა შედგება 2014 წლის "05" თებერვალს, 15:00 საათზე  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და  
ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის  
სხდომაზე, კორპუსი VIII, აუდიტორია 504  
მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ს ბიბლიოთეკაში,  
ხოლო ავტორეფერატისა – სტუ-ს ვებგვერდზე

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი,  
ტ.მ.დ., სრული პროფესორი

გ. ხელიძე

## სამუშაოს ზოგადი დახასიათება

**თემის აქტუალობა:** ისტორიულად ყოველთვის სირთულეს წარმოადგენდა ინფორმაციის სწრაფად და რეალურ დროში გადაცემა, რასაც ხშირად წარუმატებელი შედეგები მოჰქონდა და რადიკალურად ცვლიდა მიმდინარე პროცესებს. ტელეკომუნიკაციის განვითარებამ დანიშნულების ადგილამდე ინფორმაციის უსწრაფესი და ზუსტი გადაცემა გამოიწვია. პრიორიტეტი მიენიჭა მიმართულებებს, რომლებიც გაცილებით ნაკლებ დანახარჯებს მოითხოვდნენ და მომხმარებლის ირგვლივ საკმარის ინფორმაციულ სივრცეს წარმოშობდნენ, რამაც მომხმარებლებს ფეხის აწყობის საშუალება მისცა მსოფლიოში მიმდინარე პროცესებზე. ზემოთქმულმა განაპირობა ტელეკომუნიკაციის საერთაშორისო ინსტიტუტების შექმნა, რომლებიც სთავაზობენ და ქმნიან ახალ-ახალ სტანდარტებს ტელეკომუნიკაციის სხვადასხვა მიმართულებებში.

წარმოდგენილ ნაშრომში განხილულია სიგნალების დამუშავებისა და გადაცემისას არხების კოდირების საკითხები. განხილულია მიდგომა სხვადასხვა ტექნიკურ-პრობლემურ საკითხთან მიმართებაში. ასევე ასახულია ის ეტაპები და სირთულეები, რომლებიც დღესაც აქტუალურად დგას ტელეკომუნიკაციის სფეროს წინაშე, და განხილულია სამომავლო პერსპექტივები, რომლებზეც ამჟამადაც ინტენსიური მუშაობა მიმდინარეობს სიგნალების დამუშავებისა და გადაცემის მეთოდების დახვეწისა და სრულყოფის მიზნით.

სიგნალების ციფრული დამუშავების სპეციალური მეთოდების გამოყენება, რომლებიც ამცირებენ ინფორმაციის სიჭარბეს, იძლევა არსებული სატელეკომუნიკაციო არხების გამტარუნარიანობის გამოყენების ეფექტურობის გაზრდის საშუალებას. მაუწყებლობის მორალურად და ფიზიკურად მოძველებული ტექნიკური საშუალებების შეცვლა დაკავშირებულია ახალი კომპლექსებისა და სისტემების დამუშავებისა და დანერგვის აუცილებლობასთან. ასეთ პირობებში უფრო მიზანშეწონილი და ეკონომიურია ვიზუალური და სხვა სახის ინფორმაციის დამუშავებისა

და გადაცემის ციფრულ მეთოდებზე გადასვლა. ასეთი ტიპის სამუშაოების ეფექტურობაზე მეტყველებს თუნდაც ის ფაქტი, რომ აშშ-ის კონგრესის გადაწყვეტილების თანახმად, უკვე დაიწყო გადასვლა ციფრულ მაუწყებლობაზე, რაც მომავალში გამოათავისუფლებს მრავალ სისწორულ არხს (ციფრული დივიდენდი) და სახელმწიფო ხაზინას შემატებს მილიონობით დოლარს.

ცნობილია, რომ თანამედროვე საზოგადოების პოლიტიკური, კულტურული და ეკონომიკური აქტივობა მნიშვნელოვნადაა დამოკიდებული საიმედო სატელეკომუნიკაციო და გამოთვლითი ტექნიკის საშუალებებზე, რომლებიც უზრუნველყოფენ ბგერითი და გამოსახულებათა სიგნალების დამუშავებასა და გადაცემას. მსოფლიოში ინფორმაციის სულ უფრო მზარდი ნაკადის გადაცემისა და მისი შენახვის (დამახსოვრების) აუცილებლობასთან დაკავშირებული ტელეკომუნიკაციის ციფრული არხების გამტარუნარიანობისა და ციფრული სიგნალების მახსოვრობის მოწყობილობების ტევადობის ეკონომიურად გამოყენების პრობლემა მოითხოვს ციფრული სიგნალების ეკონომიურად წარმოდგენის მაქსიმალურად სრულყოფილი მეთოდების დამუშავებასა და გამოკვლევას, რის გამოც აღნიშნული პრობლემის გადაწყვეტა ტელეკომუნიკაციის სფეროს ერთ-ერთ აქტუალურ ამოცანას წარმოადგენს.

### **სადისერტაციო ნაშრომის ძირითად მიზანს წარმოადგენს**

ფართოდ გავრცელებული OFDM მოდულაციის ღრმა ანალიზი და პროგრამული მოდელირების საშუალებით მისი უპირატესობის ნათლად წარმოჩენა და, აგრეთვე, იმ შედეგების ანალიზი, რომლებიც მიიღწევა LDPC-კოდების გამოყენებისას.

**კვლევის მეთოდები:** ნაშრომში დასმული ამოცანების გადასაწყვეტად გამოყენებულია: ფურიეს სწრაფი გარდაქმნა; ალბათობის თეორიის მეთოდები; კვადრატურული მულტიპლექსური ორზოლიანი ამპლიტუდური მოდულაცია; ტანერის გრაფი.

**ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სიახლე.** ნაშრომში მიღებული ძირითადი შედეგები და მათი სამეცნიერო სიახლე შემდეგია:

1. ნაჩვენებია UMTS ქსელის აგების პრინციპები, მასში გამოყენებული არხების კოდური დაყოფის მეთოდი – CDMA, მონაცემთა გადაცემისა და მომსახურებათა მიწოდების მოდელი 3G ქსელებში და წარმოდგენილია მათი ხარისხის სობრივი შეფასება.
2. აღწერილია ევროპული DVB-T სტანდარტის ციფრული ტელემაუწყებლობის გადამცემში და მიმღებში სიგნალის ფორმირების პროცესი კომპიუტერული პროგრამის გამოყენებით.
3. განხილულია UMTS-ის ვიდეოსერვისებში გამოყენებული კოდირების სხვადასხვა სტანდარტები და მათი მოქმედების პრინციპები. ჩატარებულია კოდირების სიჩქარეების ანალიზი. გაანალიზებულია სტანდარტების სრულყოფის სამომავლო ტენდენციები.
4. დადგენილია დაბალი სიმკვრივის მქონე კოდების უპირატესობა. ჩატარებული კვლევის შედეგად ნაჩვენებია, რომ არა მარტო შესაძლებელია, არამედ ძალზედ ხელსაყრელიცაა LDPC კოდების ოპტიმიზირება დიფერენციალურ დეკოდერთან შესაბამისობაში მოსაყვანად.

**კვლევის შედეგების გამოყენება.** სადისერტაციო ნაშრომში აღწერილი მოდულაციის მოდელირების ალგორითმი შეიძლება გამოყენებულ იქნეს სასწავლო პროცესში მეტი თვალსაჩინოებისთვის.

ნაშრომში მიღებული LDPC-კოდებთან დაკავშირებული შედეგები შეიძლება გამოყენებული იქნეს LTE ქსელების დაგეგმარებისა და აგებისას, უფრო მაღალი სიჩქარეების მიღწევის მიზნით.

**პუბლიკაციები და ნაშრომის აპრობაცია.** ნაშრომის ძირითადი შედეგები წარდგენილი და განხილულია სხვადასხვა დროს გამართულ კოლოქვიუმებსა და კონფერენციებზე:

1. პირველ და მეორე კოლოქვიუმზე (თბილისი, სტუ, 2011-2012);
2. Winrock International Georgia-სა და აშშ-ს საერთაშორისო განვითარების სააგენტოს (USAID) მხარდაჭერით ორგანიზებულ მე-2 საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე: “ენერგეტიკა:

რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები”, ქუთაისი, 2013 წ.

მოხენება თემაზე: მესამე თაობის მობილური კავშირის სისტემა UMTS და მისი ფუნქციები.

3. Winrock International Georgia-სა და აშშ-ს საერთაშორისო განვითარების სააგენტოს (USAID) მხარდაჭერით ორგანიზებულ მე-2 საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენციაზე: “ენერგეტიკა: რეგიონული პრობლემები და განვითარების პერსპექტივები”, ქუთაისი, 2013 წ. მოხენება თემაზე: LTE ტექნოლოგია.

**პუბლიკაციები.** დისერტაციის შედეგები ასახულია საერთაშორისო სამეცნიერო ჟურნალებში გამოქვეყნებულ 3 ნაშრომში.

**ნაშრომის სტრუქტურა.** სადისერტაციო ნაშრომი მოიცავს 110 გვერდს და შედგება შესავლის, ექვსი თავის, დასკვნის, გამოყენებული ლიტერატურის სიისა და დანართისგან.

### **ნაშრომის შინაარსი**

შესავალში დასაბუთებულია თემის აქტუალობა, მოყვანილია გამოსაკვლევი საკითხების მოკლე მიმოხილვა, ჩამოყალიბებულია სადისერტაციო ნაშრომის მიზნები და ამოცანები. ჩამოთვლილია შედეგები, რომლებიც მიღებული იყო დისერტაციის დამუშავების დროს. განსაზღვრულია სადისერტაციო ნაშრომის პრაქტიკული ფასეულობა და გამოყენების სფეროს ძირითადი ასპექტები, რომლებიც გამოტანილია დაცვაზე.

სადისერტაციო ნაშრომის პირველ თავში მოცემულია UMTS ქსელის აგების ძირითადი პრინციპები, ქსელის არქიტექტურა და ამ სისტემაში გამოყენებული არხების კოდური დაყოფის მეთოდი CDMA (Code Division Multiple Access). უკანასკნელ პერიოდამდე საუბრის გადაცემა მიწისზედა მობილური რადიოკავშირის სისტემებში წარმოადგენდა მომსახურების ძირითად სახეობას და შეადგენდა სისტემური დატვირთვის ძირითად ნაწილს.

ვინაიდან დღეისათვის დაჩქარებული ტექნოლოგიური პროგრესი იძლევა ტელეკომუნიკაციის დამატებითი სახეობების რეალიზაციის საშუალებას სტაციონალური ქსელში, ლოგიკურია ის ფაქტიც, რომ იზრდება აბონენტთა მოთხოვნები ანალოგიური მომსახურებების სახეობებზე მობილური ტელეკომუნიკაციის ქსელებშიც. როგორც ცნობილია, მე-3 თაობის მობილური ტელეკომუნიკაციის ქსელებში უზრუნველყოფილი უნდა იქნეს:

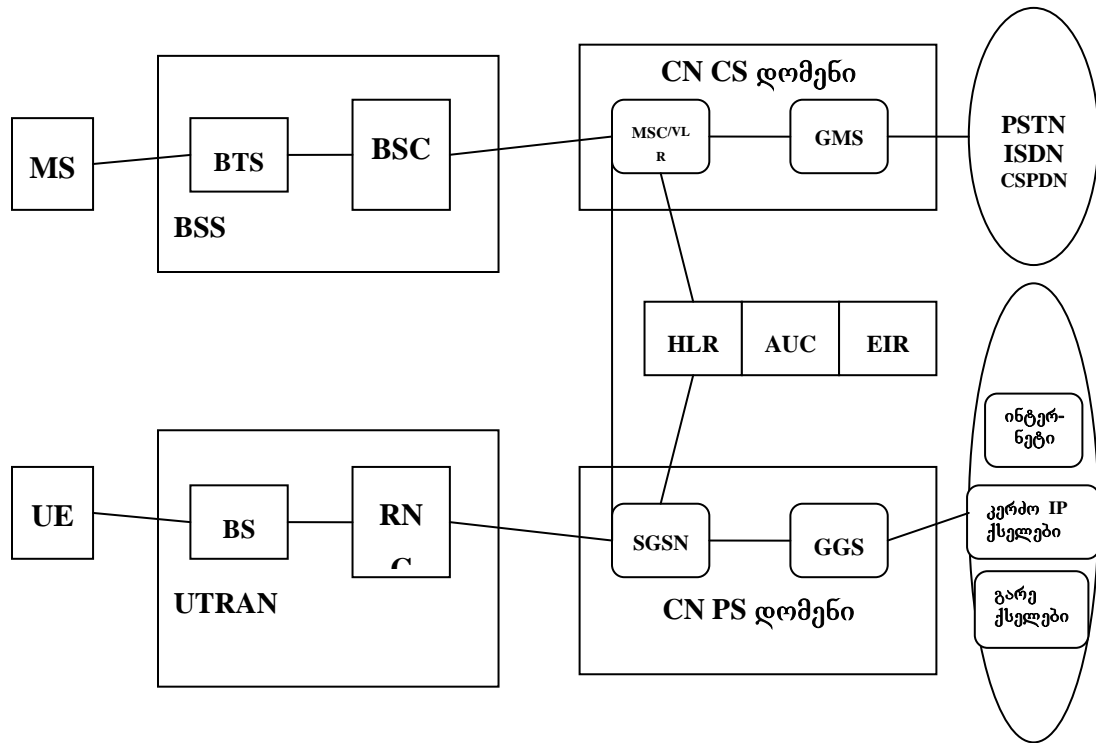
- მონაცემების მაღალსიჩქარიანი გადაცემის ფართო სპექტრი;
- მულტიმედია;
- შედწევა Internet-ის ქსელში;
- ვიდეოგამოსახულებების გადაცემა;
- ვიდეოკონფერენცკავშირის სიგნალების გადაცემა და სხვა.

დასმული ამოცანიდან გამომდინარე, დღეისათვის მე-3 თაობის მობილური რადიოკავშირის სისტემებში ინფორმაციის გადაცემის სიჩქარე აღწევს 21 მბიტ/წმ-ს IP ტექნოლოგიის გამოყენებით.

მობილური კავშირის 3G სისტემაში გამოიყენება არხების კოდური დაყოფის მეთოდი CDMA (Code Division Multiple Access). ამ დროს სხვადასხვა სიგნალის გადაცემა ხდება ერთდროულად ერთსა და იმავე სიხშირულ ზოლში, ანუ ამ შემთხვევაში არ ხდება არხების არც სიხშირული და არც დროითი დაყოფა. ამ დროს სალაპარაკო არხების ორგანიზება ხდება არხების კოდური დაყოფით. ეს კი იმას ნიშნავს, რომ თითოეულ აბონენტს მიენიჭება კოდი და გადასაცემი ინფორმაციის მოდულირება ხდება ამ კოდის საშუალებით. საბაზო სადგურში ხდება მისი დემოდულირება და იმავე ალგორითმით ინფორმაციის ამოღება. მიღებული ჯამური სიგნალი  $s(t) = \sum d_i(t)c_i(t)$  მრავლდება კოდურ  $c_j(t)$  სიგნალებზე  $d_j(t) = s(t) c_j(t) = c_j(t) \sum d_i(t)c_i(t)$ , სადაც  $c_i(t)$  კოდები ისეა

შერჩეული, რომ  $c_i(t)c_j(t) = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases}$

ფუნქციონალური თვალსაზრისით ქსელის ელემენტები ერთიანდებიან რადიოშელწევადობის (ან RAN-RADIO Access Network ან UMTS RAN-UTRAN) ქსელში, რომელიც ასრულებს ყველა აუცილებელ რადიოფუნქციას, და საბაზო ქსელში (core Network), რომელიც ასრულებს გამოძახების გადართვას და მარშრუტიზაციას და, აგრეთვე, მონაცემთა მიერთებას გარე ქსელებთან. გარდა ამისა, ქსელების შემადგენლობაში შედის მომხმარებლის მოწყობილობანი (ნახ. 1).



ნახ. 1. UMTS ქსელის სისტემური არქიტექტურა

სპეციფიკაციისა და სტანდარტიზაციის თვალსაზრისით UE და UTRAN შედგებიან სრულიად ახალი პროტოკოლებისაგან, რომლებიც დაფუძნებულია WCDMA ახალ რადიოტექნოლოგიაზე. საბაზო ქსელი (CN) გარკვეული ხარისხით GSM-ის ქსელის არქიტექტურაშიც არსებობს. ეს გარემოება ახალი რადიოტექნოლოგიის ბაზაზე აგებულ სისტემას აძლევს კარგად ცნობილი და ფართოდ გავრცელებული CN ტექნოლოგიის გამოყენების საშუალებას, რაც ხელს უწყობს აღნიშნული ტექნოლოგიის დანერგვას და რაც იძლევა როუმინგის გამოყენების საშუალებას.

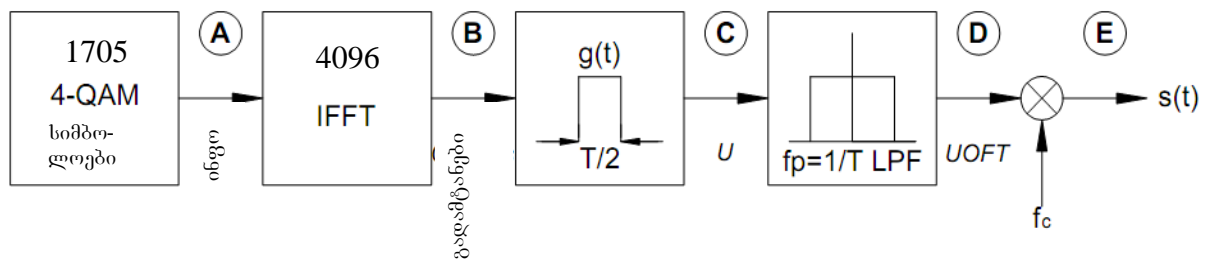


მეორე თავში განხილულია მოდულაციის ისეთი ფართოდ გავრცელებული სახეობა, როგორცაა OFDM. იგი ყურადღებას იქცევს უმთავრესად იმის გამო, რომ სისტემას ამუშავებს ისე, რომ ხელშეშლები ვერ ახდენს დიდ ზემოქმედებას. ამის გამოსაკვლევად ცხრილი 1-ში მოყვანილი OFDM-ის პარამეტრების კონკრეტული რიცხობრივი სიდიდეების მიხედვით განხორციელდა ევროპული DVB-T სტანდარტის ციფრული ტელემაუწყებლობის გადამცემში OFDM-სიმბოლოთა გენერაციის მოდელირება, რომლის სქემა წარმოდგენილია ნახ. 2-ზე.

ცხრილი 1. OFDM- პარამეტრების რიცხობრივი სიდიდეები 2k რეჟიმში

არამეტრები	2k რეჟიმი			
ძირითადი პერიოდი, T	7/64 მკწმ			
გადამტანთა რაოდენობა, K	1705			
გადამტანთა მინიმალური რაოდენობა, $K_{min}$	0			
გადამტანთა მაქსიმალური რაოდენობა, $K_{max}$	1704			
ხანგრძლივობა, $T_U$	224 მკწმ			
გადამტანთა გადაფარვა, $1/T_U$	4,464 ჰც			
გადაფარვა გადამტან $K_{min}$ -სა და $K_{max}(K-1)/T_U$ -ს შორის	7.61 მჰც			
დაშვებული დამცავი ინტერვალი, $\Delta/T_U$	1/4	1/8	1/16	1/32
სიმბოლოთა ნაწილის ხანგრძლივობა, $T_U$	2048xT 224 მკწმ			
დამცავი ინტერვალის ხანგრძლივობა, $\Delta$	512xT 56 მკწმ	256xT 28 მკწმ	128xT 14 მკწმ	64xT 7 მკწმ
სიმბოლოთა ხანგრძლივობა, $T_S = \Delta + T_U$	2,560xT 280 მკწმ	2,304xT 252 მკწმ	2,176xT 238 მკწმ	2,112xT 231 მკწმ

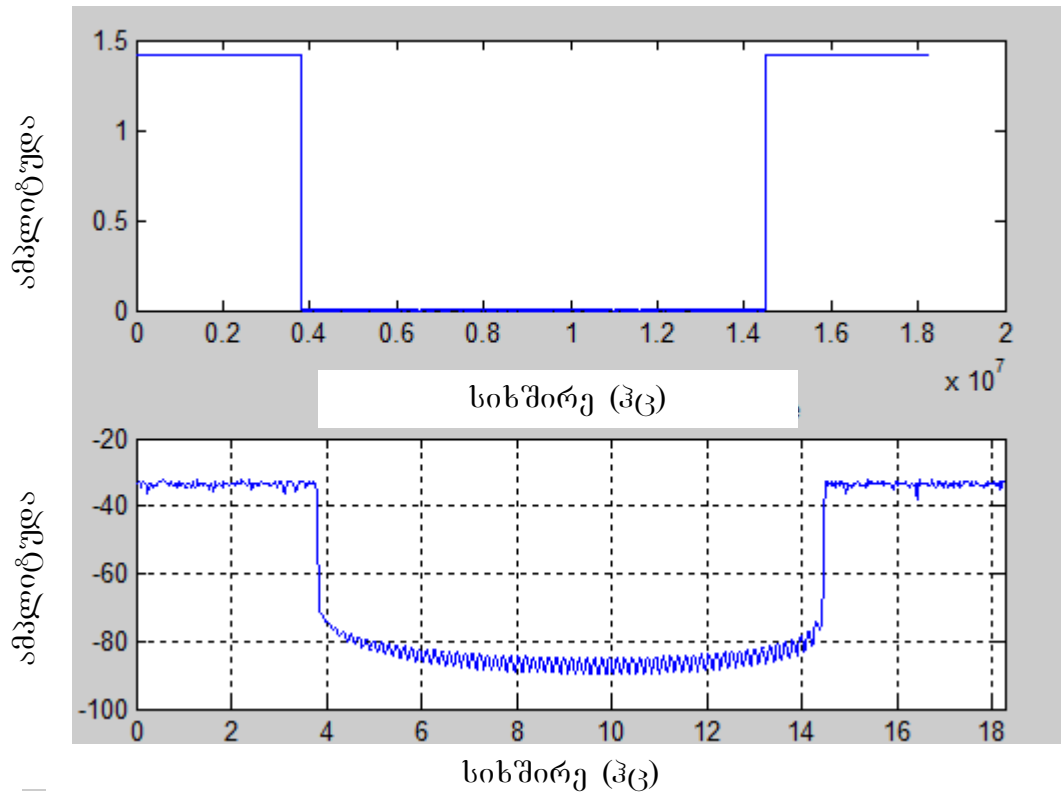
ნახ. 2-ზე წარმოდგენილია გადამცემში მიმდინარე თითქმის ყველა აუცილებელი პროცესი. მიუხედავად ამისა, ნაკლოვანებები მაინც გააჩნია მიღებულ სიგნალს, რაც განპირობებულია ფიზიკური არხის შემადგენელი ნაწილების არაიდეალურობითა და სიგნალზე მომქმედი ხელშეშლებით. აქედან გამომდინარე, წინამდებარე ნაშრომის მიზანია სიგნალის ფორმირების პროცესის თითოეული ეტაპის თვალსაჩინო აღწერა კომპიუტერული პროგრამის გამოყენებით, რაც სასარგებლო იქნება აღნიშნული პროცესების სრულყოფილი აღქმისათვის.



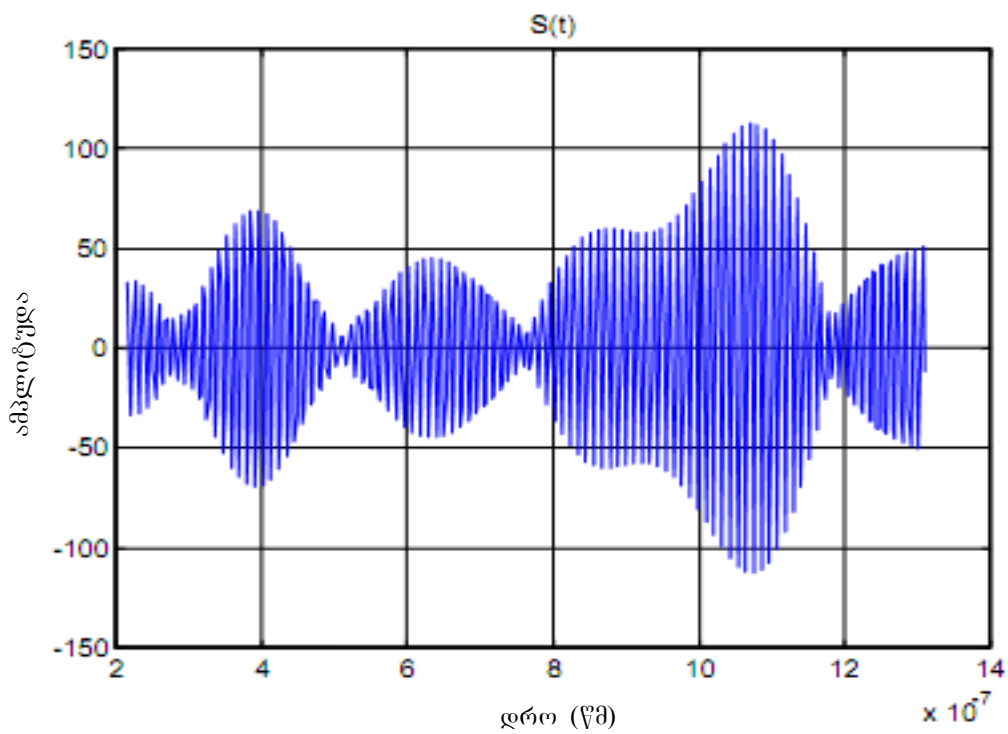
ნახ. 2. OFDM-სიმბოლოთა გენერაციის მოდელირება

ამავე თავში შესრულებულია ფურიეს გარდაქმნები და გათვალისწინებულია ფილტრის მიერ გამოწვეული დაყოვნება. ნახ. 3-ზე და ნახ. 4-ზე ნაჩვენებია სქემაზე მოყვანილი დროითი და სიხშირული მახასიათებლები (B) და (E) უბნებისათვის.

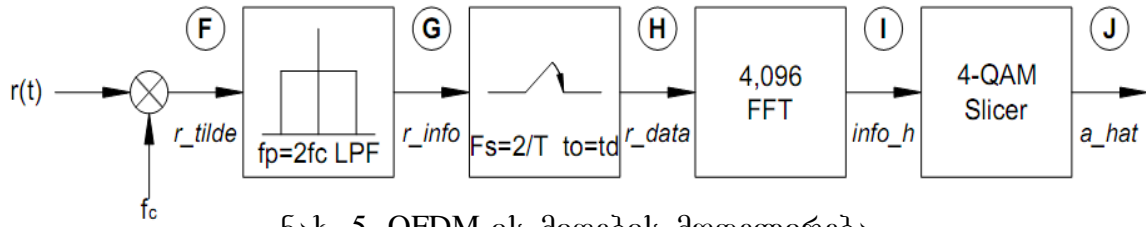
მესამე თავში დეტალურადაა აღწერილი მიმღებში ჩატარებული საპირისპირო პროცესი. როგორც ცნობილია, OFDM-ის მიმღების დიზაინი არასტანდარტიზირებულია (თავისუფალია, შეუზღუდავია), ე.ი. არსებობს მხოლოდ გადაცემის სტანდარტები. მიმღების თავისუფალი დიზაინის გათვალისწინებით, გამოკვლევებისა და სიახლეების უმეტესობა გამოიყენება მიმღებში. მაგალითად, სიხშირული მგრძნობელობის ცდომილება ძირითადად გამოწვეულია ტრანსმისიის სიგნალის რელაცნაირი ვარაუდით (პროგნოზირებით) მიმღებში. ზემოაღნიშნულიდან გამომდინარე, ნაშრომის მოცემულ თავში განხილულია მხოლოდ მიმღების ძირითადი სტრუქტურა (იხ. ნახ. 5).



ნახ. 3. სიგნალის გადამტანთა სიხშირული მახასიათებელი (B)-ზე



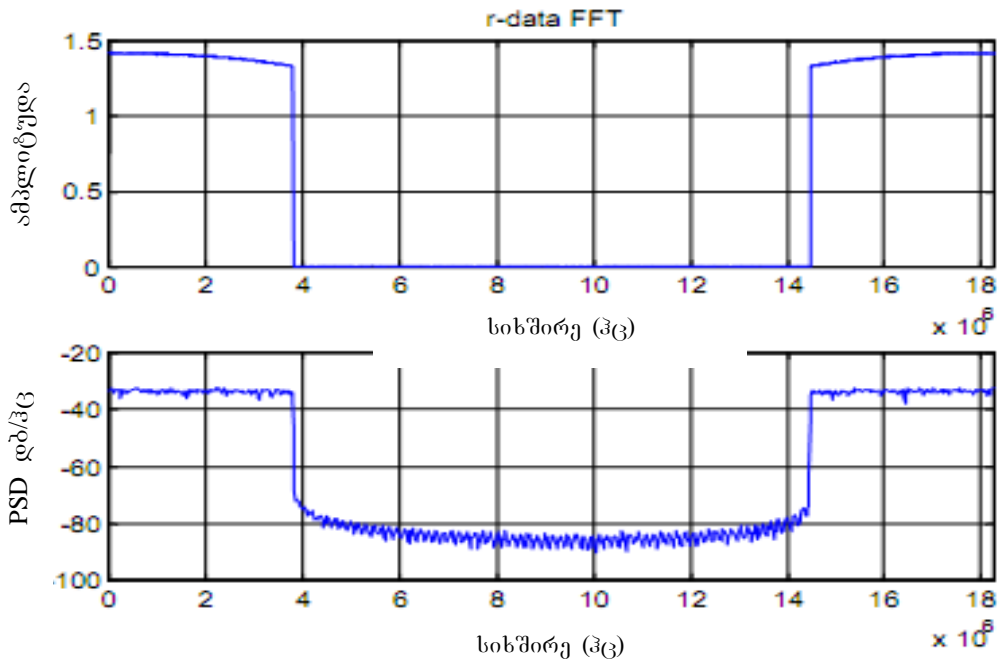
ნახ. 4.  $s(t)$ -სიგნალის დროითი მახასიათებელი (E)-ზე



ნახ. 5. OFDM-ის მიღების მოდელირება

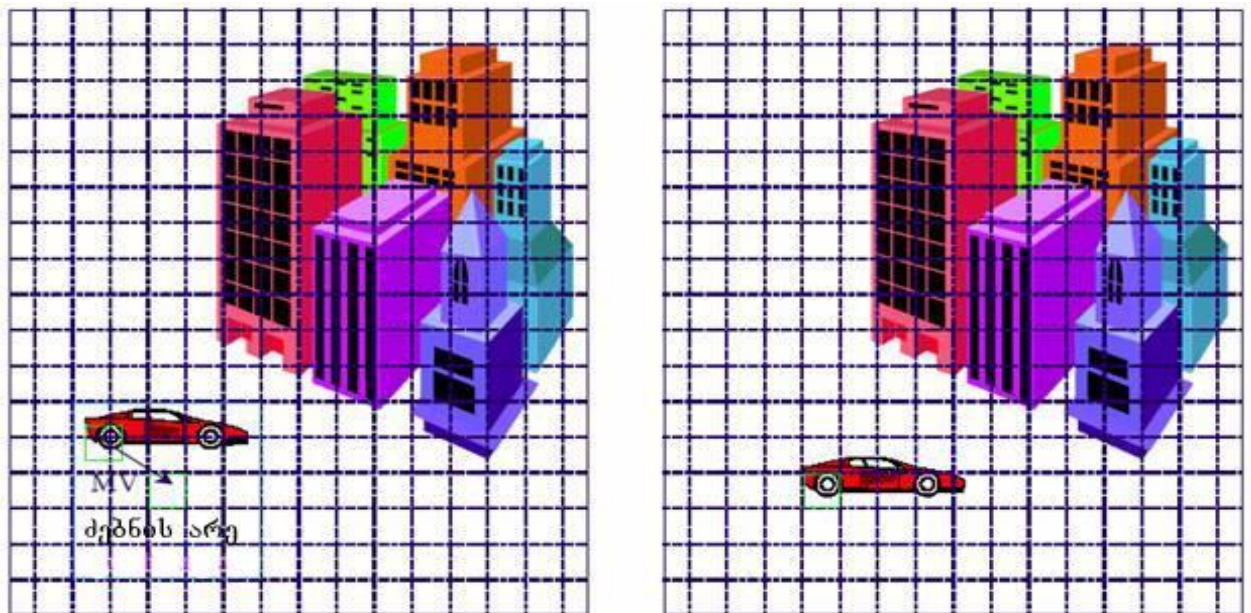
OFDM-მოდულაცია ძალიან მგრძობიარეა დროის ცვლილებისა და სიხშირის გადაფარვების მიმართ. თვით იდეალური სიმულაციის შემთხვევაშიც კი გასათვალისწინებელია ფილტრის მიერ გამოწვეული დაყოვნება.

მოდელირებისას სისტემაში ჩართული ფილტრებით გამოწვეული დაყოვნება დაახლოებით  $t_d=64/R_s$ -ის ტოლია, რაც სრულიად საკმარისია იმის საჩვენებლად, თუ რამდენად დამახინჯდა სიგნალი. ესაა მიზეზი იმ მცირეოდენი სხვაობისა, რომელიც შეგვიძლია დავინახოთ გადაცემულ და მიღებულ სიგნალებს შორის, რაც ნათლად ჩანს გადაცემის B (ნახ. 2) და მიღების H (ნახ. 5) ეტაპებზე სიგნალის მახასიათებლების ურთიერთშედარებიდან (ნახ. 3 და ნახ. 6).



ნახ. 6.  $r\_data$  სიგნალის სიხშირული მახასიათებელი (H)-ზე

მეოთხე თავეში აღწერილია სტანდარტები, მათი მოქმედების პრინციპები და სამომავლო ტენდენციები, რომლებსაც იყენებენ ვიდეოსერვისები UMTS-ში. მოძრაობის შეფასება და კომპენსაცია ვიდეო კომპრესიის უმრავლესი ალგორითმის ძირითადი ბაზისია. მოძრაობის კომპენსაციის ალგორითმი ემყარება იმ ფაქტს, რომ მიმდინარე კადრი უმნიშვნელოდ განსხვავდება წინა კადრისაგან, რაც კმნის წინასწარმეტყველებისა და ინტერპოლაციის გამოყენების შესაძლებლობას. მომდევნო კადრის მცირე განსხვავება წინა კადრისაგან შეიძლება გამოვეყუი იყოს ობიექტის ან კამერის მოძრაობით (ნახ. 7).



ნახ. 7. ინტერპოლაცია

როგორც ცნობილია, UMTS სერვისი იძლევა გამოსახულებათა გადაცემის საშუალებას რეალურ დროში, რაც განპირობებულია მთელი რიგი თეორიული კვლევების შედეგებითა და შესაბამისი აპარატურული რეალიზაციით, რომლებიც დროთა განმავლობაში სტანდარტებად იქცნენ. ციფრულ ტექნოლოგიებში მიღწეულმა პროგრესმა უზრუნველყო ციფრული ვიდეოსიგნალის შეკუმშვის (კომპრესიის) სხვადასხვა მეთოდების დანერგვა. თუმცა თითოეული ამ მეთოდის ჩამოყალიბებაში

გარკვეულ როლს ასრულებს სტანდარტიზაცია, რასაც უდიდესი მნიშვნელობა აქვს ჩვეულებრივი შეკუმშვის მეთოდების განვითარებაში. ვიდეოსიგნალის შეკუმშვის ნებისმიერი სტანდარტი, ისევე როგორც MPEG და H ჯგუფების სტანდარტები, განსაზღვრულია სტანდარტიზაციის საერთაშორისო ორგანიზაციის ISO-ს (International Organization for Standardization) მიერ.

MPEG (Motion Picture Experts Group – მოძრავი გამოსახულების ექსპერტთა ჯგუფი) პირველად დაფუძნდა 1988 წელს, გამოეყო რა H.261 სტანდარტის შექმნაზე მომუშავე ჯგუფს, რომელიც იყო ISO/IEC ორგანიზაციის (International Organization for Standardization/ International Electrotechnical Commission– სტანდარტიზაციის საერთაშორისო ორგანიზაცია/საერთაშორისო ელექტროტექნიკური კომისია) საერთაშორისო ექსპერტთა ჯგუფის წევრი. მათ მიზანს წარმოადგენდა ციფრული აუდიო, ვიდეო და მონაცემთა სიგნალების შეკუმშვის სტანდარტის დამუშავება ამ სიგნალების სულ უფრო მზარდი რაოდენობის გადაცემისათვის არსებული რესურსების გამოყენებით.

დღესდღეობით MPEG აერთიანებს 200 ორგანიზაციასა და ასობით სპეციალისტს. მიზანი დღესაც იგივეა – გამოსახულების, ხმისა და მათი კომბინაციის კომპრესია, დამუშავება და კოდური წარმოდგენა. ასევე აღსანიშნავია ექსპერტთა მეორე ჯგუფი, რომლებიც ასევე ქმნიან და აუმჯობესებენ მიღწეულ შედეგს და რომლებიც მუშაობენ 1986 წელს შექმნილი H ჯგუფის სტანდარტებზე.

მესუთე თავში აღწერილია არხების კოდირება. მესამე თავის 3G-სისტემების მსგავსად არსებული HSPA-სისტემა იყენებს ტურბოკოდირებას, როგორც არხების კოდირების სქემას. LTE-სისტემა უზრუნველყოფს მონაცემთა გადაცემის პიკურ (მაქსიმალურ) სიჩქარეს, რომელიც აღემატება 3G-სისტემების შესაბამის სიჩქარეს. შესაბამისად, მართებულია იმ საკითხების გარკვევა, შესაძლებელია თუ არა ტურბოკოდირების სისტემის გამოყენება LTE სისტემაში და რამდენად დააკმაყოფილებს აღნიშნული სისტემის მიერ უზრუნველყოფილი მონაცემთა გადაცემის



სიჩქარისადმი (>100 მბ/წმ) მოთხოვნილ პირობებს. ეს საკითხი განსაკუთრებით მნიშვნელოვანია, ვინაიდან კოდირების სხვა სქემები, რომლებშიც გამოიყენება პარალელიზმის პრინციპი (პარალელურად ჩართული პროცესორები), უზრუნველყოფენ დეკოდირების ძალიან მაღალ სიჩქარეებს ისევე, როგორც ბოლო ხანებში ხელმისაწვდომი ლუწობაზე შემოწმების დაბალი სიმკვრივის LDPC-კოდი.

მთავარი არგუმენტი ტურბოკოდირების სქემების საწინააღმდეგოდ ისაა, რომ ისინი არ ექვემდებარებიან პარალელიზმის პრინციპს, რითაც იზღუდება დეკოდირების მისაღწევი სიჩქარე. ფაქტიურად პრობლემა მდგომარეობს ტურბოკოდის შიდა შენაცვლების მოწყობილობაში, რომელიც გამოიყენება არსებულ HSPA-სისტემებში, რაც ქმნის კონფლიქტს პარალელურ რეჟიმში მომუშავე პროცესორების მეხსიერებათა შორის. შესაბამისად, თუ ტურბოკოდის შიდა შენაცვლების მოწყობილობა რამენაირად შექმნის აღნიშნული კონფლიქტისაგან თავის დაღწევას, მაშინ მისთვის შესაძლებელი გახდება იმ უპირატესობების რეალიზაცია, რომლებიც გააჩნია მონაცემთა პარალელურ დამუშავებას, რაც, საბოლოოდ, უზრუნველყოფს დეკოდირების მაღალი სიჩქარეების მიღწევას. ტურბოკოდების მსგავსად, LDPC-კოდებიც (შეცდომების კორექტირების კოდები) წარმოადგენენ შენონის მიერ დადგენილ ლიმიტთან (ინფორმაციის გადაცემის მაქსიმალური სიჩქარე) მიახლოებულ კოდებს. სულ ახლახანს, LDPC-კოდები ადაპტირებული იქნა შემდეგ სტანდარტებთან: უსადენო IEEE802.16e MAN-თან, უსადენო IEEE802.11n LAN-თან (ლოკალური გამოთვლითი ქსელი) და DVB-თან (ციფრული ტელემაუწყებლობის სისტემა).

LDPC-კოდები იძლევა მაქსიმალურად მოქნილი ისეთი კოდის შექმნის საშუალებას, რომელიც შეიძლება სპეციალურად მიესადაგოს ეფექტური კოდირებისა და დეკოდირების პროცესებს. LDPC-კოდებისადმი არსებული ინტერესი განპირობებულია მისი ძალიან მაღალი წარმადობის (ინფორმაციის დამუშავების მაღალი სიჩქარის) უზრუნველყოფით, რაც, თავის მხრივ, გამოწვეულია დეკოდირების ალგორითმის პარალელიზმის

პრინციპით. აღსანიშნავია, რომ ამავე დროს უზრუნველყოფილია შეცდომების კარგი კორექტირება და დეკოდირების დაბალი სირთულე.

LDPC-კოდები პირველად შემოღებული იქნა გალაგერის მიერ. მაგრამ, ასეთი კოდები, კოდერისა და დეკოდერის მუშაობისას გამოთვლებზე მნიშვნელოვანი დროითი დანახარჯების გამო, რიდ-სოლომონის კოდებთან შედარებით, მეტწილად იგნორირებული იქნა დაახლოებით ათი წლის წინ. ერთ-ერთი შესამჩნევი გამონაკლისი იყო ტანერი, რომელმაც მნიშვნელოვანი სტატია გამოაქვეყნა 1981 წელს, სადაც აღწერილია LDPC-კოდების გენერირებისა და მათი გრაფიკული სურათი. ამჟამად მათ ტანერის გრაფიკებს უწოდებენ. გალაგერის ნაშრომისგან დამოუკიდებლად, LDPC-კოდები ხელახლა იქნა შექმნილი 1990-იან წლებში მაკეის, ლუბის და სხვათა მიერ.

ძირითადად არსებობს LDPC-კოდების წარმოდგენის ორი სხვადასხვა შესაძლებლობა.

პირველი მათგანის მიხედვით, ყველა წრფივი ბლოკ-კოდის მსგავსად, ისინი შეიძლება აღიწეროს მატრიცების საშუალებით.

განვიხილოთ ლუწობაზე შემოწმების დაბალი სიმკვრივის  $8 \times 4$  ზომის მატრიცა  $H$ .

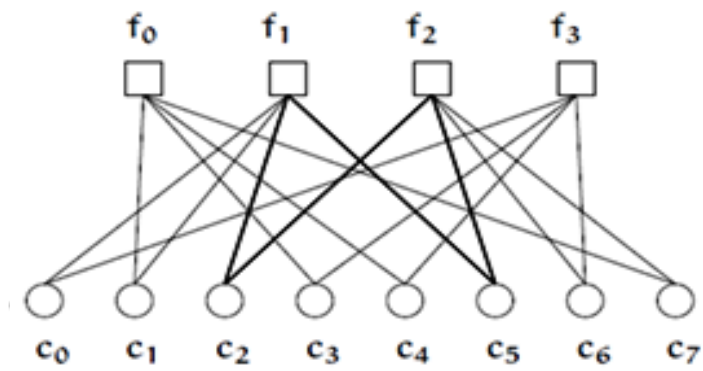
$$H = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

შეგვიძლია განვსაზღვროთ ორი რიცხვი, რომლებიც აღწერენ ამ მატრიცას. 1-იანების რაოდენობა თითოეულ სტრიქონში ავლნიშნოთ  $w_r$ -ით, ხოლო 1-იანების რაოდენობა თითოეულ სვეტში –  $w_c$ -თი. იმისათვის, რომ მატრიცას ეწოდოს დაბალი სიმკვრივის მატრიცა, უნდა დაკმაყოფილდეს შემდეგი ორი პირობა –  $w_r \ll n$  და  $w_c \ll m$ , სადაც  $n$  და  $m$  ლუწობაზე შემოწმების  $H$  მატრიცის სვეტებისა და სტრიქონების რაოდენობებია შესაბამისად. (1) მატრიცაში  $n=8$  და  $m=4$ . დაბალი სიმკვრივის მიღწევის მიზნით, ლუწობაზე შემოწმების  $H$  მატრიცის ზომა ზოგადად ძალიან დიდი



უნდა იყოს. ამიტომ მატრიცა (1) შეუძლებელია მივაკუთვნოთ დაბალი სიმკვრივის მატრიცების ჯგუფს.

LDPC-კოდების წარმოდგენის მეორე შესაძლებლობაა ტანერის გრაფების გამოყენება. ტანერის გრაფები არა მარტო უზრუნველყოფენ კოდის სრულ წარმოდგენას, არამედ აღწერენ დეკოდირების ალგორითმსაც. ტანერის გრაფები ორი ნაწილისგან შემდგარი გრაფებია, რაც იმას ნიშნავს, რომ გრაფების წვეროები დაყოფილია ორ სხვადასხვა ჯგუფად (ტიპად) და წიბოები მხოლოდ აკავშირებენ ორი სხვადასხვა ტიპის წვეროებს. წვეროების ორ ტიპიდან ერთ-ერთს ეწოდება ცვლადი წვეროები (v-წვეროები), ხოლო მეორეს – შემოწმების წვეროები (c-წვეროები). ტანერის გრაფს აქვს შემოწმების  $m$  რაოდენობის c-წვერო და  $n$  რაოდენობის v-წვერო, რომელთაგან თითოეული მათგანი შეესაბამება  $H$ -ის ყოველ სტრიქონს (ღუწი ბიტების რაოდენობა) და ყოველ სვეტს (ბიტების რაოდენობა კოდირებულ სიტყვაში) შესაბამისად, როგორც ეს ნაჩვენებია ნახ. 8-ზე. იმ შემთხვევაში, როდესაც  $H$ -ის ელემენტი  $h_{ij}=1$ , შემოწმების წვერო  $c_i$  შეერთებულია ცვლად წვეროსთან  $v_j$ .



ნახ. 8. ტანერის გრაფი LDPC-კოდისთვის  $H$  მატრიცით (1) განტოლებიდან

როგორც აღვნიშნეთ, LDPC-კოდები მიმზიდველია გამოთვლის ეფექტურობის თვალსაზრისით, ვინაიდან ისინი გეთავაზობენ გამოთვლის პროცესის პარალელიზმის მაღალ დონეს. ეს ხდება იმიტომ, რომ ისინი

შედგება ლუწობაზე შემოწმების განტოლებებისგან, რომლებიც შეიძლება დამოუკიდებლად იქნეს განახლებული. რადგან ერთმანეთთან შეერთების სირთულე მაღალია, ყველა შემოწმების წვერო შეიძლება განახლებულ იქნეს ერთდროულად და მთელი გარეშე ინფორმაცია ერთდროულად გადაეცეს ცვალებად წვეროებს. მსგავსად ამისა, ყველა ცვალებადი წვერო შეიძლება ერთდროულად განახლდეს ტურბო კოდებისაგან განსხვავებით, სადაც შემადგენელი კოდის ფარგლებში მთელი ინფორმაციის ბიტები დაკავშირებულია ერთი მესრით (საკოორდინატო ბადეზე გაკეთებული გრაფიკი) და არსებითად თითოეული მესრის უჯრედს ჭირდება ინფორმაციის მიღება მეზობელი მესრის უჯრედებისაგან.

სტრუქტურული LDPC-კოდების  $H$  მატრიცის აგება იწყება მცირე  $n_b \times n_b$  ზომის ორბითი მატრიცით. მატრიცაში 1-ები ყველგან იცვლება ნულებით ან  $z \times z$  ზომის გადანაცვლებულ ერთეული მატრიცებით. სტრუქტურული LDPC-კოდების გამოყენებით კოდირებისა და დეკოდირების ორივე მატრიცა შეიძლება აიგოს გაცილებით მცირე ზომის მატრიცისა და ბიტების LLRs ვექტორების საფუძველზე, სადაც თითოეულ ვექტორს  $z$  ზომა აქვს. სტრუქტურული LDPC-კოდები შეიძლება განისაზღვროს იმ მიზნით, რომ შესაძლებელი იყოს ინფორმაციის დამუშავების მაღალი სიჩქარის მქონე დაბალი სირთულის კოდირებისა და დეკოდირების ალგორითმების გამოყენება.

როგორც იყო აღნიშნული, LDPC-კოდები უზრუნველყოფენ გამოთვლების პარალელურობის პრინციპს, რომელიც აადვილებს დეკოდირების განხორციელებას მაღალი გამტარუნარიანობით. ტურბოკოდები შეიძლება ასევე გამოყენებული იყოს პარალელური გამოთვლებისათვის იმ შემთხვევებში, როდესაც შიდა შენაცვლების მოწყობილობების მესხიერებები იქნება უკონფლიქტო. საკამათოა ის მოსაზრება, რომ LDPC-კოდები არ გამოირჩევიან რაიმე აშკარა უპირატესობით ტურბოკოდებთან შედარებით, ვინაიდან შეცდომების არსებობის შესაძლებლობა კოდირების ორივე სისტემაში ერთნაირია. LTE-სისტემაში ტურბოკოდის გამოყენების სასარგებლოდ მეტყველებს ის, რომ UMTS-ის პროდუქტი 6HSPA ასევე

იყენებს ტურბოკოდს. უნდა აღინიშნოს, აგრეთვე, რომ წინამორბედ ვერსიებთან თავსებადობის გამო, ტურბოკოდების განხორციელებისათვის საჭირო იქნება ორრეჟიმიანი LTE-ტერმინალებისა და, შესაბამისად, წინამორბედ ვერსიებში არსებული დეკოდირების მოწყობილობის გამოყენება.

მეორეს მხრივ, თუ იქნა შემოღებული აბსოლუტურად განსხვავებული კოდირების ახალი სქემა, რომელიც აგებულია LDPC-კოდის ბაზაზე, მაშინ გართულებება გამოთვლების სირთულე, ვინაიდან ტერმინალებმა უნდა უზრუნველყონ ორი სხვადასხვა კოდირების სქემის ამუშავება. აღნიშნულ არგუმენტებზე და, აგრეთვე, იმ ფაქტზე დაყრდნობით, რომ 3GPP-სისტემებში გამოყენებულ კოდირების სქემას არ ჭირდება ძლიერი პროცესორი (როგორც საჭიროა LDPC-კოდის შემთხვევაში), LTE-სისტემაში მიზანშეწონილია ტურბოკოდის გამოყენება LDPC-კოდის ნაცვლად.

ნაშრომის მოცემულ თავში გამოკვლეულია დიფერენციალურად კოდირებული ლუწობაზე შემოწმების დაბალი სიმკვრივის მქონე კოდების (DE-LDPC) თეორიისა და პრაქტიკული რეალიზაციის საკითხები არაკოჰერენტული დეტექტირების კონტექსტში. თავის პირველ ნაწილში ნაჩვენებია, რომ DE-LDPC კოდების სპეციალური კლასი, ანუ ნამრავლთა აკუმულირების (დაგროვების) კოდები კარგად მუშაობს როგორც კოჰერენტული, ისე არაკოჰერენტული დეტექტირებისას.

აღნიშნულ ნაშრომში ჩატარებული კვლევის შედეგების ანალიზმა გამოავლინა, რომ სტანდარტული LDPC-კოდი არ არის წყვეტილი დიფერენციალური კოდირებისას და ზოგადად არ იძლევა სასურველ სამუშაო მახასიათებლებს არაკოჰერენტული დეტექტირებისას. ნაშრომში დამუშავებული ინფორმაციის გადაცემისა და მოდიფიცირებული ე.წ. „დაახლოების (კონვერგენციის) შეზღუდვის“ სიმკვრივის ცვალებადობის მეთოდის ანალიზის საფუძველზე წარმოდგენილია დიფერენციალური დეტექტირებისას ჰარმონიულად მომუშავე LDPC-კოდის ხარისხობრივი მაჩვენებლების დახასიათება, რომელიც გვიჩვენებს იმას, თუ როგორ

უნდა მოხდეს LDPC-კოდების ოპტიმიზირება. აღნიშნული მეთოდი გვაძლევს არსებული სტანდარტული მეთოდის გაუმჯობესების საშუალებას. მას შეუძლია შეუსაბამოს გარეთა LDPC-კოდი ნებისმიერ მოცემულ შიდა კოდს შიდა დეკოდერის არასრულყოფილების გათვალისწინებით.

შეკრებადობის თვისება მეტყველებს იმაზე, რომ იტერაციულ (ციკლურ) დეკოდერში კოდების წარმატებული შეკრებადობისათვის (მიახლოებისათვის) გარეთა მრუდი უნდა იმყოფებოდეს ზუსტად შიდა მრუდის ქვემოთ, ტოვებდეს რა ღია სივრცეს მათ შორის. მრუდის ქვეშ არსებული ფართობი  $A = \int_0^1 I_e dI_a$  შეესაბამება კოდის სიჩქარეს, სადაც  $I_a$  და  $I_e$  აღნიშნავს კონკრეტულ სუბდეკოდერში შემავალ (აპრიორულ) და მისგან გამომავალ (გარე) ურთიერთინფორმაციებს. შესაბამისად, თუ დამხმარე არხი წამშლელი არხია და სუბდეკოდერი ოპტიმალურია, კავშირი ზუსტია. სხვა შემთხვევაში გვექნება კარგი აპროქსიმაცია. ამ თვისებათა უშუალო არხი იმაში მდომარეობს, რომ შიდა (არაკოპერენტული) დიფერენციალური დეკოდერის მიერ უზრუნველყოფილი სიჩქარის სრული მიღწევისათვის გარე კოდს უნდა ჰქონდეს ისეთი მრუდი, რომელიც ფორმითა და პოზიციით (მდებარეობით) ძალიან უახლოვდება შიდა კოდის იმავე მრუდს.

განვიხილოთ შიდა კოდის ორი კონფიგურაცია:

1. დიფერენციალური დეკოდერი  $1/(1+D)$ -სთვის;
2. პირდაპირი დეტექტორი, ანუ BPSK დეტექტორი

განვიხილოთ, აგრეთვე, გარე კოდის სამი კონფიგურაცია:

1. PA კოდის გარე კოდი, რომელსაც აქვს ხარისხის პროფილი:

$$\begin{aligned} \lambda(x) &= \frac{1}{7} + \frac{6}{7}x, \\ \rho(x) &= x^7; \end{aligned} \tag{3}$$

3x12 ზომის რეგულარული LDPC-კოდი და (3)-ით ნაჩვენები ოპტიმიზირებული არარეგულარული LDPC-კოდი, რომლის ზღვარია 0,6726 დბ, დაახლოებით 0,0576 დბ-ით შორსაა AWGN სიმძლავრისგან და მისი ხარისხის პროფილი შემდეგია

$$r(x) = 0.1510x + 0.1978x^2 + 0.2201x^6 + 0.0353x^7 + 0.3958x^{29},$$

$$\rho(x) = x^{20}. \tag{4}$$

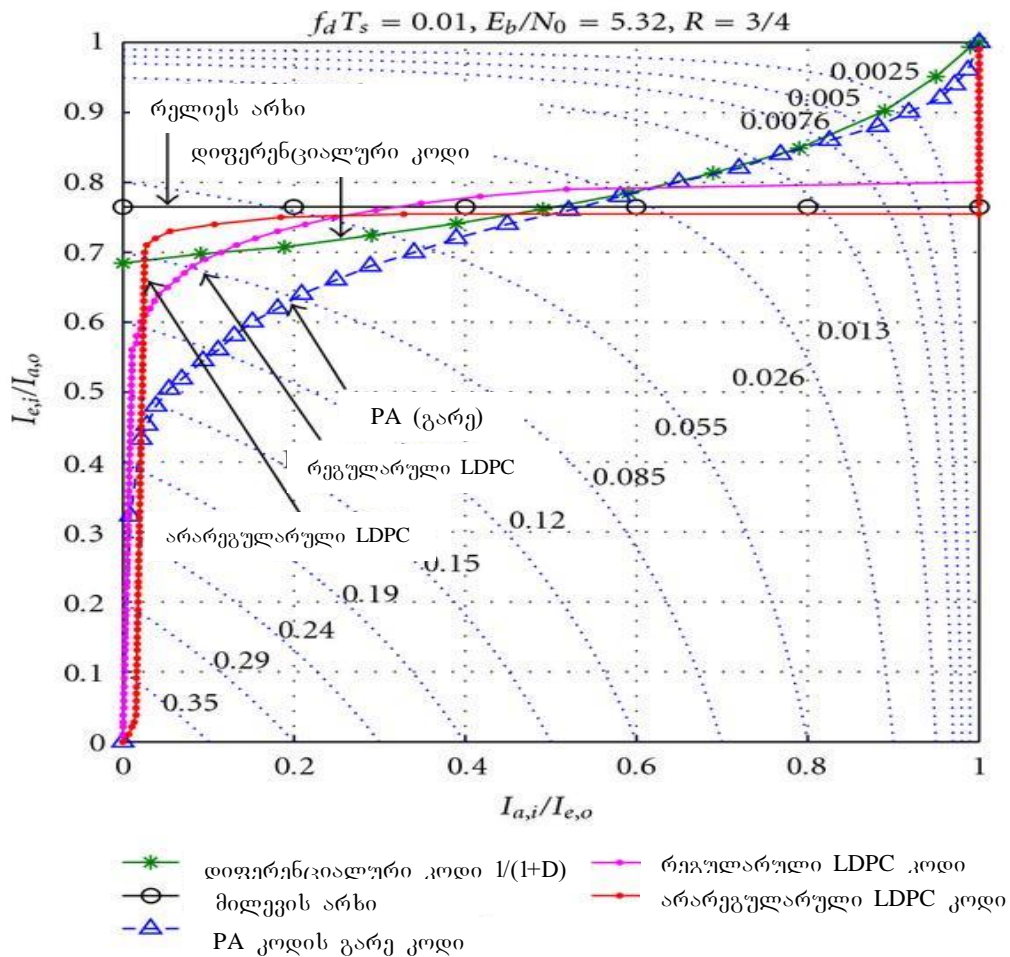
სამივე გარე კოდს აქვს 3/4 სიჩქარე და არხი რელეის მილევის კორელირებული არხია AWGN-ით და ნორმალიზებული დოპლერის სიჩქარით  $f_d T_s = 0.01$ .

მრუდები, რომლებიც დატანილია ნახ. 9-ზე, გვიჩვენებს, რომ PA-კოდის გარე კოდი და დიფერენციალური დეკოდერი კარგად შეესატყვისება ერთმანეთს, მაგრამ სტანდარტული რეგულარული ან არარეგულარული LDPC-კოდის შესაბამისი მრუდი ან გადაკვეთს დიფერენციალურ დეკოდერის შესაბამის მრუდს, რაც იწვევს შეცდომების გაზრდას დეკოდერში, ან დატოვებს უზარმაზარ ფართობს (ადგილს) მრუდებს შორის, რაც გამოიწვევს სიმძლავრის დანაკარგს.

მეორე მხრივ, LDPC-კოდები, განსაკუთრებით კი არარეგულარული (ობტიმიზირებული) კოდები, კარგად შეესაბამება პირდაპირ დეტექტირებას, რაც მიუთითებს იმაზე, რომ სტანდარტული LDPC-კოდები უკეთესად მუშაობს როგორც ერთიანი კოდი და არა ისე, როგორც იგი მუშაობს რეკურსიულ შიდა კოდთან ერთად. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, LDPC-კოდი, რომელიც ოპტიმალურია ჩვეულებრივი გაგებით, მაგალითად, BPSK მოდულაციისა და მახსოვრობის (დამახსოვრების) არმქონე არხებისას, შეიძლება გახდეს ნაკლებად ან ნაწილობრივ ოპტიმალური, როდესაც მუშაობს რეკურსიულ შიდა კოდთან ან რეკურსიულ მოდულაციასთან ერთად, როგორც ეს დამახასიათებელია დიფერენციალური დეკოდერისათვის.

აღსანიშნავია, რომ დიფერენციალური კოდირების გამოყენებლობა ზოგადად მოითხოვს უფრო მეტი პილოტური სიმბოლოების ჩართვას არხის მახასიათებლებისადმი უკეთესი თავსებადობის მიზნით, განსაკუთრებით კი გავრცელების სწრაფად მილევადი არეების შემთხვევაში. შესაბამისად, სამართლიანია იმის აღნიშვნა, რომ სტანდარტული LDPC-კოდები, რომლებიც გამოირჩევიან შესანიშნავი მახასიათებლებით კოპერენტული დეტექტირებისას, შეიძლება არ იყოს

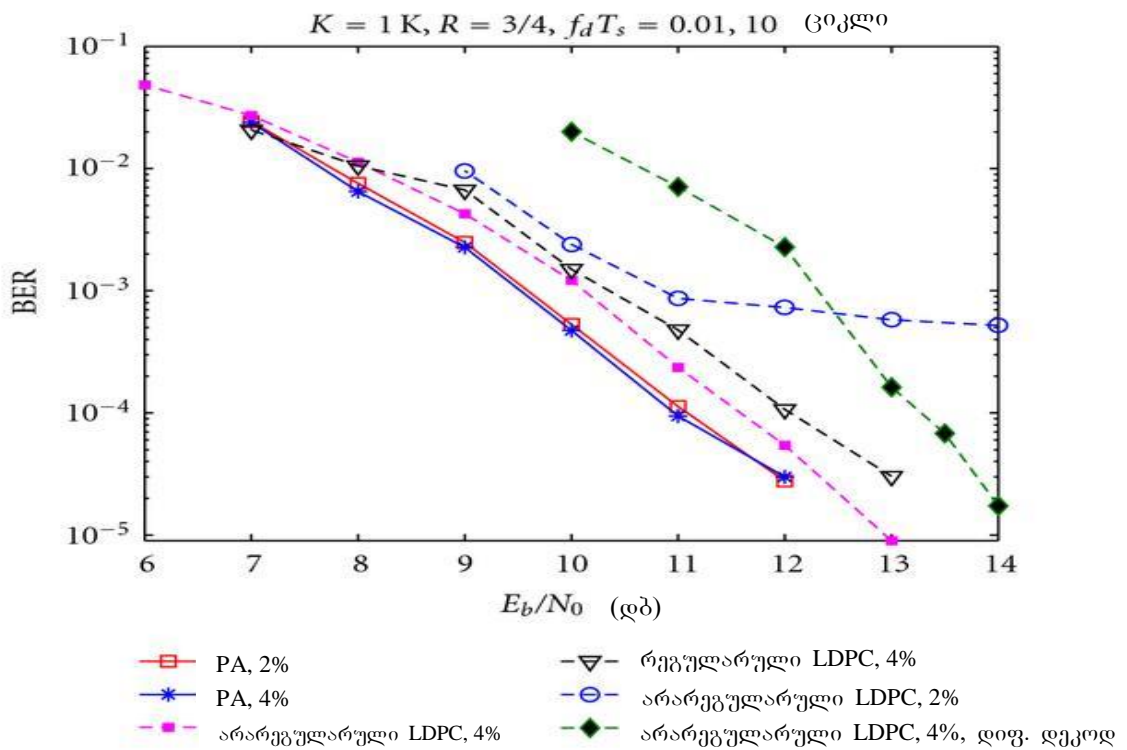
ისეთივე ხელსაყრელი და ეფექტური არაკოჰერენტული დეტექტირებისას, ვინაიდან ისინი ან ზარალდებიან მწარმოებლურობის დაკარგვის გამო (დიფერენციალური კოდირებისას) ან განიცდიან სისშირეთა დიაპაზონის საგრძნობ გაფართოებას (დიფერენციალური კოდირების გამოუყენებლობისას). LDPC-კოდებისგან განსხვავებით PA-კოდებმა შეიძლება გამოიყენონ ჩვეულებრივი დიფერენციალური კოდი არაკოჰერენტული დეტექტირებისათვის, რაც უკეთესი არჩევანია შეზღუდული სიგანის მქონე სისშირეთა ზოლის შესაბამისი უსადენო სისტემებისათვის.



ნახ. 9. LDPC კოდები. PA კოდის გარე კოდი და დიფერენციალური დეკოდირება



ნახ. 10-ზე დატანილია BER-მასხასიათებელი მრუდი იმავე სამი კოდისა, რომლებიც განსაზღვრულია ნახ. 9-ზე არაკოჰერენტული დეტექტირების მქონე რელეის არხებისათვის. ამ შემთხვევაში: სამივე კოდის მონაცემთა ბლოკის ზომა  $K = 1$ ; სიჩქარე 3/4-ია; მსუბუქი უკუკავშირია გამოყენებული IDDD-ში; ნორმალიზებული დოპლერის ეფექტია 0,01; საპილოტე სიმბოლოების 2% და 4%-ია ჩართული არხის შესაბამისი მასხასიათებლების უზრუნველყოფისათვის; შეფასებულია ორი LDPC-კოდი დიფერენციალურ შიდა კოდთან ერთად ან მის გარეშე.



ნახ. 10. BER მასხასიათებლის მრუდები

როგორც ნახ. 10-ზე წარმოდგენილი მრუდები გვიჩვენებს, ენერგოეფექტურობის კლებადობის თვალსაზრისით კოდები განლაგებულია შემდეგი თანმიმდევრობით: 1. PA-კოდი საპილოტე სიმბოლოების 4%-ით; 2. PA- კოდი საპილოტე სიმბოლოების 2%-ით; 3. არარეგულარული LDPC-კოდი საპილოტე სიმბოლოების 4%-ით BPSK-მოდულაციისას; 4. რეგულარული LDPC-კოდი საპილოტე სიმბოლოების

4%-ით BPSK-მოდულაციისას; 5. არარეგულარული LDPC- კოდი საპილოტე სიმბოლოების 2%-ით BPSK-მოდულაციისას; 6. დიფერენციალურად კოდირებული არარეგულარული LDPC-კოდი საპილოტე სიმბოლოების 4%-ით. აშკარაა, რომ სტანდარტული LDPC- კოდები მნიშვნელოვნად ზიანდება დიფერენციალური შიდა კოდებისგან სისშირეთა ზოლის 4%-იანი გაფართოებისას. არარეგულარული და რეგულარული LDPC-კოდები BPSK-მოდულაციისას მუშაობენ, შესაბამისად, დაახლოებით 0,5 დბ-ითა და 1 დბ-ით უარესად, ვიდრე კოდები 10<sup>-4</sup> BER-ის დროს, ხოლო დიფერენციალურად კოდირებულ არარეგულარულ LDPC-კოდებს 2,2 დბ-ზე მეტიც კი აკლდებათ. გარდა ამისა, იმ შემთხვევაში, როდესაც არარეგულარული LDPC-კოდი (არა დიფერენციალურად კოდირებული) ზომიერადაა (0,5 დბ) მოქცეული 4%-იანი პილოტური სიმბოლოების მქონე PA-კოდის უკან, სხვაობა გაცილებით მნიშვნელოვანი ხდება მაშინ, როდესაც საპილოტე სიმბოლოების რაოდენობა ორჯერ მცირდება. PA-კოდებისთვის 2%-იანი საპილოტე სიმბოლოები მაინც მისაღებია სასურველი სამუშაო მახასიათებლების უზრუნველსაყოფად, მაგრამ ისინი არასაკმარისი ხდება არადიფერენციალურად კოდირებული LDPC-კოდებისთვის არხის მახასიათებლებთან თავსებადობის თვალსაზრისით, რაც იწვევს არხის მწარმოებლურობის საგრძნობ დანაკარგებს და შეცდომების ისეთ მაღალ მინიმალურ დონეს, როგორცაა 10<sup>-3</sup> BER-ში. ამრიგად, PA-კოდების უპირატესობა სტანდარტულ LDPC-კოდებთან მიმართებაში სავსებით აშკარაა, რაც განსაკუთრებით თვალსაჩინოა იმ შემთხვევებში, როდესაც არაკოჰერენტული დეტექტირებაა საჭირო და როდესაც მხოლოდ სისშირეთა ზოლის შეზღუდული გაფართოებაა დაშვებული.

მეექვსე თავში ნაჩვენებია, რომ დიფერენციალური კოდირებისათვის კოდების ოპტიმალური LDPC ჯგუფი ყოველთვის შეიცავს პირველი და მეორე ხარისხის ცვალებად კვანძებს. მაღალსიჩქარიანი კოდებისათვის (0,75-ზე მეტი) ეს კვანძები დომინირებადია და, ზოგიერთ შემთხვევაში, წარმოადგენს ცვალებადი კვანძების ერთადერთ სახეობას ნებისმიერი



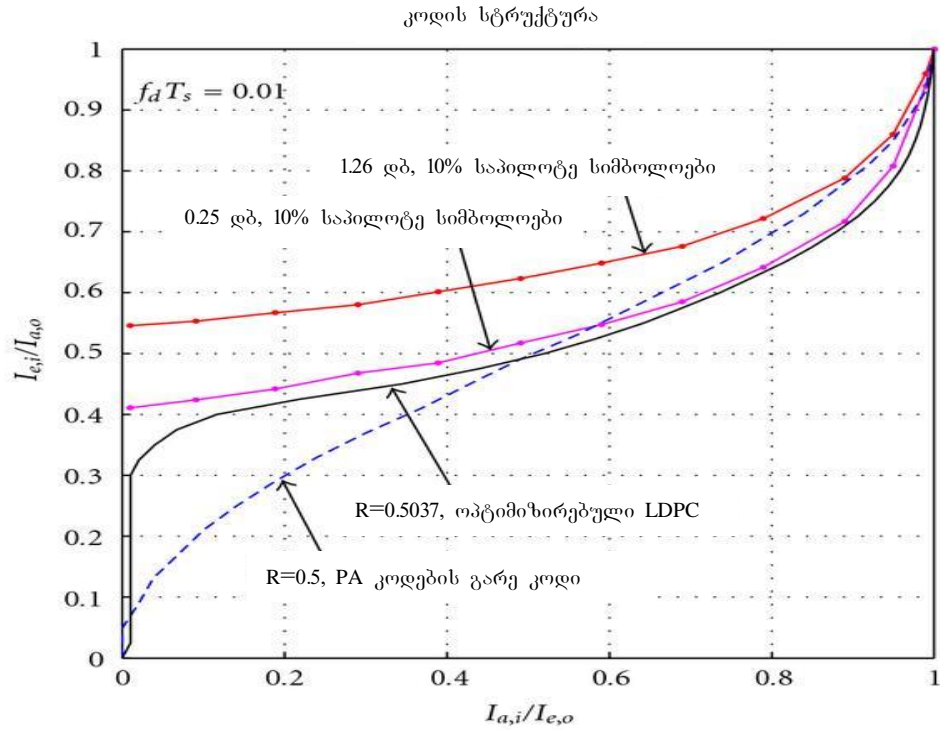
ხარისხის მანვენებლისათვის. საშუალო სიჩქარეებისათვის (დაახლოებით 0,5-ის ტოლი) ასევე არსებობს მაღალი ხარისხის ცვალებადი კვანძების დიდი რაოდენობა. იმის გათვალისწინებით, რომ PA-კოდის გარეთა კოდს აქვს მხოლოდ პირველი და მეორე ხარისხის ცვალებადი კვანძები  $\lambda(x) = (1-R)/(1+R) + (2R/(1+R))x$ , სადაც  $R \geq 1/2$  კოდის სიჩქარეა, სამართლიანი იქნება იმის თქმა, რომ PA (თითქმის) ოპტიმალურია მაღალ სიჩქარეებზე, მაგრამ ნაკლებად ოპტიმალურია საშუალო სიჩქარეებზე. ოპტიმიზირებული LDPC ჯგუფი შეიცავს ხარისხის სხვაგვარ განაწილებას PA-კოდთან შედარებით. ეს სხვაობა ძალიან მცირეა ასიმპტოტურ ზღურბლებში ან სასრული სიგრძის საიმიტაციო მოდელებში, რაც კარგად აისახება დიაგრამებზე. თუ სიჩქარე 3/4-ის ტოლია (იხ. ნახ. 9), მაშინ PA-კოდის გარეთა კოდსა და შიდა დიფერენციალურ კოდს შორის მოქცეული არე ძალიან პატარაა, რაც არ იძლევა სიჩქარის გაუმჯობესების შესაძლებლობას. შედარებისათვის, თუ სიჩქარე დაახლოებით 0,5-ია (ნახ. 11), მაშინ არე გაცილებით დიდი ხდება, რაც მიანიშნებს იმაზე, რომ ოპტიმიზირებულ გარეთა კოდს შეუძლია მიაღწიოს ინფორმაციის გადაცემის უფრო დიდ სიჩქარეს იმავე SNR ზღურბლისთვის.

განხილულია შიდა დიფერენციალური კოდი, რომელიც მუშაობს 0,25 დბ-ზე  $f_g T_s = 0.01$  რელეის მიღევად არხში და რომელიც დეკოდირებულია არაკოჰერენტული IDDD მიმღების (რესივერის) მეშვეობით საპილოტე სიმბოლოების 10%-ის გამოყენებისას. ოპტიმიზირებულ LDPC ჯგუფს აქვს კოდური სიჩქარე  $R = 0.5037$  და ხარისხის მანვენებელი

$$\begin{aligned} \lambda(x) &= 0.0672 + 0.4599x + 0.0264x^8 + 0.0495x^9 \\ &\quad + 0.0720x^{10} + 0.0828x^{11} + 0.0855x^{12} \\ &\quad + 0.0807x^{13} + 0.0760x^{14}, \\ \rho(x) &= x^5. \end{aligned} \tag{5}$$

როგორც ჩანს, ორი EXIT მრუდი ძალიან კარგად შეესატყვისება ერთმანეთს. აქ შიდა EXIT მრუდი გაანგარიშებულია მონტე-კარლოს იმიტაციური მოდელირების მეშვეობით, სადაც თანმიმდევრობები აღებულია  $N = 10^6$  რაოდენობის ბიტების ბლოკში და სადაც

კომპენსირებულია საპილოტე სიმბოლოებით გამოწვეული სიმძლავრის გაუარესება.



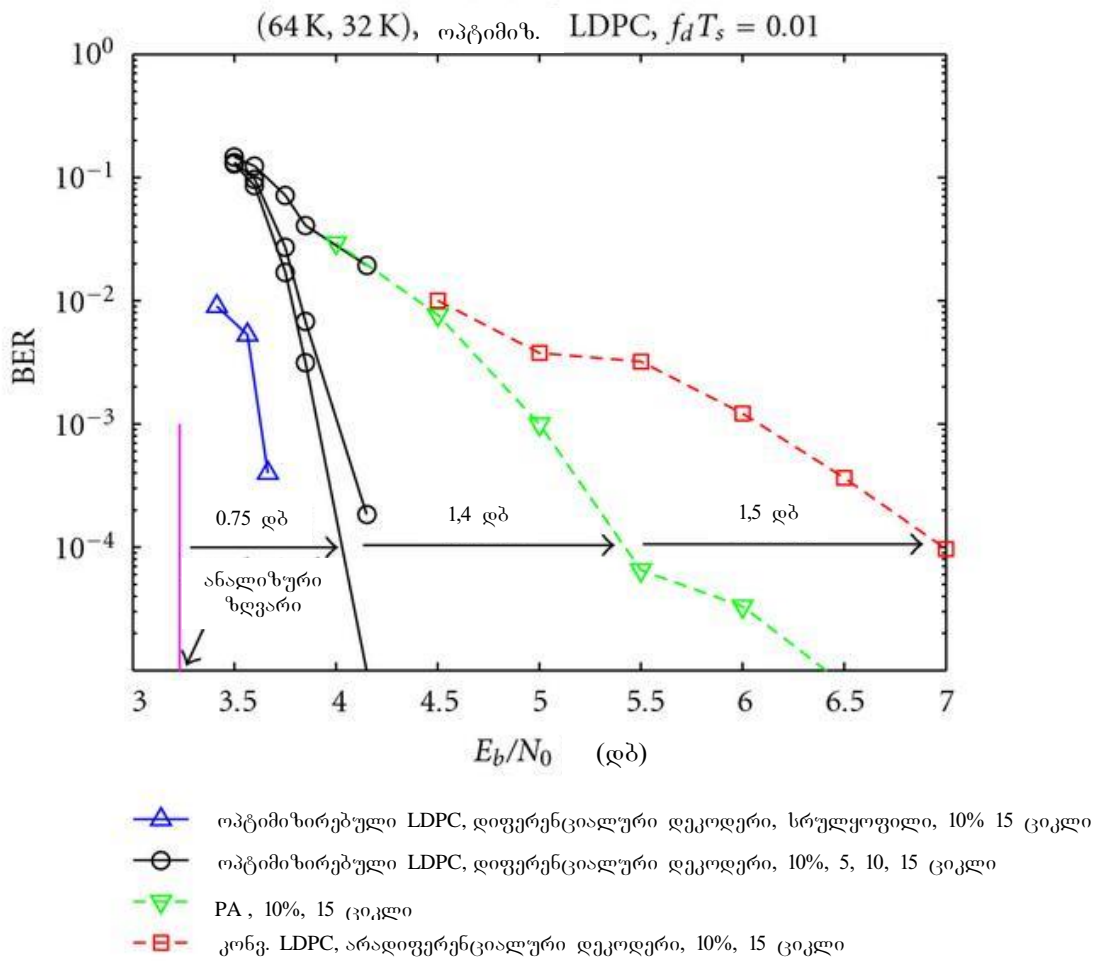
ნახ. 11. 0,5-ის ტოლი სიჩქარის ოპტიმიზაციის შედეგი

იტერაციული პროცესის კონვერგენციის წარმატებით შესასრულებლად ოპტიმიზირებულ LDPC ჯგუფს ასიმპტოტურად ჭირდება  $0.25 - 10 \log_{10}(0.5037) = 3.2283$  დბ 0,5 სიჩქარის მქონე PA-კოდთან შედარებით, რომელიც საჭიროებს  $1.26 - 10 \log_{10}(0.5) = 4.2703$  დბ-ს (იხ. ნახ. 11). ოპტიმიზირებული კოდების LDPC ჯგუფი 1,04 დბ-ით უკეთესია ასიმპტოტურად. თუმცა, იმ შემთხვევაში, როდესაც შიდა და გარეთა მრუდებს შორის სივრცე სულ უფრო ვიწრო ხდება, მაშინ შეტყობინებების გადამცემი დეკოდერი ნულის ტოლი შეცდომის მდგომარეობის მისაღწევად მოითხოვს უფრო მეტი რაოდენობის იტერაციებს. სიჩქარის მაქსიმალური ზღვარის მიღწევა ხდება გაანგარიშებების გაზრდილი სირთულისა და დამუშავების დროის ზრდის ფასად.

ოპტიმიზირებული კოდების LDPC ჯგუფი კარგია ასიმპტოტური გაგებით, ანუ, სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, კოდების უსასრულო ან ძალიან დიდი სიგრძისას. კონცენტრაციის წესის თანახმად, დიდი სიგრძეების შემთხვევაში, კოდების ყველა რეალიზაცია თავისი მახასიათებლებით ახლოსაა ერთმანეთთან და უკლებლივ ყველა უახლოვდება ერთმანეთს ასიმპტოტურ ზღურბლში მაშინ, როდესაც სიგრძე იზრდება შეზღუდვასთან ერთად. თუმცა, მოკლე სიგრძეებისას კონცენტრაციის წესი ირღვევა და მახასიათებლები შეიძლება გაცილებით შესამჩნევად იცვლებოდეს ერთი კოდის რეალიზაციიდან მეორე კოდის რეალიზაციამდე. კარგი რეალიზაცია იძლევა უფრო დიდ გარშემოწერილობას (კვეთის პერიმეტრს), რაც მიიღწევა ან მოკლე ციკლების ნაკლები რაოდენობით ან უფრო მცირერიცხოვანი წყვეტების ნაკრების კიდის პროგრესული ზრდის ალგორითმის მეშვეობით.

ნახ. 12-ზე იმიტირებულია ოპტიმიზირებული 0,5037 სიჩქარის მქონე LDPC-კოდი როგორც დიფერენციალური, ასევე არაკოჰერენტული დიფერენციალური კოდირების შემთხვევაში. რელეის არხი და შიდა დიფერენციალური დეკოდერი (IDDD რესივერი) იგივეა, რაც განხილულია ნახ. 11-ზე. შერჩეულია დიდი  $N=64\ 000$  სიგრძის კოდური სიტყვა, რათა ნათელი ყოფილიყო ის ფაქტი, თუ რამდენად კარგად შეესაბამება იმიტაციური მოდელირება ანალიზურ ზღურბლს. როგორც ცნობილია, იტერაციების დიდი რაოდენობა (მაგალითად, 100 იტერაცია) უმჯობესია კოდის სარგებლის სრული გამოყენებისათვის, მაგრამ, სირთულისა და პრაქტიკულ სისტემებში შესაძლებელი შეფერხებების გათვალისწინებით, წინამდებარე ნაშრომში მხოლოდ 15 იტერაციის მოდელირებაა აღწერილი. ნახ. 12-ზე ყველაზე მარცხნივ არსებული მრუდი შეესაბამება ოპტიმიზირებულ DE-LDPC კოდს იდეალური დეტექტირებისას საპილოტე სიმბოლოების 10%-ის შემთხვევაში. სწორედ ამ საპილოტე სიმბოლოებს მოიცავს განხილული კოჰერენტული დეტექტირების შემთხვევა, რათა გადაანაცვლოს (დააბალანსოს) მრუდი და შესაძლებელი იყოს სწორი შედარება ყველა სხვა არაკოჰერენტულად დეტექტირებულ მრუდთან,

რომლებიც მოიცავენ საპილოტე სიმბოლოების 10%-ს. იდეალური დეტექტირების მრუდის მარჯვენა ნაწილში არსებული სამი წრიული მრუდი შეესაბამება იტერაციული დიფერენციალური დეტექტირების არაკოჰერენტულ მახასიათებლებს მე-5, მე-10, და მე-15 იტერაციებზე დეკოდირების გამოყენებისას.



ნახ. 12. სიმულაცია ოპტიმიზირებული 0,5037 სიჩქარის მქონე LDPC კოდის დიფერენციალური კოდირებით და არაკოჰერენტული დიფერენციალური კოდირებით

ნახ. 12-დან ჩანს, რომ ოპტიმიზირებული დიფერენციალურად კოდირებული LDPC-კოდის მახასიათებლები მხოლოდ 0,3 დბ-ით ნაკლებია კოდირებულ დეტექტირებასთან შედარებით, რაც საკმაოდ კარგი შედეგია.

გარდა ამისა, იმიტირებული მახასიათებლები მხოლოდ 0,75 დბ-ითაა შორს 3,23 დბ-ის შესაბამის ზემოთ განხილული ასიმპტოტური ზღურბლისაგან, რაც გვიჩვენებს თეორიული კვლევის მასალის შედეგების პრაქტიკულ შედეგებთან თანხვედრას.

შედარების მიზნით, ნახ. 12-ზე დატანილია PA-კოდისა და დიფერენციალური კოდირების გარეშე სტანდარტული LDPC-კოდის მახასიათებლებიც. ორივეს დაახლოებით 0,5-ის ტოლი კოდური სიჩქარე აქვს და ორივე არაკოჰერენტულადაა დეტექტირებული. როგორც ნახაზიდან ჩანს, PA-კოდი 15 დბ-ით უკეთეს მახასიათებლებს გვაძლევს, თუმცა ოპტიმიზირებული DE-LDPC კოდის მახასიათებლები დამატებით კიდევ 1,4 დბ-ით უკეთესია.

## სადისერტაციო ნაშრომის ძირითადი დასკვნები

1. ნაჩვენებია UMTS ქსელის აგების პრინციპები, მასში გამოყენებული არხების კოდური დაყოფის მეთოდი CDMA, მონაცემთა გადაცემის მომსახურების მიწოდების მოდელი 3G ქსელებში და მოყვანილია მათი ხარისხის ანალიზი.

2. აღწერილია ევროპული DVB-T სტანდარტის ციფრული ტელემაუწყებლობის გადამცემში სიგნალის ფორმირების პროცესი კომპიუტერული პროგრამის გამოყენებით.

3. განხილულია UMTS-ის ვიდეოსერვისებში გამოყენებული კოდირების სხვადასხვა სტანდარტები და მათი მოქმედების პრინციპები. ჩატარებულია კოდირების სიჩქარეების ანალიზი. გაანალიზებულია სტანდარტების სრულყოფის სამომავლო ტენდენციები.

4. დადგენილია დაბალი სიმკვრივის მქონე კოდების უპირატესობა. ნაჩვენებია, რომ კოდები ძალიან კარგია როგორც კოჰერენტული, ისე არაკოჰერენტული დეტექტირებისას.

5. ნახვენებია, რომ არა მარტო შესაძლებელია, არამედ ძალზედ ხელსაყრელიცაა LDPC-კოდების ოპტიმიზაცია დიფერენციალურ დეკოდერთან შესაბამისობაში მოსაყვანად.

6. დადასტურებულია, რომ კოპერენტული დეტექტირებისას LDPC-კოდების გამოყენება იძლევა სიგნალის დონის 2,9 დბ-ით უკეთეს მაჩვენებელს არაკოპერენტულ დეტექტირებასთან შედარებით.

7. დასაბუთებულია, რომ დიფერენციალური კოდირების შემთხვევაში არაკოპერენტულ დეტექტირებას მივყავართ არაკოპერენტულ დიფერენციალურ დეტექტირებამდე, ხოლო არადიფერენციალური კოდირების შემთხვევაში – მრავალი საპილოტე სიმბოლოების გამოყენების აუცილებლობამდე.

8. გამოვლენილია, რომ ოპტიმიზირება მიიღწევა შეკრებადობის შეზღუდვისა და სიმკვრივის ცვლილების მეთოდის მეშვეობით. შედეგად მიღებული ოპტიმიზირებული ხარისხის მაჩვენებლები უფრო არასტანდარტულია, ვინაიდან ისინი მოიცავენ პირველი და მეორე ხარისხის ცვალებად კვანძებს, რაც პირდაპირ კავშირშია სტანდარტული LDPC-კოდების შემთხვევასთან (ანუ კოპერენტულ დეტექტირებასთან), სადაც პირველი ხარისხის ცვალებადი კვანძები მიიჩნევა ძალზედ არასასურველად.

9. დადგენილია, რომ შემოთავაზებული მეთოდის ეფექტურობა დასტურდება იმით, რომ ოპტიმიზირებული DE-LDPC-კოდი იძლევა დამატებით 1,4 დბ-ითა და 2,9 დბ-ით უკეთეს შედეგს არსებულ PA- კოდსა და სტანდარტულ LDPC-კოდთან შედარებით იმ შემთხვევაში, როდესაც არაკოპერენტული დეტექტირებაა გამოყენებული.

10. ნახვენებია, რომ ნაშრომში დამუშავებული ოპტიმიზაციის პროცედურა გამოყენებადია, ვინაიდან იგი უზრუნველყოფს შესაბამისი მრუდის სასურველ ფორმას და მდებარეობას და, შესაბამისად, შეუძლია უზრუნველყოს LDPC-კოდის თავსებადობა პრაქტიკულად ნებისმიერ შემყვან-გამომყვან პროცესორთან ამ უკანასკნელის არასრულყოფილების სრული გათვალისწინებით.

10. დადგენილია, რომ LDPC-კოდები მაინც უზრუნველყოფენ სასურველ შედეგებს დიფერენციალური კოდირებისას და ნებისმიერი სხვა რეკურსიული შიდა კოდისა და მოდულაციის გამოყენებისას, თუმცა ამ შემთხვევაში აიგოს ხარისხის მაჩვენებლები.

### **დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულ ნაშრომთა სია:**

1. ბ. წიკლაური, ჯ. ხუნწარია. LDPC კოდები. ჟურნალი “განათლება”, №2(8), 2013, გვ. 190-193.
2. ბ. წიკლაური, ჯ. ხუნწარია. სიმპლავრის რეგულირება UMTS სისტემაში. ჟურნალი “განათლება”, №2(8), 2013, გვ. 193-196.
3. ბ. წიკლაური. მესამე თაობის მობილური კავშირის სისტემა UMTS. ჟურნალი “ინტელექტუალი”, №23, 2013, გვ. 270-273.

*ავტორის პირადი წვლილი.* გამოკვლევების თეორიული და პრაქტიკული შედეგები, ასევე მათგან გამომდინარე დასკვნები და რეკომენდაციები მიღებულია ავტორის მიერ სამეცნიერო ხელმძღვანელთან ერთად.



## Abstract

At the present time there is an evolutionary change of generations in 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.

Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) gradually prevail wireless communications customers. OFDM can provide data transfer with great frequency. Many specialized research centers working in a team and for OFDM optimization because of the growing number of consumers. This paper presents the thesis topic "Signal transmission by Infotelecommunication network handling and investigation of the mechanism improvement of quality indicators and using adaptive coding methods" around the theoretical and experimental research results. The urgency of the work outlined in the introduction to the thesis, a brief overview of some of the issues under study, formulated goals and objectives, key provisions.

In the first chapter is given the third generation communication systems, network architecture and the basic principles of their construction.

In the second chapter according to the scheme described details of the OFDM signal transmission.

In the third chapter described OFDM receiver and simulated in computer software Matlab. OFDM receiver design is free, that's why researches and innovations are used in the receiver.



The fourth section describes the standards, their operation principles and future trends which are used by videocervices in UMTS.

The fifth and sixth chapters of the studies that show that the LDPC codes are very convenient to use and gives good results when compared to other coding methods.

Discussing all problems raised during future development of the telecommunication as well as for discussing of those means which enable us to eliminate existing or further problems raised in connection with reviewed in indicators. All these are bases for telecommunication's development.