

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

გიორგი თაბუაშვილი

კოდური კოოპერაციის სისტემების შემუშავება და
გამოკვლევა

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი

2013 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი
ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: ტმდ, სრული პროფესორი სერგო შავგულიძე

რეცენზენტები: 1. -----
2. -----

დაცვა შედგება ----- წლის ”-----” -----, ----- საათზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და
ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის
სხდომაზე, კორპუსი VIII, აუდიტორია -----

მისამართი: 0175, თბილისი, კოსტავას 77.

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

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი

/ გ. ხელიძე /

ნ ა შ რ ო მ ი ს ზ ო გ ა დ ი დ ა ხ ა ს ი ა თ ე ბ ა

თემის აქტუალობა. იგი განპირობებულია რამოდენიმე ფაქტორით. ბოლო წლებში მობილურ ქსელებში ზოგადად ტრაფიკი და განსაკუთრებით მონაცემთა გადაცემა გაზრდილია მნიშვნელოვნად და ასევე მოსალოდნელია მისი შემდგომი კიდევ უფრო მკვეთრი ზრდა. რადგან სიხშირული ზოლი არის ამოწურვადი ბუნებრივი რესურსი, საჭიროა სპექტრალურად კიდევ უფრო ეფექტური სისტემების შემუშავება. სხვა ფაქტორი განპირობებულია იმით, რომ მობილური ტერმინალები შეზღუდულია თავისი ზომებითა და სიმძლავრით. აქედან გამომდინარე, შეუძლებელია მობილური ტერმინალი აღიჭურვოს ერთზე მეტი ანტენით, რათა გამოვიყენოთ გადაცემის სივრცითი განცალკევება. მრავალტერმინალიან გარემოში კოდური კოოპერაცია საშუალებას იძლევა ერთანტენიანი მობილური ტერმინალის ანტენა გამოიყენოს სხვა ტერმინალმა, რითაც მიიღწევა ვირტუალური მრავალანტენიანი მრავალ შესასვლელიანი და მრავალ გამოსასვლელიანი (MIMO) ეფექტი და გადაცემის სივრცითი განცალკევება აღმავალი მიმართულებით.

სამუშაოს მიზანი. ბოლო ათი წლის განმავლობაში კოოპერაციული კომუნიკაციის მიმართულებით მკვლევარების მიერ შეიქმნა ნამუშევრები. ამ სამუშაოს მიზანი არის სხვა სამუშაოებთან შედარებით შევიმუშაოთ ახალი, უფრო მომგებიანი სისტემები ახალი სიგნალ-კოდური კონსტრუქციებისა და პროტოკოლების გამოყენებით, რათა გავზარდოთ ვირტუალური MIMO სისტემის სპექტრალური ეფექტურობა აღმავალი მიმართულებით; ასევე სამუშაოს მიზანია თეორიული შედეგების შემოწმება კომპიუტერული მოდელირების საშუალებით.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები. კვლევის ობიექტს წარმოადგენს აღმავალი არხით საბაზო სადგურის მიერ და ასევე სარელეო ტერმინალის მიერ მიღებული სიგნალ-ხმაურის შეფასება მობილური ტერმინალების კოოპერაციის სხვადასხვა სცენარის დროს. სადისერტაციო ნაშრომში დასმული

ამოცანების გადასაწყვეტად გამოყენებულია: ციფრული კავშირის, ხელშეშლამდგრადი კოდირების და ალბათობის თეორიები, ასევე კომპიუტერული მოდელირება (Matlab-ის და რადიოსიგნალის გავრცელების მოდელირების “NetPlan”-ის ინსტრუმენტის გამოყენებით).

ძირითადი შედეგები და მეცნიერული სიახლე. სადისერტაციო ნაშრომში ჩატარებული კვლევებისა და მიღებული შედეგების სამეცნიერო სიახლე მდგომარეობს შემდეგში:

1. კომუნიკაციის უსადენო ქსელებისათვის შემოთავაზებულია კოდური კოოპერაციის ახალი პროტოკოლი, სადაც შიდა კოდებათ გამოყენებულია ტერმინირებული ხვევადი კოდები. შემოთავაზებულ მეთოდში გამოყენებულია პერფორირებული ხვევადი კოდები და ფაზური მოდულაცია მინიმალური ძვრით (MSK). იგი გულისხმობს ორზე მეტი მობილური ტერმინალის ჩართულობას [1].

2. გამოკვლეულია შემოთავაზებული პერფორირებულ ხვევად კოდებზე დაფუძნებული კოდური კოოპერაციის მუშაობის მაჩვენებლები, საიდანაც ჩანს, რომ აღნიშნული სქემით მიღწეულია სრული სივრცითი განცალკევება მობილურ ტერმინალთა რიცხვთან მიმართებაში.

3. ლეინმანის და ვორნელის ნაშრომში წარმოდგენილი შედეგებისგან განსხვავებით [1]-ში ნაჩვენებია რომ, კოოპერირებული მობილური ტერმინალების რიცხვის ზრდასთან ერთად უმჯობესდება კოდური კოოპერაციის შემოთავაზებული სქემის მუშაობის მაჩვენებელი ყველა სიგნალ-ხმაურის თანაფარდობისათვის (SNR).

4. შემოთავაზებულია კოდური კოოპერაციის სქემა, რომელიც დაფუძნებულია განზოგადებულ კასკადირებულ ხვევად კოდებზე (GCCC) დანაწევრებული ქვეკოდების გამოყენებით და სისტემატური კოდირებით [2]. ახალი სქემა უზრუნველყოფს ორზე მეტ კოოპერაციულ მობილურ ტერმინალს და გამოიყენებს იტერაციულ მრავალკასკადურ დეკოდირებას.

5. გამოკვლეულია შემოთავაზებული ახალი GCCC-ის სქემის მუშაობის მახასიათებლები სიხშირეთა არაარჩევითი ნელი მიყუჩების არხისათვის. სიმულაციის შედეგებმა აჩვენა, რომ განზოგადებული კასკადირებული კოდური კონსტრუქციები უკეთესია ვიდრე ლიტერატურაში ადრე გამოქვეყნებული სერიულად კასკადირებული კოდური კონსტრუქციები. გაუმჯობესება მეღწეულია მთლიანი ბლოკის გაზრდილი სიგრძისათვის და ბიტზე მოსული შეცდომების (BER) დაბალი მნიშვნელობებისათვის ($BER \leq 10^{-3}$).

6. შემოთავაზებული კოოპერაციული განზოგადებული კასკადირებული კოდირების მიდგომები შეიძლება გამოყენებული იქნას MSK სქემებთან ერთად.

7. გამოკვლეულია სერიულად კასკადირებული კონსტრუქცია შიდა MSK-ით (SCMSK), გარე ხვევადი კოდით და მათ შორის შემუშავებული ინტერლივერით [3]. აღნიშნული სქემა შეიძლება გამოყენებული იქნას ციფრულ სისტემებში, სადაც კომუნიკაციის ლინკი შეზღუდულია სიმძლავრით ან/და სიხშირული ზოლით. შიდა MSK საშუალებას იძლევა პრაქტიკული ინტერესებიდან გამომდინარე ავაგოთ N ზომის ინტერლივერები. ამ კონსტრუქციაში MSK სიგნალის მუდმივი მომვლები ხდის შესაძლებელს გამოყენებული იქნას დაბალი ღირებულების გამაძლიერებლები.

8. სიმულაციის შედეგებით ნაჩვენებია, რომ სერიულად კასკადირებული MSK შემუშავებული ინტერლივერით იძლევა უკეთეს შედეგებს ბიტზე მოსული პრაქტიკულად ყველა შეცდომისას ვიდრე შემთხვევითი ინტერლივერის მქონე SCMSK და წნული კოდური MSK (WCMSK).

9. ნაშრომში განხილული SCMSK შემუშავებული ინტერლივერით გამოყენებულია განაწილებულ სერიულად კასკადირებულ კოდურ სქემაში და გამოყენებულია სარელეო არხებში კოოპერაციული სქემებისათვის.

10. გაკეთებულია კოდური კოოპერაციის ლინკის ბიუჯეტის ანგარიში და დათვლილია ფიქის მომსახურების მანძილი [4]. სიმულაციისას გამოყენებულია ფართოზოლოვანი მრავლობითი შედწევადობა კოდური

დაყოფით (WCDMA) მინი-მრავლობითი შეღწევადობით დროითი დაყოფის (TDMA) სცენარით მობილურ ტერმინალებს შორის.

11. ტრადიციული მეთოდის დროს, როგორც ხმოვანი ასევე მონაცემთა გადაცემის სერვისებისათვის სისტემა არის აღმავალი არხით შეზღუდული. კოოპერაციული სტრატეგიის განხორციელებისას სხვაობა დაღმავალ და აღმავალ მიმართულებებზე დანაკარგებს შორის მნიშვნელოვნად მცირდება და შესაბამისად ფიჭის მომსახურების მანძილი ორივე ტიპის სერვისისათვის მნიშვნელოვნად იზრდება.

12. ნაჩვენებია, რომ კოოპერაციის დროს, მობილური ტერმინალის გადაცემის სიმძლავრე საშუალოდ 4.7 დბ-ით ნაკლებია ტრადიციულთან შედარებით.

13. ასევე ნაჩვენებია, რომ მობილური ტერმინალების კოოპერაციის დროს, საბაზო სადგურის მიმღების მგრძნობიარობა იზრდება 1.7 დბ-ით, როგორც ხმოვანი ასევე მონაცემთა გადაცემის სერვისებისათვის.

ნაშრომის პრაქტიკული ღირებულება და შედეგების გამოყენების სფერო. დისერტაციაში კომპიუტერული სიმულაციით მიღებული შედეგები შეიძლება გამოყენებული იქნას 3GPP-ის, IEEE-ის ან სხვა საერთაშორისო ინსტიტუტის ან პროექტის მიერ მე-5 თაობის მობილური ქსელების პროექტირებისას.

პუბლიკაციები და სამუშაოს აპრობაცია. დისერტაციის ძირითადი შინაარსი წარმოდგენილია 5 ნაბეჭდ შრომაში. შედეგები მოხსენიებულია 2 საერთაშორისო კონფერენციაზე (თბილისი, სტუ, მაისი, 2012წ; International Conference on Information and Electronics Engineering, Singapore, October, 2012), სტუ-ს ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის 1-ლ და მე-2 თემატურ სემინარებზე (თბილისი, სტუ, 2011, 2012წწ).

დისერტაციის მოცულობა და სტრუქტურა. დისერტაცია მოიცავს 7 თავს, მათ შორის შესავალს, შესაბამისი ლიტერატურის მიმოხილვას, შედეგებს, მათ განსჯას, დასკვნას და გამოყენებული ლიტერატურის ჩამონათვალს. ნაშრომის

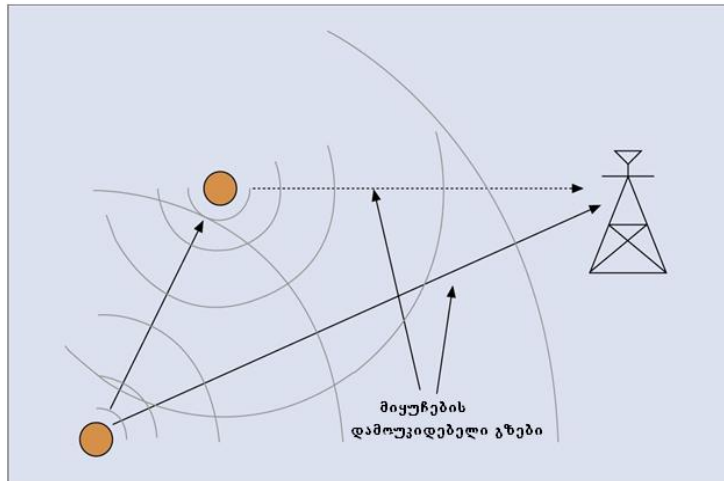
მთელი მოცულობა შეადგენს 108 გვერდს, მათ შორის 90 გვერდი ძირითადი ტექსტია 7 ცხრილით და 29 ნახაზით. გამოყენებული ლიტერატურის სია შეიცავს 57 დასახელებას.

ნ ა შ რ ო მ ი ს შ ი ნ ა ა რ ს ი

პირველი თავი წარმოადგენს შესავალს, სადაც დასაბუთებულია თემის აქტუალობა. იგი ეძღვნება ზოგადად კოოპერაციული კომუნიკაციის პრინციპის და იდეის აღწერას, მის მიზანშეწონილობას და მის წინა ისტორიას, რაც ზოგადად მკვლევარებს და მეც მათ შორის გვაძლევს ამ მიმართულებით შემდგომი კვლევებისა და მუშაობის მოტივაციას.

მობილური უსადენო არხი განიცდის მრავალგზიან მიყუჩებას, რომელიც იწვევს სიგნალის მნიშვნელოვან შესუსტებას. მიყუჩების საზიანო ეფექტის შერბილების კონცეფცია, რომელიც მდგომარეობს განცალკევებაში, მიმღებს უზრუნველყოფს ინფორმაციის გადამტანი სიგნალის მრავალი ვერსიის მიღებით. ამას მივყავართ სიგნალის მიყუჩების დამოუკიდებელ რეალიზაციისაკენ. სიგნალის მრავალი დამოუკიდებელი გზით გადაცემა მნიშვნელოვნად აუმჯობესებს მიმღების მიერ მიღებული სიგნალის დონესა და ხარისხს. გადაცემის სივრცითი განცალკევების ტრადიციული მეთოდი მდგომარეობს იმაში, რომ ცალკეული უსადენო ტერმინალი იყენებს რამდენიმე გადამცემ ანტენას, რომლებიც სივრცეში არიან განაწილებულნი. გადაცემის განცალკევება ცალსახად მომგებიანია და გამოიყენება სხვადასხვა სისტემებში, მაგალითად ფიჭური ქსელების საბაზო სადგურებში, მაგრამ ზოგიერთ შემთხვევაში მისი პრაქტიკული გამოყენება არის შეუძლებელი. მაგალითად, შეუძლებელია მობილური ტერმინალები აღიჭურვოს ერთზე მეტი ანტენით მისი ზომიდან და აპარატურული შეზღუდვებიდან გამომდინარე. კოოპერაციული კომუნიკაცია საშუალებას აძლევს ერთანტენიან მობილურ ტერმინალს მიიღოს MIMO სისტემის ეფექტის უპირატესობა. ძირითადი იდეა

იმაში მდგომარეობს, რომ მრავალმომხმარებლიან გარემოში ერთანტენიანი მობილური ტერმინალის ანტენა იყოს გამოყენებული სხვა ტერმინალის მიერ, რითაც მიიღწევა ვირტუალური მრავალანტენიანი ეფექტი, შესაბამისად მიიღწევა გადაცემის სივრცითი განცალკევება. იდეა წარმოდგენილია გამარტივებული სახით ნახ. 1-ზე.



ნახ. 1. კოოპერაციული კომუნიკაცია.

მიუხედავად იმისა, რომ კოოპერაციის იდეა არის ზოგადი, მობილური ტერმინალების სიმკვრივის ზრდიდან გამომდინარე უფრო მიზანშეწონილია და მომგებიანი მისი ფიჭური კომუნიკაციის სტრუქტურაში შემოტანა. სწორედ კოოპერაციის გამოყენებით ხერხდება მობილური ტერმინალების მომსახურების ხარისხის (QoS) გაუმჯობესება კოოპერაციული კომუნიკაციის უსადენო ქსელებში: ფიზიკურ დონეზე გაზომილი BER, ბლოკზე მოსული შეცდომის ალბათობა (BLER), მწყობრიდან გამოსვლის ალბათობა.

მეორე თავი ეძღვნება ამ მიმართულებით ზოგიერთი გამორჩეულად საინტერესო და ღირებული ნაშრომის მიმოხილვას. ორი მიზანი ჰქონდა ამას. პირველი, ის რომ ვიდრე დისერტაციაში იქნებოდა შემოთავაზებული კონკრეტული კოდური კოოპერაციის ახალი სქემები, ჩვენ მიმოვიხილეთ კოოპერაციის სამი ძირითადი მეთოდის ფუნდამენტური მიდგომა, მოვიყვანეთ მათი მუშაობის მაჩვენებლები და შევადარეთ ერთმანეთს, საიდანაც ჩანს, რომ

ზოგადად კოოპერაციის სამივე მეთოდი (გამლიერება და გადამისამართება, დეტექტირება და გადამისამართება, კოდური კოოპერაცია) აღმავალი მიმართულებით საშუალოდ იძლევა უკეთეს შედეგს, ვიდრე არაკოოპერაციული (ტრადიციული) მეთოდი, ასევე ნაჩვენებია, რომ კოდური კოოპერაცია არის უფრო მომგებიანი დანარჩენ ორ მეთოდთან შედარებით. მეორე მიზანი იყო ის, რომ ჩვენ შედარებით დაწვრილებით განვიხილეთ ლეინმანის და ვორნელის ნაშრომი, რასაც შემდგომში შევადარეთ ჩვენ მიერ შემოთავაზებული პერფორირებულ ხვევად კოდებზე დაფუძნებული კოდური კოოპერაციის მუშაობის შედეგები და ვაჩვენეთ შემოთავაზებული სქემის უპირატესობა.

გამლიერება და გადამისამართება კონცეფციულურად წარმოადგენს კოოპერაციის მარტივ მეთოდს. ამ მეთოდში ყოველი მობილური ტერმინალი იღებს პარტნიორის მიერ გადაცემული სიგნალის ხმაურიან ვერსიას, ამლიერებს მას და შემდეგ გადასცემს საბაზო სადგურს. ეს უკანასკნელი იღებს სიგნალს, როგორც მობილური ტერმინალიდან, ასევე მისი პარტნიორიდან და იღებს გადაწყვეტილებას გადაცემული სიმბოლოს შესახებ. ამ მეთოდში ერთ-ერთი სიგნალი აუცილებლად შეიცავს პარტნიორის მიერ მიღებულ და გამლიერებულ ხმაურიან სიგნალს, მაგრამ საბაზო სადგურს მაინც ეწოდება ორი სტატისტიკურად განსხვავებული მიყუჩებადი სიგნალის ვერსია და ამგვარად გადაცემული სიმბოლოს შესახებ იღებს უკეთეს გადაწყვეტილებას. პოტენციური გამოწვევა ამ სქემის განხორციელებისას ტექნოლოგიურად არ არის ტრივიალური, მიუხედავად ამისა გამლიერება და გადამისამართება არის მარტივი მეთოდი და არ იკავებს მნიშვნელოვან გამოთვლით დროს. იგი, როგორც კოოპერაციის მეთოდი, პირველად ლეინმანმა და ვორნელმა შეიმუშავეს. მათ ამ ნამუშევარში სიმბოლოების გამლიერებისა და გადაცემის შემთხვევისათვის (კოდირება-დეკოდირების გარეშე) დათვალეს BER და აჩვენეს, რომ შედეგები არის გაცილებით უკეთესი ვიდრე არაკოოპერაციის

შემთხვევისათვის. მათ ასევე ამ მეთოდისათვის დათვალეს მწყობრიდან გამოსვლის ალბათობა კვაზი-სტატისტიკურ რეილის მიყუჩების არხისათვის. ლეინმანმა და ვორნელმა აჩვენეს, რომ ამ მეთოდით მიიღწევა მეორე რიგის განცალკევება ორი ტერმინალისათვის.

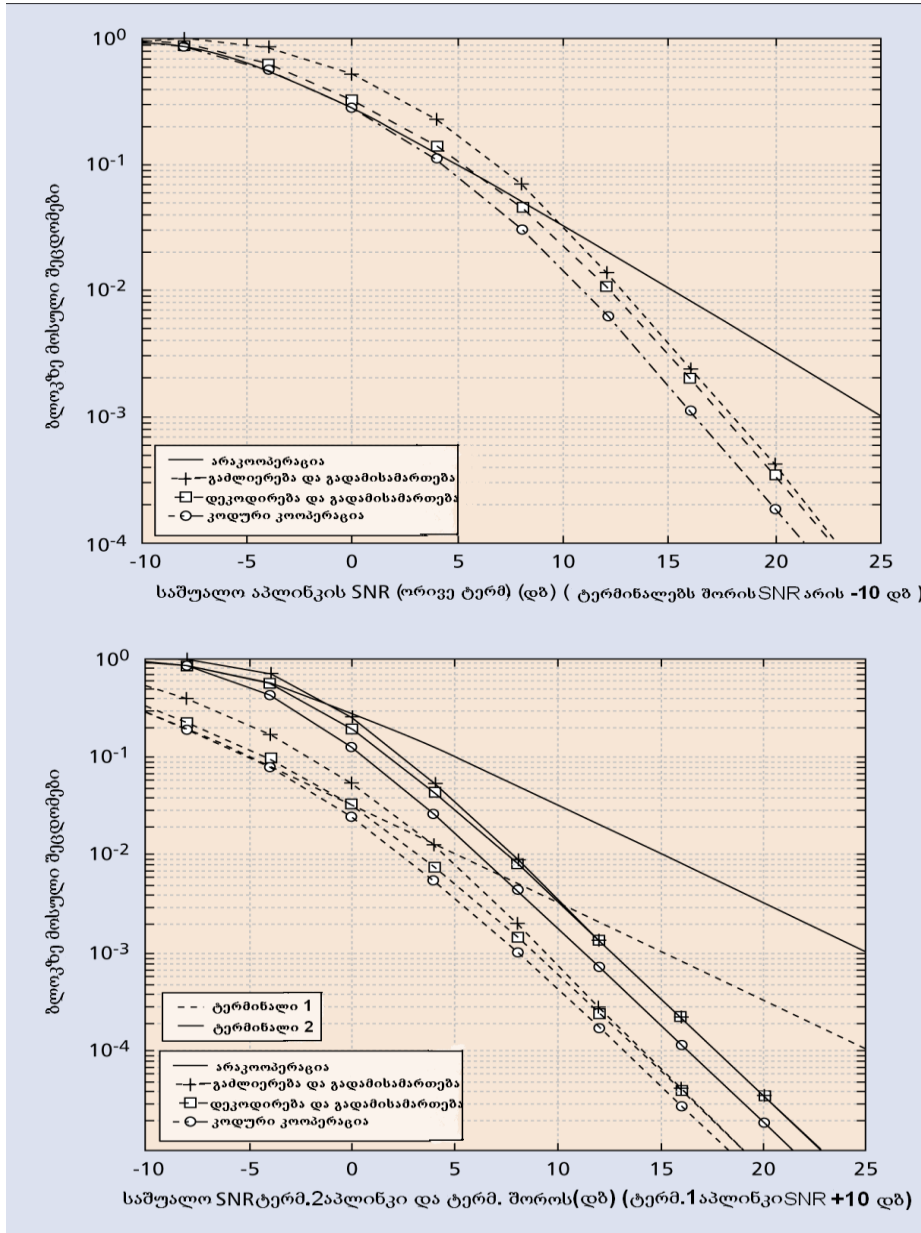
დეტექტირებისა და გადამისამართების მეთოდის შემთხვევაში მობილური ტერმინალი ცდილობს მოახდინოს პარტნიორის ბიტების დეტექტირება და შემდეგ გადაამისამართოს საბაზო სადგურისაკენ. დეტექტირებისა და გადამისამართების მეთოდის ერთ-ერთი კარგი მაგალითი არის სენდონარისის ნაშრომები, რომლებიც გამორჩეულია ამ მიმართულებით. ეს ნაშრომები წარმოადგენენ დეტექტირებისა და გადამისამართების მეთოდის ანალიზს, რომელიც იყენებს მრავლობით შეღწევადობას კოდური დაყოფით (CDMA). სიგნალის გადაცემის ამ მეთოდს აქვს სიმარტივისა და არხის პირობებისადმი ადაპტაციის უნარის უპირატესობა. მაგრამ ასევე უნდა აღინიშნოს რამდენიმე ნაკლი. პირველი: იმ შემთხვევაში თუ პარტნიორის ბიტები არ იყო დეტექტირებული სწორად, ამან შეიძლება საბაზო სადგურში ინფორმაციული ბიტების დეტექტირებისას უარესი შედეგი გამოიღოს. მეორე: საბაზო სადგურს ესაჭიროება ტერმინალებს შორის არხის შეცდომის ალბათობის შესახებ ინფორმაცია. შეცდომების გავრცელების არიდების მიზნით, ლეინმანმა შემოგვთავაზა ჰიბრიდული დეკოდირებისა და გადამისამართების მეთოდი. იგი მდგომარეობს შემდეგში: როდესაც არხი არის კარგი, ანუ აქვს მაღალი მყისიერი SNR, მობილური ტერმინალები ერთმანეთის სიგნალს იღებენ, ახდენენ დეტექტირებას და გადასცემენ პარტნიორს, ხოლო თუ არხი ცუდია, (დაბალი SNR შემთხვევაში), მაშინ ისინი გადადიან ტრადიციული არაკოოპერაციული მეთოდის რეჟიმში, რამაც გამოიღო კარგი შედეგი.

კოდური კოოპერაცია არის მეთოდი, რომელშიც გამოიყენება არხის კოდირება. ამ მეთოდში თითოეული მობილური ტერმინალის კოდური სიტყვის სხვადასხვა ნაწილი მიყუჩების სხვადასხვა გზით გადაიცემა. იდეის

არსი მდგომარეობს იმაში, რომ თითოეულმა მობილურმა ტერმინალმა პარტნიორს გადასცეს ჭარბი ინფორმაცია. როდესაც ეს შეუძლებელია, მაშინ პარტნიორები ავტომატურად გადადიან არაკოოპერაციულ რეჟიმში. ამ მეთოდში მთავარი ის არის, რომ კოდური კოოპერაცია არის ეფექტური, რადგანაც კოდური დიზაინი თავად უზრუნველყოფს ავტომატურ მართვას. მას არ სჭირდება ტერმინალებს შორის არხის შესახებ ინფორმაცია (უკუკავშირი). მობილური ტერმინალები ანაწევრებენ საკუთარ ინფორმაციას ბლოკებად, რომლებსაც ემატება ციკლური სიჭარბით შემოწმების (CRC) კოდი. კოდური კოოპერაციის დროს ხდება თითოეული მობილური ტერმინალის ინფორმაციის კოდურ სიტყვად გარდაქმნა, რომელიც ნაწილდება ორ სეგმენტად. თითოეული მათგანის სიგრძე არის N1 და N2 ბიტი შესაბამისად. ზოგადად, კოდური კოოპერაციის დროს შეიძლება იყოს გამოყენებული არხის კოდირების სხვადასხვა მეთოდი, მაგალითად ბლოკური ან ხვევადი კოდები, ან მათი კონბინაცია. კოდური ბიტები ორივე ფრეიმისათვის შეიძლება იყოს შერჩეული პერფორაციის ან გადამრავლებული კოდების საშუალებით.

ნახ. 2-ზე მრუდების სახით ნაჩვენებია კოოპერაციული კომუნიკაციის სიგნალების გადაცემის სამი ძირითადი მეთოდის ზემოთ მოყვანილი ავტორების ზოგიერთი შედეგი. ჰიბრიდული დეტექტირებისა და გადამისამართების მეთოდი იძლევა უკეთეს შედეგს ვიდრე არაჰიბრიდული და ამიტომ სწორედ ეს ვერსია მონაწილეობს ნახაზებზე მოცემულ შედეგებში. ექსპერიმენტებში გამოყენებულია ორობითი ფაზური მოდულაცია (BPSK) და მიმღები კოჰერენტული დეტექტირებით. საყურადღებოა ის, რომ გაძლიერებისა და გადამისამართებისაგან და ასევე დეკოდირებისა და გადამისამართებისაგან განსხვავებით კოდური კოოპერაციის მეთოდში ინტეგრირებულია არხის კოდირება, ასევე მასში გამოყენებულია სიჩქარეთავსებადი პერფორირებული ხვევადი კოდი (RCPC).

იმისათვის, რომ იმიტაციური მოდელირების შედეგები იყოს ობიექტური, კოოპერაციისა და არაკოოპერაციის ყველა მეთოდის შემთხვევისათვის მთლიანი კოდის სიჩქარე არის აღებული ერთნაირი $1/4$.



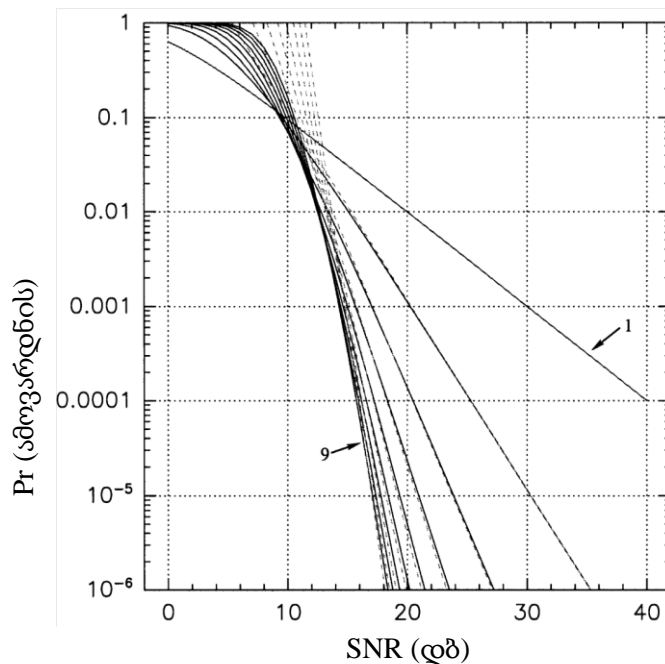
ნახ. 2. ლიტერატურიდან ცნობილი კოოპერაციის სხვადასხვა მეთოდის მუშაობის მაჩვენებლები.

ნახ. 2-ზე პირველი გრაფიკი შეესაბამება ექსპერიმენტს, როდესაც მობილური ტერმინალიდან საბაზო სადგურის მიმართულებით არხებს აქვთ ერთი და იგივე საშუალო SNR, და ამავდროულად ტერმინალებს შორის არხის

საშუალო SNR აღმავალი არხის SNR-ზე 10 დბ-ით ნაკლებია. მეორე გრაფიკი ასახავს შემთხვევას, როდესაც პირველი ტერმინალის აღმავალი არხის SNR 10 დბ-ით მეტია, ვიდრე მეორე ტერმინალის აღმავალი არხის SNR და ასევე 10 დბ-ით მეტია, ვიდრე ტერმინალებს შორის არხის SNR.

შედეგებიდან ჩანს კოდური კოოპერაციის დიდი უპირატესობა, რაც ზოგადად იძლევა ამ მიმართულებით შემდგომი მუშაობის საბაზს.

შემდეგ დისერტაციაში განხილულია ლეინმანის და ვორნელის ნაშრომი, სადაც მათ მიერ შემოთავაზებულია უსადენო ქსელებში კოოპერაციული განცალკევებისათვის გამოსაყენებელი განაწილებული სივრცითი-დროითი-კოდური პროტოკოლები. მათ განავითარეს და გაანალიზეს სივრცითი-დროითი-კოდური (STC) კოოპერაციის განცალკევების პროტოკოლი მრავალგზიანი მიყუჩების შესასუსტებლად უსადენო ქსელებში. პროტოკოლი გამოიყენებს განაწილებული ტერმინალების სივრცით განცალკევებას ისე, რომ ისინი ინფორმაციას გადასცემენ საბაზო სადგურს პირდაპირ და ერთმანეთის გავლით და შემდეგ საბაზო სადგური ახდენს მიყუჩების გასაშუალოებას იმ შემთხვევაშიც კი, როდესაც წინასწარ არ არის ცნობილი რომელი ტერმინალი არის ჩართული კოოპერაციაში. ნაშრომში გაანალიზებულია კოოპერაციული ქსელი, სადაც $1, 2, \dots, m$ ტერმინალი დებულობს მონაწილეობას. ანალიზი გაკეთებულია სამი მეთოდისათვის: გაძლიერება და გადამისამართება, დეკოდირება და გადამისამართება და STC კოოპერაციისათვის. აღებულია ნელი მიყუჩების არხი. ავტორებმა აჩვენეს შედეგები ორი ნახაზის სახით. პირველი არის გამეორებაზე დაფუძნებული კოოპერაციული მეთოდისათვის და მეორე, STC-ზე დაფუძნებული კოოპერაციული მეთოდისთვის იხილეთ ნახ. 3 საიდანაც ჩანს, რომ STC-ზე დაფუძნებულ კოოპერაციულ მეთოდს აშკარად უკეთესი მაჩვენებლები აქვს ვიდრე გამეორებაზე დაფუძნებულ კოოპერაციულ მეთოდს, მაგრამ m რიგის სრული განცალკევება STC-ის დროს მიიღწევა მხოლოდ როდესაც $R_{\text{norm}} < 1/(m + 1)$.



ნახ. 3. ლიტერატურიდან ცნობილი ამოვარდნის ალბათობის SNR-ზე დამოკიდებულება STC-ზე დაფუძნებული კოოპერაციული განცალკევებისათვის.

ამ უკანასკნელს გააჩნია ის ნაკლი, რომ ზოგადად მხოლოდ ორ ანტენიანი მატრიცა არის სრულყოფილი, ანუ როდესაც კოდური სიჩქარე ტოლია ერთის. ასევე ის, რომ ამ პროტოკოლის განხორციელებისათვის საჭიროა მობილური ტერმინალების ბლოკური და სიმბოლური სინქრონიზაცია, რაც წარმოადგენს პრაქტიკული თვალსაზრისით სირთულეს.

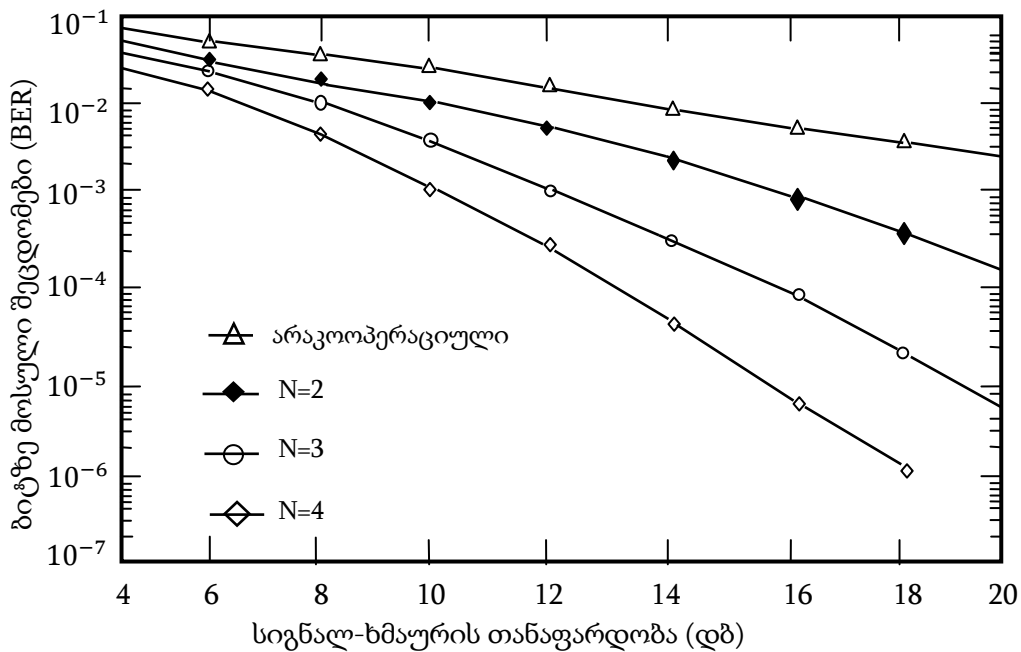
მესამე თავი ორგანიზებულია შემდეგნაირად: 3.1 ქვეთავში მოკლედ არის განხილული ფუნდამენტალური მასალა უწყვეტი ფაზის მქონე სიხშირული მოდულაციის შესახებ (CPFSK), რაც გამოყენებულია სისტემურ მოდელში (ასევე გამოყენებულია მე-5 თავში). 3.2 ქვეთავში ჩვენ აღწერთ სისტემურ მოდელს. 3.3 ქვეთავში ჩვენ შემოგვაქვს კოდური კოოპერაციის ახალი სქემა და ვაკეთებთ პროტოკოლის აღწერას. 3.4 ქვეთავში კომპიუტერული მოდელირების საფუძველზე ვაკეთებთ ჩვენ მიერ შემოთავაზებული სქემის მუშაობის ხარისხის ანალიზს და განვიხილავთ შედეგებს. და ბოლოს, 3.5 ქვეთავში ვაკეთებულია ზოგიერთი დასკვნა.

ამ თავში ჩვენ მიერ შემოთავაზებულია კოდური კოოპერაციის მოდერნიზებული მეთოდი პერფორირებული ხვევადი კოდების გამოყენებით. შემოთავაზებულია კოდური კოოპერაციის ახალი პროტოკოლი ტელეკომუნიკაციის უსადენო ქსელებისათვის. ქსელის ხარისხის გასაუმჯობესებლად გავაკეთეთ შემოთავაზებული პროტოკოლის შესაძლებლობების დემონსტრირება და შიდა კოდების მაგალითად გამოვიყენეთ ტერმინირებული ხვევადი კოდები. შემოთავაზებულ მეთოდში გამოყენებულია MSK მოდულაცია. სქემა გულისხმობს კოოპერაციაში ორზე მეტი ტერმინალის ჩართულობას. შემოთავაზებული სქემის კვლევა გაკეთებულია სიხშირეთა არაარჩევითი ნელი მიყუჩების მქონე არხისათვის. ახალ სქემაში, იმის გამო რომ, თითოეული მობილური ტერმინალის ფრეიმი იგზავნება გადაცემის პირველ ფაზაში და მასთან დაკავშირებული ზოგიერთი ჭარბი ბიტი იგზავნება დამოუკიდებელი მიყუჩების არხებით გადაცემის მეორე ფაზაში, მიღწეულია სრული განცალკევება. მიუხედავად მაღალი კოდური სიჩქარისა და დაბალი კოოპერაციის დონისა, მოდელირების შედეგები აჩვენებს, რომ ახალი პროტოკოლი, ლიტერატურაში ცნობილი ნაშრომისგან განსხვავებით, უზრუნველყოფს სრულ სივრცით განცალკევებას კოოპერაციული ტერმინალების რიცხვთან მიმართებაში. ასევე ნაჩვენებია, რომ ადრე წარმოდგენილი შედეგებისგან განსხვავებით, კოდური კოოპერაციის შემოთავაზებული სქემის მუშაობის მაჩვენებელი უმჯობესდება ყველა SNR-თვის კოოპერირებული ტერმინალების რიცხვის ზრდასთან ერთად.

ჩვენ მიერ შემოთავაზებული კოოპერაციული სქემის მუშაობის შესაფასებლად წარმოდგენილია კომპიუტერული მოდელირების შედეგები. არხის კოდირებისათვის ჩვენ ვიყენებთ სხვადასხვა სიჩქარის მქონე სისტემატიურ პერფორირებულ ხვევად კოდს. პირველი მოდელირებისას ჩვენ გამოვიკვლიეთ შემოთავაზებული პროტოკოლის განცალკევების რიგითობა კოოპერაციულ ქსელში 2, 3 და 4 ტერმინალისათვის. სიმარტივისათვის

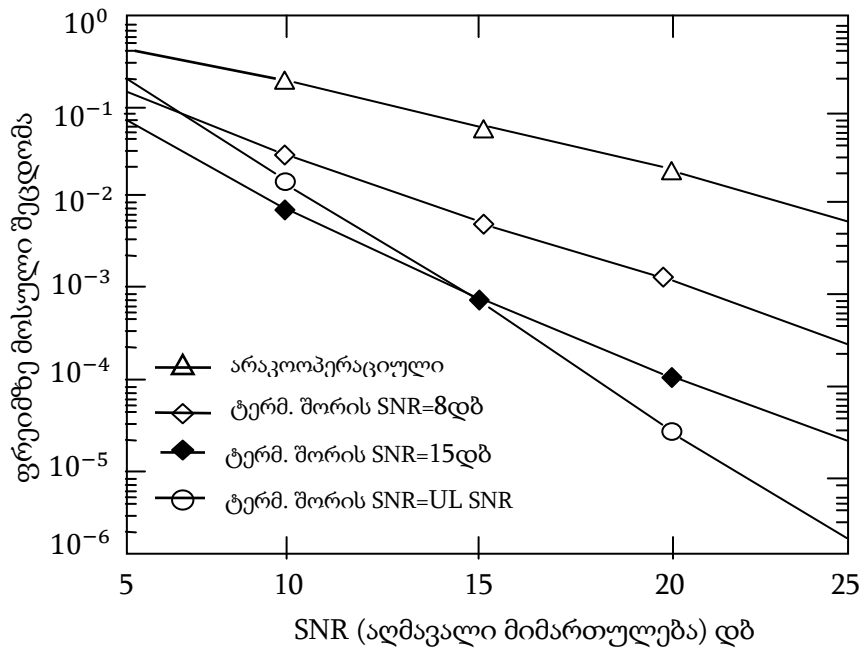
ჩავთვალეთ, რომ აღმავალი და ტერმინალებს შორის არხების ბიტზე მოსული საშუალო SNR არის ერთმანეთის ტოლი.

ნახ. 4-ზე ნაჩვენებია ბიტზე მოსული შეცდომების SNR-ზე დამოკიდებულება. გამოყენებული ხვევადი კოდი არის კიმის მიერ გამოქვეყნებული პერფორირებული კოდი სიჩქარით 1/2-15/16. მაღალი SNR-ის დროს BER მაჩვენებელი პროპორციულია $1/\text{SNR}^L$, სადაც $L=2,3,4$, $N=2,3,4$ კოოპერაციული ტერმინალისათვის. შედარებისათვის ჩვენ ასევე ჩავრთეთ მრუდი არაკოოპერაციული ქსელისათვის. ლიტერატურაში ცნობილი შედეგებისგან განსხვავებით ნახ. 4-დან ჩანს, რომ კოოპერირებული ტერმინალების რიცხვის ზრდასთან ერთად მუშაობის მაჩვენებელი უმჯობესდება ყველა SNR-თვის. ყველა სიმულაციისას კოოპერაციის კოდური სიჩქარე არის 0.81 და 0.89 შორის.



ნახ. 4. BER-ის დამოკიდებულება აღმავალის არხის საშუალო SNR-ზე არაკოოპერაციული და კოოპერაციული ქსელებისათვის 2, 3 და 4 ტერმინალისთვის.

ზუსტი შედარებისათვის ჩვენ უნდა გავითვალისწინოთ კოდური სიჩქარე და წარმოვადგინოთ BER-ის დამოკიდებულება SNR-ზე საინფორმაციო ბიტთან მიმართებაში და არა არხის SNR-თან მიმართებაში. ამ მოსაზრებიდან გამომდინარე უპრიანია, რომ დავძრათ კოოპერაციის ამსახველი მრუდები SNR ღერძზე მარცხნივ $10\log_{10}(\frac{1}{r})$ დბ-ით. ნახ. 4-ზე მოყვანილი მაგალითისათვის, სადაც გამოყენებულია კოოპერაციის კოდური სიჩქარე 0.81 და 0.89, ჩვენ უნდა დავძრათ მრუდები მარცხნივ 0.9 და 0.5 დბ-ით შესაბამისად. უკეთესი შედეგების მისაღწევად საჭიროა უფრო მძლავრი სისტემატიური პერფორირებული ხვევადი კოდების გამოყენება უფრო მაღალი კოოპერაციის დონის საფასურად.



ნახ. 5. ტერმინალებს შორის სხვადასხვა არხისათვის ფრეიმზე მოსული შეცდომების დამოკიდებულება აღმავალი არხის საშუალო სიგნალ-ხმაურის თანაფარდობაზე.

ნახ. 5-ზე წარმოდგენილია ფრეიმების წაშლის მაჩვენებლის (FER) აღმავალი არხის SNR-ზე დამოკიდებულება ტერმინალებს შორის სხვადასხვა

არხისათვის სამი კოოპერირებული ტერმინალის შემთხვევაში, იმ პირობით, რომ ყველა ტერმინალს შორის არხის SNR არის თანაბარი. მოდელირებისას გამოყენებულია სისტემატიური პერფორირებული ხვევადი კოდი 9/10 სიჩქარით.

მეოთხე თავში ჩვენ განვიხილეთ კოდური კოოპერაციის სქემა, რომელიც დაფუძნებულია განზოგადებულ კასკადირებულ ხვევად კოდებზე (GCCC) დანაწევრებული ქვეკოდების გამოყენებით სისტემატიური კოდირებით. ახალი სქემა უზრუნველყოფს ორზე მეტ კოოპერაციულ მომხმარებელს და გამოიყენებს იტერაციულ მრავალკასკადურ დეკოდირებას. გამოკვლეულია შემოთავაზებული სქემის მუშაობის მახასიათებლები სიხშირეთა არაარჩევითი ნელი მიყუჩების არხისათვის. შეირჩა ოთხობითი ფაზური მოდულაცია (QPSK), როგორც მოდულაციის სქემა, რომელშიც თითოეულ ორთოგონალურ არხს გადააქვს ერთი დამოუკიდებელი კოდირებული ბიტი. ვთვლით, რომ მობილურ ტერმინალებს შორის არხი არის იდეალური და დამოუკიდებელი, ასევე ვთვლით, რომ კვაზი-სტატისტიკური მიყუჩება არის ისეთი, როდესაც არხები მუდმივია გადაცემის განმავლოვაში. შემოთავაზებული სტრატეგიის თვისებების უკეთესად წარმოსაჩენად, განხილულია ადაპტიური სისტემის სცენარი, სადაც ყველა ტერმინალისგან საბაზო სადგურში მიღებული SNR შენარჩუნებულია მუდმივი. ყველა ტერმინალისთვის შეირჩა 1/3 სიჩქარის მქონე სერიულად კასკადირებული ხვევადი კოდი (SCCC) 4 საფეხურიანი გარე კოდით და 4 საფეხურიანი შიდა კოდით, რომლებიც აღიწერებიან G_A და G_B კოდირების მატრიცებით შემდეგნაირად:

$$G_A = [1 + D + D^2 \quad 1 + D^2], \quad G_B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1+D^2}{1+D+D^2} \\ 0 & 1 & \frac{1+D}{1+D+D^2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

გარე კოდის თავისუფალი მანძილი არის 5, ხოლო შიდა კოდის თავისუფალი მანძილი არის 3.

ჩვენი GCCC სქემისათვის ჩვენ ვიყენებთ G_A კოდის (3x6) კოდირების მატრიცას (1)-დან,

$$G_{B^{(1)}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ D & D & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & D & D & D & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

შემდეგ, სისტემატური კოდირების მატრიცის მისაღებად დანაწევრების თითოეული საფეხურისათვის, ვახდენთ სკრემბლირებას

$$G_{B^{(1)}}^* = \begin{bmatrix} 1 + D^2 & 1 + D + D^2 & 0 & 1 & 0 & D \\ D^2 & D + D^2 & 0 & 0 & 1 & 1 + D \\ 1 + D + D^2 & 1 + D^2 & 1 & 0 & 0 & 1 + D \end{bmatrix}$$

ამ კონსტრუქციას მივყევართ ქვეკოდებისაკენ, რომლის პარამეტრებია:

$$B^{(1)}(n_B = 6, k_B^{(1)} = 3, d_B^{(1)} = 5) \supset B^{(2)}(n_B = 6, k_B^{(2)} = 2, d_B^{(2)} = 6) \supset B^{(3)}(n_B = 6, k_B^{(3)} = 1, d_B^{(3)} = 8).$$

ჩვენ ვიყენებთ ხვევად კოდს შემდეგი კოდირების მატრიცით:

$$G_{A^{(1)}} = [1 + D^2 \quad 1 + D + D^2 \quad 1 + D + D^2]$$

პარამეტრებით $R_A^{(1)} = \frac{1}{3}$ და $d_A^{(1)} = 8$, როგორც პირველ გარე კოდს $A^{(1)}$.

დანარჩენი გარე კოდები $A^{(2)}$ და $A^{(3)}$ არის პერფორირებული კოდები შემდეგი

პარამეტრებით: $R_A^{(2)} = \frac{3}{4}$, $d_A^{(2)} = 3$; $R_A^{(3)} = \frac{13}{14}$, $d_A^{(3)} = 2$ შესაბამისად, რომლებიც

წარმოშობილია (1)-ის G_A -ით შექმნილი ხვევადი კოდისაგან. ამას მივყევართ

GCCC-ის დაახლოებით იგივე სრულ სიჩქარემდე $R_{\text{GCCC}} \approx 0.335$, რაც ლოს და

ლიტიფის ნაშრომში განხილული SCCC-ის სიჩქარე 1/3.

შეფასება გაკეთებულია კომპიუტერული მოდელირების საფუძველზე.

იმისათვის, რომ შედეგები ყოფილიყო ლიტერატურიდან ზემოთ მოყვანილ

ნაშრომთან სადარი, ჩვენ გამოვიყენეთ განზოგადებული კასკადირებული

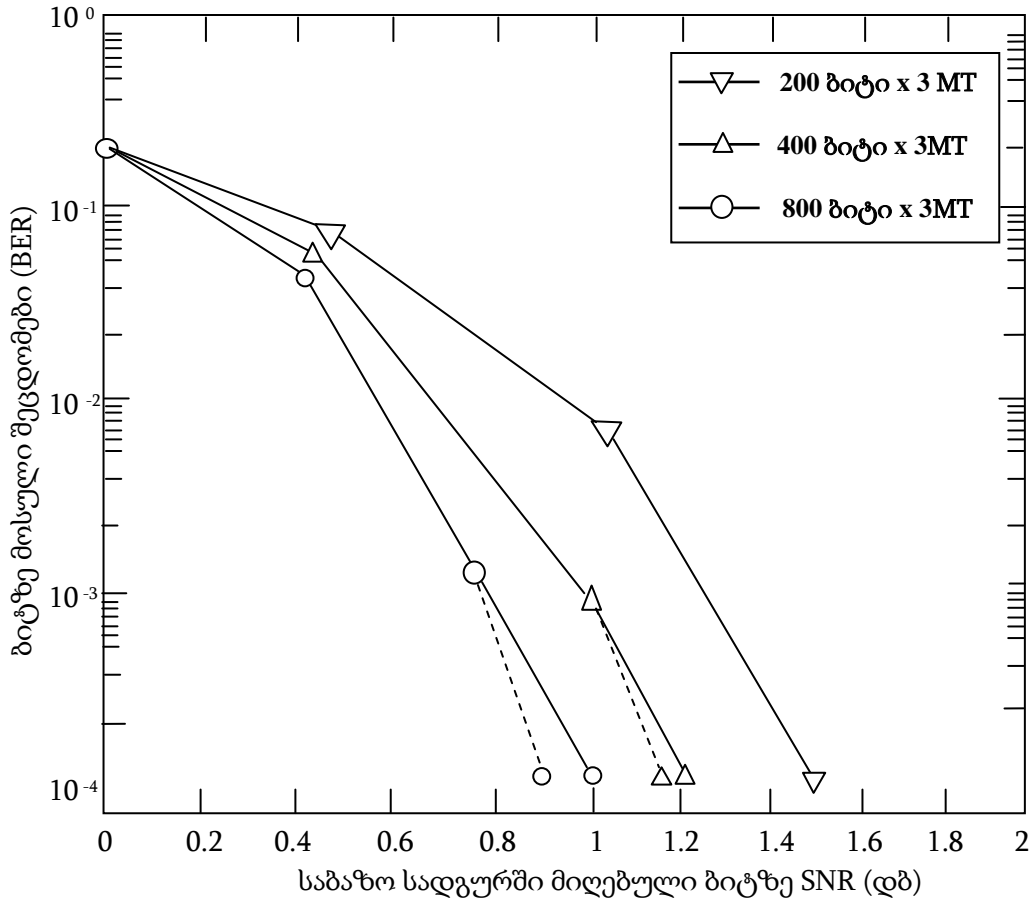
დეკოდირება 6 იტერაციით (3 ჰორიზონტალური და 2 ვერტიკალური). ნახ. 6-

ზე წარმოდგენილია კომპიუტერული მოდელირების შედეგები მთლიანი

ბლოკის სხვადასხვა ზომის შემთხვევისათვის, რაც მეტყველებს იმაზე, რომ

განზოგადებული კასკადირებული კოდური კონსტრუქციები უკეთესია ვიდრე

ლიტერატურიდან სერიულად კასკადირებული კოდური კონსტრუქციები. გაუმჯობესება მიღწეულია მთლიანი ბლოკის გაზრდილი სიგრძისათვის და BER-ის დაბალი სიდიდებისათვის ($BER \leq 10^{-3}$). შემოთავაზებული კოოპერაციული განზოგადებული კასკადირებული კოდირების მიდგომები შეიძლება გამოყენებული იქნას MSK სქემებთან ერთად.



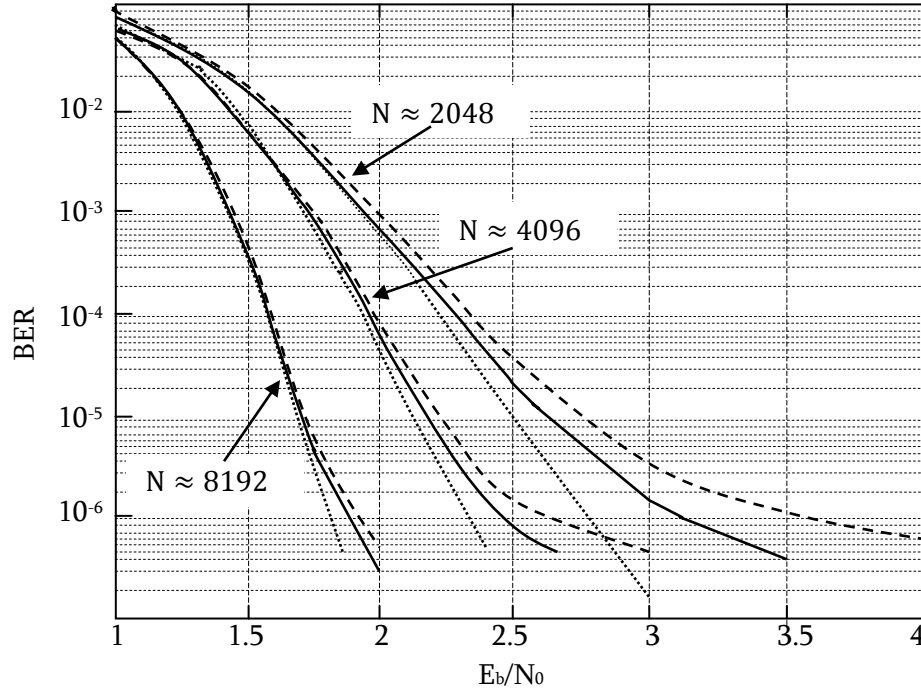
ნახ. 6. შემოთავაზებული GCCC სქემის (წყვეტილი ხაზი) და ლიტერატურიდან SCCC სქემის (უწყვეტი ხაზი) მუშაობის მაჩვენებლები 3 კოოპერაციული ტერმინალისთვის და 6 იტერაციით.

მეხუთე თავში გამოკვლეულია სერიულად კასკადირებული კონსტრუქცია შიდა MSK-ით, გარე ხვევადი კოდით და მათ შორის შემუშავებული ინტერლივერით. ეს სქემა შეიძლება იყოს საინტერესო და მიმზიდველი ციფრული სისტემებისათვის, სადაც კომუნიკაციის ლინკი შეზღუდულია, როგორც სიმძლავრით, ასევე სიხშირული ზოლით სადაც MSK სიგნალის

მუდმივი მომვლები შესაძლებელს ხდის გამოყენებული იქნას დაბალი ღირებულების გამაძლიერებლები. MSK დაფუძნებულია ფაზის უწყვეტობაზე შემოტანილი მეხსიერების ხარჯზე, ამის გამო მიიღწევა სიხშირული ზოლის ეფექტურობა. შიდა MSK საშუალებას გვაძლევს პრაქტიკული ინტერესებიდან გამომდინარე ავაგოთ N ზომის ინტერლივერები. SCMSK-ში ჩვენ გამოვიყენეთ შემუშავებული ინტერლივერი და დავინახეთ მნიშვნელოვანი მოგება შემთხვევითი ინტერლივერის მქონე SCMSK-თან და WCMSK-თან შედარებით, ბიტზე მოსული პრაქტიკულად ყველა შეცდომისას. შემდეგ განხილული SCMSK არის გამოყენებული განაწილებულ სერიულად კასკადირებულ კოდურ სქემაში და გამოყენებულია სარელეო არხებში. შემოთავაზებული ტექნიკა იძლევა განცალკევებისა და კოდური მოგებების კომბინაციას. ასევე, გამოყენებულია მარტივი შემადგენელი კოდები, კოდური მოგება შესამჩნევია იმიტომ, რომ გვაქვს სარელეო ტერმინალში ინტერლივერისა და საბაზო სადგურში იტერაციული დეკოდირების კომბინაცია.

SCMSK-თვის, ჩვენ ავაგეთ შემდეგი ინტერლივერები: $N = 8192$ და $(\Delta = 8, \gamma = 9)$, $N = 4096$ და $(\Delta = 7, \gamma = 8)$, $N = 2048$ და $(\Delta = 5, \gamma = 7)$. ჩვენ ვზრდით Δ -ს და γ -ს იმდენად, რამდენადაც დიზაინი იძლევა ამის საშუალებას, რადგან მანძილის სპექტრის თვალსაზრისით იგი იძლევა უფრო უკეთეს შედეგს ვიდრე $(\Delta = 5, \gamma = 6)$. ჩვენ ვიყენებთ ადიტიური, თეთრი, გაუსის ხმაურის (AWGN) არხს, N_0 სიმძლავრის ცალმხრივი სპექტრალური სიმკვრივით და იტერაციულ მიმდებს. ნახ. 7-ზე ნაჩვენებია სიმულაციის შედეგები მრუდების სახით, რომელიც ასახავს ბიტზე მოსული შეცდომების E_b/N_0 -ზე დამოკიდებულებას, სადაც E_b არის ენერგია ერთ საინფორმაციო ბიტზე. $N \approx 2048$ -სთვის, იტერაციების რიცხვი არის 7, $N \approx 4096$ -სთვის იგი არის 8, $N \approx 8192$ -სთვის კი - 11. ჩვენ ვადრით სისტემებს BER-ის 10^{-6} მნიშვნელობისათვის. $N \approx 2048$ -სთვის SCMSK შემუშავებული ინტერლივერით 0.4 dB-ით უკეთესად მუშაობს ვიდრე WCMSK

და 0.9 dB-ით უკეთესად მუშაობს ვიდრე SCMSK შემთხვევითი ინტერლივერით.



ნახ. 7. სიმულაციის შედეგები: SCMSK შემუშავებული ინტერლივერით (წერტილებიანი მრუდი), WCMSK (უწყვეტი მრუდი), SCMSK შემთხვევითი ინტერლივერით (წყვეტილი მრუდი).

ამ მოგების მიზეზი არის შემუშავებული ინტერლივერის გაზრდილი ნორმალიზებული კვადრატული თავისუფალი ევკლიდური მანძილი (NSFED). ჩვენ ვღებულობთ $D_{free}^D \geq 10$, როდესაც გვაქვს მხოლოდ $D_{free}^W \geq 6$ და $D_{free}^R \geq 3$. ინტერლივერის ზომის გაზრდასთან ერთად მოგება მცირდება იმიტომ, რომ გაზრდილი NSFED აუმჯობესებს მუშაობის მაჩვენებლებს მხოლოდ შეცდომების ქვედა ზღვართან. ხოლო, ინტერლივერის ზომის გაზრდით, შეცდომების ქვედა ზღვარი ჩამოდის ქვემოთ, ბიტზე მოსული ნაკლები შეცდომებისაკენ.

მეექვსე თავი ეძღვნება კოდური კოოპერაციის ლინკის ბიუჯეტის ანგარიშს სადაც ასევე დათვლილია ფიჭის მომსახურების მანძილი. ამისათვის

გამოყენებულია WCDMA რადიოშეღწევადობის ტექნოლოგია მინი-TDMA სცენარით მობილურ ტერმინალებს შორის. მოდელირებისათვის შერჩეულია 3/3.5 თაობის სერვისებისათვის ოპერატორების მიერ ყველაზე გავრცელებული სიხშირული ზოლები 2110-2170 მჰც და 1920-1980 მჰც დადმავალი და აღმავალი მიმართულებებისათვის შესაბამისად. დათვლილია ლინკის ბიუჯეტი (ტერმინალსა და საბაზო სადგურს შორის) არსებული მე-3 თაობის მობილური სისტემებისათვის. ამისათვის გამოყენებულია ტრადიციული ტელეკომუნიკაციების უნივერსალური მობილური სისტემის (UMTS) პოპულარული პარამეტრები, რაც ყველაზე ხშირად გამოიყენება ოპერატორების მიერ, გაკეთებულია ზოგიერთი დაშვებები და შემავალი პარამეტრების სახით ჩამოყალიბებულია მე-6 თავში. კოოპერაციული და არაკოოპერაციული ლინკის ბიუჯეტის ობიექტური შედარების მიზნით ყველა შემავალი პარამეტრი რჩება უცვლელი, გარდა იმისა, რომლებიც იცვლებიან მობილური ტერმინალების კოოპერაციის შემოტანით. ლინკის ბიუჯეტი ყველა ანგარიშებში დათვლილია ორივე მიმართულებით (დადმავალი და აღმავალი) და ორი სახის სერვისისათვის: ხმოვანი 12.2 კბწ და მონაცემთა გადაცემის 384კბწ სერვისებისათვის, განხილულია უარესი შემთხვევა, როდესაც ტერმინალები იმყოფებიან ფიჭის კიდეზე და შენობების შიგნით. ანგარიშები გაკეთებულია სამი ტიპის ურბანიზაციისათვის (ურბანიზებული, საშუალოდ ურბანიზებული და სოფლის ტიპის დასახლებისათვის). შედეგები არაკოოპერაციული შემთხვევისათვის მოყვანილია ცხრილის სახით, საიდანაც ჩანს, რომ ლინკის ბიუჯეტი არ არის ბალანსირებული და შეზღუდულია აღმავალი მიმართულებით ორივე ტიპის სერვისისათვის. შემდეგ დათვლილია ლინკის ბიუჯეტი მობილურ ტერმინალებს შორის კოოპერაციული შემთხვევისათვის იგივე სერვისებისათვის. ამისათვის გაკეთებულია რამოდენიმე პარამეტრის მოდიფიკაცია, რაც სპეციფიკურია ამ შემთხვევისათვის და შედეგები (სიგნალის გავრცელების გზაზე მასს).

დანაკარგი) მოყვანილია ნაშრომში ცხრილის სახით. შემდეგ კოოპერაციული შემთხვევისათვის შეფასებულია მობილურ ტერმინალსა და საბაზო სადგურს შორის ლინკის ბიუჯეტის. ამ შემთხვევაში მობილური ტერმინალის გადამცემის მახასიათებლები იგივეა რაც იყო ტერმინალს შორის ლინკის სცენარისთვის. საბაზო სადგურის გადამცემის მახასიათებლებიც რჩება იგივე რაც არაკოოპერაციული შემთხვევისათვის. მობილური ტერმინალის მიმღების მახასიათებლებიც დადმავალი მიმართულებით იგივე რჩება რაც არაკოოპერაციულ შემთხვევაში. საბაზო სადგურის მიმღების ზოგიერთი პარამეტრი არის შეცვლილი იმის გამო, რომ აღმავალი მიმართულებით გვაქვს გადაცემის ვირტუალური განცალკევება. მთავარი განსხვავება ტრადიციულსა და კოოპერაციულ ლინკებს შორის არის გაუმჯობესებული E_b/N_0 . შედეგები ასევე მოცემულია ცხრილის სახით. შემდეგ, გავრცელების გზაზე სიგნალის გამოთვლილი დანაკარგის მანძილში გარდასაქმნელად გამოყენებულია გავრცელების ორი მოდელი: მოტოროლას “Xlos” და ერიქსონის სიგნალის შენობებში გავრცელების მოდელი. შედეგები მოყვანილია ცხრილ 1-ში.

ცხრილი 1.

ფიქსის მომსახურების მანძილი ტრადიციული და კოოპერაციული მეთოდისათვის

		ტრადიციული მეთოდი		კოოპერაციული მეთოდი		ერთეული	გაუმჯობესება (%)	
		ხმა 12.2 კბწ	მონაც. 384 კბწ	ხმა 12.2 კბწ	მონაც. 384 კბწ		ხმა 12.2 კბწ	მონაც. 384 კბწ
ურბანში- რეზიდენციული არეალი	DL მანძილი	0.82	0.9	0.82	0.9	კმ		
	UL მანძილი	0.56	0.32	0.8	0.53	კმ		
	ფიქსის მოქმედების მანძილი	0.56	0.32	0.8	0.53	კმ	42.9	65.6
სამულოდ- ურბანში- არეალი	DL მანძილი	1.8	1.9	1.8	1.9	კმ		
	UL მანძილი	1.23	0.82	1.69	1.12	კმ		
	ფიქსის მოქმედების მანძილი	1.23	0.82	1.69	1.12	კმ	37.4	36.6
სოფლის ტიპის არეალი	DL მანძილი	4.9	5.3	4.9	5.3	კმ		
	UL მანძილი	3.3	2.25	4.6	3.1	კმ		
	ფიქსის მოქმედების მანძილი	3.3	2.25	4.6	3.1	კმ	39.4	37.8

ცხრილიდან ჩანს, რომ კოოპერაციული სტრატეგიის განხორციელებისას სხვაობა დანაკარგებს შორის სხვადასხვა მიმართულებებზე მნიშვნელოვნად შემცირებულია და შესაბამისად ფიჭის მომსახურების მანძილი ორივე ტიპის სერვისისათვის მნიშვნელოვნად არის გაზრდილი. ხოლო მობილურ ტერმინალებს შორის ლინკისათვის მანძილის ქვედა და ზედა ზღვრებია: ხმოვანი 12.2 კბწ სერვისისათვის 60 მ და 88 მ შესაბამისად, მონაცემთა 384 კბწ გადაცემის სერვისისათვის 57 მ და 84 მ შესაბამისად.

ნ ა შ რ ო მ ი ს ძ ი რ ი თ ა დ ი დ ა ს კ ვ ნ ე ბ ი

პირველი თავი წარმოადგენს შესავალ ნაწილს და ეძღვნება ზოგადად კოოპერაციული კომუნიკაციის პრინციპის და იდეის აღწერას, მის მიზანშეწონილობას და მის წინა ისტორიას, რაც ზოგადად მკვლევარებს და მეც მათ შორის გვაძლევს შემდგომი კვლევებისა და მუშაობის მოტივაციას ამ მიმართულებით.

მე-2 თავი ეძღვნება ამ მიმართულებით ზოგიერთი გამორჩეულად საინტერესო და ღირებული ნაშრომის მიმოხილვას. ორი მიზანი ჰქონდა ამას. პირველი, ის რომ ვიდრე დისერტაციაში იქნებოდა შემოთავაზებული კონკრეტული კოდური კოოპერაციის ახალი სქემები, ჩვენ მიმოვიხილეთ კოოპერაციის სამი ძირითადი მეთოდის ფუნდამენტური მიდგომა, მოვიყვანეთ მათი მუშაობის მაჩვენებლები და შევადარეთ ერთმანეთს, საიდანაც ჩანს, რომ ზოგადად კოოპერაციის სამივე მეთოდი (გაძლიერება და გადამისამართება, დეტექტირება და გადამისამართება, კოდური კოოპერაცია) აღმაჯალი მიმართულებით საშუალოდ იძლევა უკეთეს შედეგს, ვიდრე არაკოოპერაციული (ტრადიციული) მეთოდი, ასევე ნაჩვენებია რომ კოდური კოოპერაცია არის უფრო მომგებიანი დანარჩენ ორ მეთოდთან შედარებით. მეორე მიზანი იყო ის რომ, ჩვენ შედარებით დაწვრილებით განვიხილეთ ლეინმანის და ვორნელის ნაშრომი, რასაც შემდგომში შევადარეთ ჩვენ მიერ

შემოთავაზებული პერფორირებულ ხვევად კოდებზე დაფუძნებული კოდური კოოპერაციის მუშაობის შედეგები და ვაჩვენეთ შემოთავაზებული სქემის უპირატესობა.

მე-3 თავში შემოთავაზებულია კოდური კოოპერაციის მოდერნიზებული მეთოდი პერფორირებული ხვევადი კოდების გამოყენებით [1]. შემოთავაზებულია კოდური კოოპერაციის ახალი პროტოკოლი ტელეკომუნიკაციის უსადენო ქსელებისათვის. ქსელის ხარისხის გასაუმჯობესებლად გავაკეთეთ შემოთავაზებული პროტოკოლის შესაძლებლობების დემონსტრირება და შიდა კოდების მაგალითად გამოვიყენეთ ტერმინირებული ხვევადი კოდები. შემოთავაზებულ მეთოდში გამოყენებულია MSK მოდულაცია. სქემა გულისხმობს კოოპერაციაში ორზე მეტი ტერმინალის ჩართულობას. შემოთავაზებული სქემის კვლევა გაკეთებულია სიხშირეთა არაარჩევითი ნელი მიყუჩების მქონე არხისათვის. ახალ სქემაში, იმის გამო რომ, თითოეული მობილური ტერმინალის ფრეიმი იგზავნება გადაცემის პირველ ფაზაში და მასთან დაკავშირებული ზოგიერთი ჭარბი ბიტი იგზავნება გადაცემის მეორე ფაზაში დამოუკიდებელი მიყუჩების არხებით, მიღწეულია სრული განცალკევება. მიუხედავად მაღალი კოდური სიჩქარისა და დაბალი კოოპერაციის დონისა, მოდელირების შედეგები აჩვენებს, რომ ახალი პროტოკოლი, განსხვავებით ადრე შემოთავაზებულისაგან, უზრუნველყოფს სრულ სივრცით განცალკევებას კოოპერაციული ტერმინალების რიცხვთან მიმართებაში. ლიტერატურაში ცნობილი შედეგებისგან განსხვავებით ნაჩვენებია რომ, კოდური კოოპერაციის შემოთავაზებული სქემის მუშაობის მაჩვენებელი უმჯობესდება ყველა SNR-თვის კოოპერირებული ტერმინალების რიცხვის ზრდასთან ერთად.

მე-4 თავში განხილულია კოდური კოოპერაციის სქემა, რომელიც დაფუძნებულია განზოგადებულ კასკადირებულ ხვევად კოდებზე (GCCC) დანაწევრებული ქვეკოდების გამოყენებით სისტემატური კოდირებით [2].

ახალი სქემა უზრუნველყოფს ორზე მეტ კოოპერაციულ მომხმარებელს და გამოიყენებს იტერაციულ მრავალკასკადურ დეკოდირებას. გამოკვლეულია შემოთავაზებული სქემის მუშაობის მახასიათებლები სიხშირეთა არაარჩევითი ნელი მიყუჩების არხისათვის. შეირჩა QPSK მოდულაცია, როგორც მოდულაციის სქემა, რომელშიც თითოეულ ორთოგონალურ არხს გადააქვს ერთი დამოუკიდებელი კოდირებული ბიტი. ვთვლით, რომ მობილურ ტერმინალებს შორის არხი არის იდეალური და დამოუკიდებელი. შეფასება გაკეთებულია კომპიუტერული მოდელირების საფუძველზე. იმისათვის რომ, შედეგები ყოფილიყო ლოს და ლიტიფის ნაშრომთან სადარი, გამოყენებულია განზოგადებული კასკადირებული დეკოდირება 6 იტერაციით (3 ჰორიზონტალური და 2 ვერტიკალური). ნაჩვენებია, რომ განზოგადებული კასკადირებული კოდური კონსტრუქციები უკეთესია ვიდრე ლიტერატურიდან სერიულად კასკადირებული კოდური კონსტრუქციები. გაუმჯობესება მეღწეულია მთლიანი ბლოკის გაზრდილი სიგრძისათვის და BER-ის მცირე მნიშვნელობებისათვის ($BER \leq 10^{-3}$). შემოთავაზებული კოოპერაციული განზოგადებული კასკადირებული კოდირების მიდგომები შეიძლება გამოყენებული იქნას MSK სქემებთან ერთად.

მე-5 თავში გამოკვლეულია სერიულად კასკადირებული კონსტრუქცია შიდა MSK-ით, გარე ხვევადი კოდით და მათ შორის შემუშავებული ინტერლივერით [3]. ეს სქემა შეიძლება იყოს საინტერესო და მიმზიდველი ციფრული სისტემებისათვის, სადაც კომუნიკაციის ლინკი შეზღუდულია, როგორც სიმძლავრით, ასევე სიხშირული ზოლით, სადაც MSK სიგნალის მუდმივი მომვლები შესაძლებელს ხდის გამოყენებული იქნას დაბალი ღირებულების გამაძლიერებლები. MSK დაფუძნებულია ფაზის უწყვეტობაზე შემოტანილი მეხსიერების ხარჯზე, ამის გამო მიიღწევა სიხშირული ზოლის ეფექტურობა. შიდა MSK საშუალებას გვაძლევს პრაქტიკული ინტერესებიდან გამომდინარე ავაგოთ N ზომის ინტერლივერები. SCMSK-ში ჩვენ გამოვიყენეთ

შემუშავებული ინტერლივერი და დავინახეთ მნიშვნელოვანი მოგება შემთხვევითი ინტერლივერის მქონე SCMSK-თან და WCMSK-თან შედარებით, ბიტზე მოსული პრაქტიკულად ყველა შეცდომისას. შემდეგ, განხილული SCMSK არის გამოყენებული განაწილებულ სერიულად კასკადირებულ კოდურ სქემაში და გამოყენებულია სარელო არხებში. შემოთავაზებული ტექნიკა იძლევა განცალკევებისა და კოდური მოგებების კომბინაციას. ასევე გამოყენებულია მარტივი შემადგენელი კოდები, კოდური მოგება შესამჩნევია იმიტომ, რომ გვაქვს სარელო ტერმინალში ინტერლივერისა და საბაზო სადგურში იტერაციული დეკოდირების კომბინაცია.

მე-6 თავში გაკეთებულია კოდური კოოპერაციის ლინკის ბიუჯეტის ანგარიში და დათვლილია ფიჭის მომსახურების მანძილი [5]. ამისათვის გამოვიყენეთ WCDMA რადიომულწევადობის ტექნოლოგია მინი-TDMA სცენარით მობილურ ტერმინალებს შორის. გავრცელების გზაზე სიგნალის გამოთვლილი დანაკარგის მანძილში გარდასაქმნელად ჩვენ გამოვიყენეთ გავრცელების ორი მოდელი: მოტოროლას “Xlos” და ერიქსონის სიგნალის შენობებში გავრცელების მოდელი.

კოოპერაციული სტრატეგია შეიძლება იქნას განხორციელებული ასევე სხვა რადიომულწევადობის ტექნოლოგიების გამოყენებით. არჩეული ტექნოლოგიის უპირატესობა მდგომარეობს იმაში, რომ კოოპერაციისათვის არ არის საჭირო დამატებითი სიხშირული ზოლი, ამისათვის ჩვენ გავყავით აღმავალი მიმართულებით გადაცემის დრო თანაბრად ტერმინალებს შორის, სანაცვლოდ გავზარდეთ მობილური ტერმინალის გადაცემის სრული სიმძლავრე ორჯერ, რაც საშუალოდ ტოლია სიხშირული დაყოფით დუპლექსირების (FDD) უწყვეტი გადაცემის დროს სიმძლავრისა (კომპრესირებული რეჟიმის ჩათვლით).

კოოპერაცია თხოულობს სასიგნალო ნაკადის დამატებით ზრდას. მაგალითად, საბაზო სადგურმა უნდა იცოდეს კოოპერაციას აქვს თუ არა

ადგილი, თუ კი, მაშინ ვის ბიტებს გადასცემს მობილური ტერმინალი. ამ ნამუშევარში ჩვენ ვუგულველყავით კოოპერაციით გამოწვეული სასიგნალო ნაკადის ზრდა, რადგან იგი უმნიშვნელოდ აქვეითებს მუშაობის მაჩვენებლებს.

ტრადიციული მეთოდის დროს, როგორც ხმოვანი ასევე მონაცემთა გადაცემის სერვისებისათვის სისტემა არის აღმავალი მიმართულებით შეზღუდული. კოოპერაციული სტრატეგიის განხორციელებისას სხვაობა დადმავალ და აღმავალ მიმართულებებზე დანაკარგებს შორის მნიშვნელოვნად მცირდება და შესაბამისად ფიჭის მომსახურების მანძილი ორივე ტიპის სერვისისათვის მნიშვნელოვნად იზრდება (ცხრილი 1).

ახალი სტრატეგიის შემოტანისას ჩვენ ფოკუსირებულები ვიყავით ფიჭის მომსახურების მანძილის ზრდაზე, მაგრამ კოოპერაცია იძლევა ასევე სხვა უპირატესობებს. მაგალითად, იმ შემთხვევაში, როდესაც მობილური ტერმინალი იმყოფება ფიჭის კიდეზე ახლო საბაზო სადგურთან, მიუხედავად მისი გადაცემის სიმძლავრის ორჯერ გაზრდისა (3 დბ-ით) გადაცემის დროის ნახევარში კოოპერაციის დროს, ტერმინალის გადაცემის სიმძლავრე საშუალოდ 4.7 დბ-ით ნაკლებია ტრადიციულთან შედარებით. შესაბამისად მობილურის აკუმულატორის მუშაობის ხანგრძლივობა იზრდება, ასევე ინტერფერენცია აღმავალი მიმართულებით კლებულობს. თუ ჩვენ შევადარებთ საბაზო სადგურის მიმღების მახასიათებლებს ტრადიციული და კოოპერაციული მეთოდებისას, დავინახავთ რომ მიმღების მგრძნობიარობა იზრდება 1.7 დბ-ით ორივე ტიპის სერვისისათვის. უნდა აღინიშნოს, რომ ამ თავში კოოპერაციული შემთხვევისათვის ნაჩვენები მოგებები იქნება მეტი თუკი: მობილურ ტერმინალებს შორის დანაკარგი იქნება ნაკლები, მაგალითად შენობებში მათ შორის მანძილი იქნება ნაკლები, ან მათ შორის იქნება მეტი მანძილი და ღია სივრცე, თუკი ზოგადად, ტერმინალებს შორის იქნება ნაკლებად შესუსტების მქონე ობიექტები.

დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებული
ნაშრომები

- [1] S. A. Shavgulidze, S. Sh. Barbakadze, A. V. Asanidze and G. O. Tabuashvili, “Coded Cooperation Based on Punctured Convolutional Codes”, Georgian Engineering News, 2010, vol. 55, no 3, pp. 25-30.
- [2] S. A. Shavgulidze, G. O. Tabuashvili, A. V. Asanidze and S. Sh. Barbakadze, “Generalized Cooperative Concatenated Coding”, Georgian Engineering News, 2011, vol. 58, no 2, pp. 5-11.
- [3] S. A. Shavgulidze, G. O. Tabuashvili, T. I. Mtvralashvili and S. Sh. Barbakadze, “Serially Concatenated Minimum Shift Keying and its Use in the Coding Scheme for the Relay Channel”, Georgian Engineering News, 2012, vol. 62, no 2, pp. 21-25.
- [4] S. A. Shavgulidze, G. O. Tabuashvili and G. J. Zakradze, “Link Budget in Cooperative Communication with WCDMA Implementation”, Georgian Engineering News, 2012, vol. 61, no 1, pp. 40-47.
- [5] G. Tabuashvili, “Link Budget Improvement of Cooperative Diversity with WCDMA Method Implementation”, International Journal of Information and Electronics Engineering, November 2012, vol. 2, no. 6, pp. 948-954.

ავტორის პირადი წვლილი. დისერტაციაში წარმოდგენილი ყველა შედეგი მიღებულია უშუალოდ ავტორის მიერ სამეცნიერო ხელმძღვანელთან და თანაავტორებთან ერთობლივი წვლილის აღნიშვნით.

A b s t r a c t

The conventional view of transmit diversity is that a single wireless terminal transmits using an array of antennas which are spatially located so that the paths from each antenna to the destination experience independent fading. Unfortunately, the

conventional transmit diversity methods are not applicable to many wireless systems because size, complexity, or other constraints preclude the use of multiple transmit antennas. Recently, cooperative transmission, where users take advantage of each other's resources for better overall performance, has been of growing interest. User cooperation provides uplink transmission diversity even when mobile units cannot accommodate multiple antennas because of size constraints. Recently, a versatile user cooperation method was introduced by researchers. In a multi-user environment, the cooperative communication allows single wireless devices to share their antennas during the transmission and to form a spatial diversity environment and virtual MIMO system.

The introduction explains the basic idea of cooperative communication and gives a brief overview of the development in this emerging field. Then some relevant literature is reviewed, where three basic methods of mobile cooperation in wireless networks are explained. The performances of the different methods have been compared and an advantage of coded cooperation over others has been shown. We are focused on the coded cooperation method and the J. N. Laneman's and G. W. Wornell's work is being analyzed in greater detail, because its performance results are compared to the performance of the coded cooperation based on punctured convolutional codes introduced in dissertation.

The new multiple partners coded cooperation scheme is investigated and proposed that achieves the full diversity order. The new scheme is based on punctured convolutional codes and Minimum Shift Keying (MSK) for wireless communications to obtain transmit diversity. The new scheme supports more than two cooperative users. We evaluated the performance of the proposed scheme in a frequency nonselective slow fading channel. Our performance evaluation is based on computer simulations. The results indicate that the new coded cooperation scheme can achieve a significant gain over the non-cooperative scheme and has an advantage over the existing work.

The coded cooperation scheme is considered based on generalized concatenated convolutional codes with systematic encoding of partitioned subcodes. The new scheme supports more than two cooperative users and utilizes iterative multistage decoding. We evaluated the performance of the proposed scheme in a frequency nonselective slow fading channel. Our performance evaluation is based on computer simulations. The results indicate that the new generalized concatenated coded cooperation scheme can achieve a gain over the ordinary serially concatenated coding scheme.

The serial concatenation of the outer convolutional code, designed interleaver and inner MSK is proposed as well. This system ensures better performance than the one with a random interleaver and woven coded MSK. The considered coded modulation technique is proposed for the relay channels and the simulation results are compared with the theoretical bound.

And finally, we touch upon the practical implementation challenge of the coded cooperation strategy in wireless networks. Recently a versatile user cooperation method called the coded cooperation diversity was introduced by researchers. This method involves a variety of channel-coding methods to implement the cooperation. Different radio access methods could be used for this implementation. In this dissertation, we calculate the link budget and cell radius for cooperative communication by using the WCDMA access method and mini-TDMA scenario between mobiles. The computation was performed for urban, medium-urban and residential areas based on computer simulation. Two propagation models: the Motorola Xlos and Ericsson's indoor propagation model were used for this purpose. The link budget calculation and simulation results show the advantage of cooperative communication, which prolongs the cell radius and improves the receiver sensitivity.