

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

სერგო კვერნაძე

ახალი რადიოტექნოლოგიების კვლევა შემდგომი თაობის
უსადენო კავშირის ქსელებში ნივთების ინტერნეტის
რეალიზების მიმართულებით

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ავტორეზეტი

სადოქტორო პროგრამა: ციფრული სატელეკომუნიკაციო ტექნოლოგიები

შიფრი: 0714

თბილისი

2021 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტში
ენერგეტიკისა და ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტი
ტელეკომუნიკაციის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: ასოც. პროფესორი შ. კვიციანი

რეცენზენტები:

დაცვა შედგება 2021 წლის "-----" -----, ----- საათზე
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ენერგეტიკისა და
ტელეკომუნიკაციის ფაკულტეტის სადისერტაციო საბჭოს კოლეგიის
სხდომაზე, კორპუსი VIII, აუდიტორია
მისამართი: 0166, თბილისი, კოსტავას 77.

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

სადისერტაციო საბჭოს მდივანი,
ასოცირებული პროფესორი

გ. გიგინეიშვილი

სამუშაოს ზოგადი დახასიათება

პრობლემის აქტუალობა. IoT_ი არ არის მიზნული რამე კონკრეტულ ტელეკომუნიკაციის პლათფორმაზე. მასში შეიძლება იყოს გამოყენებული ნებისმიერი სტანდარტიზებული და არასტანდარტიზებული მონაცემთა გადაცემის ტექნოლოგიები. მოწყობილობები ერთმანეთთან დაკავშირებულნი არიან გადაცემის კვანძებით. ამ კვანძების გამტანურიანობა გავლენას ახდენს საგნების ინტერნეტის მოწყობილობებზე და სენსორებზე. მე-5 და შემდგომი თაობის მობილური კავშირის ერთ-ერთ მიმართულებას წარმოადგენს საგნების ინტერნეტის ტექნიკური უზრუნველყოფა. ქსელის რადიოსისტემები უკვე დიდი ხანია რაც არსებობენ, მაგრამ აქამდე მათი ფუნქციები საკმაოდ განსაზღვრული და შეზღუდული იყო. მთელ პროცესებს ძირითადად მართავდა ცენტრალური მოწყობილობა. ჭკვიანი ნივთების შემოსვლის თანავე უკვე შესაძლოა მრავალ-მართვიანი სისტემების შედგენა, რაც მართალია გაზრდის მათ დატვირთვას - მაგრამ გაზრდის რადიორხების ეფექტურობას.

ფიზიკური კომპონენტები განიცდიან დეგრადირებას და ამასთან ერთად აპარატურის გაუმართაობის ალბათობა იზრდება. გაუმართავ აპარატს შეუძლია შექმნას მოულოდნელი მონაცემები პროგრამული უზრუნველყოფისთვის. თუ კოდი არ არის მოქნილი, შეიძლება გაიზარდოს პროგრამული უზრუნველყოფის შეცდომებიც. შესაბამისად საჭიროა, რომ მოწყობილობებს ჰქონდეთ კარგი ადაპტირების დონე.

დატვირთულ პერიოდებში, საბაზო სადგურებს შორის შექმნილი რადიოხმაურის გამო სიგნალების სიმძლავრის გაზრდის შემთხვევაში ხმაურის დონე მხოლოდ იზრდება. მეხუთე თაობის მობილური სისტემების გამტარუნარიანობა ძირითადად გაზრდილია ახალი რადიოსპექტრების ათვისების ხარჯზე. მეოთხე თაობასთან შედარებით რადიოშელწევის ტექნოლოგია დიდად არ შეცვლილა. სისტემის ტევადობა შეზღუდულია. დატვირთული საათების დროს სისტემის რესურსი გადანაწილებულია

მომხმარებლებს შორის და რაც უფრო მეტი მომხმარებელია და მოხმარებაა მით უფრო ნაკლებია თითოეულის გადაცემის სიჩქარე. ამ სისტემებში გამოყენებულია ფიქსირებული, შაბლონური ფუნქციები. ეს ფუნქციები ოპტიმალურია ძირითად შემთხვევებისთვის, თუმცა ერთი და იგივე ფუნქციების გამოყენება ყველა შემთხვევას ვერ მოერგება მაქსიმალური ეფექტურობით.

სამუშაოს მიზანი და კვლევის ამოცანები. ნაშრომის მიზანია გამოვიკვლიოთ, შევავსოთ, დავამუშაოთ და დავხვეწოთ რადიო ტექნოლოგიები ჭკვიანი ნივთების ინტერნეტის რეალიზების მიმართულებით. ვაპირებთ დავამუშავოთ რადიო-გადაცემის არსებული მეთოდები, გამოვიკვლიოთ და შევქმნათ ახალი ალგორითმები სპექტრული ეფექტურობის ასამაღლებლად. ასევე შევხებით საგნების ინტერნეტის ახალ ქსელებს, სტრუქტურებს, ადაპტურ მოდელებს და ტოპოლოგიებს.

კვლევის მეთოდოლოგია. ახალი რადიო ტექნოლოგიების და სიტემის შედგენისთვის ვიყენებთ GNU რადიოპლათფორმას. აქ, ალგორითმების შედგენის ძირითადი საშუალებებია C და Python პროგრამული ენები. ახალ მეთოდებს ვადარებთ არსებულ ტექნოლოგიებთან და ცხრილების ან გრაფიკების საშუალებით ვაკეთებთ მათ შეფასებას.

მეცნიერული სიახლე. მე-5 თავის უსადენო სისტემაში გამოიყენება სიგნალების დამუშავების ფიქსირებული ხერხები. ასეთი მეთოდები მუშაობენ განსაზღვრული ინსტრუქციების მიხედვით და არ აქვთ მაღალი ადაპტიური შესაძლებლობები. რადიო ტალღის ბუნება გარემოში ქაოსურია და მისი ზუსტი განსაზღვრა ყოველთვის გართულებულია. ეს განსაკუთრებით მართალია, როდესაც ერთ სისტემაში გვაქვს საქმე მრავალ სიგნალის მიმღებ-გადამცემთან. ჩვენი მიზანია რადიო ტექნოლოგიების დახვეწა, შემდეგი თავის რადიო ქსელისთვის ჭკვიანი ფუნქციონალის შემოტანით. ამის ხარჯზე უნდა გაიზარდოს სპექტრული ეფექტურობა, რამაც ხელი უნდა შეუწყოს საგნების ინტერნეტის ფართო რეალიზებას.

პრაქტიკული მნიშვნელობა:

- 1) მიღებული შედეგების მიხედვით შესაძლებელია არსებული და შემდეგი თაობის ქსელების გამტარუნარიანობის და ეფექტურობის გაზრდა.
- 2) კვლევის შედეგების რეალიზება შესაძლებელია პროგრამულად განსაზღვრული რადიოს საშუალებით.
- 3) ჩამოყალიბებულია სიგნალის დამუშავების ახალი მეთოდი, რომლის საშუალებით სიგნალების ოპტიმიზაციაც შესაძლებელი ხდება რადიოსისტემების ყველა საბაზო სადგურებზე ინდივიდუალურად.

სამუშაოს აპრობაცია. სადისერტაციო ნაშრომის თემატიკასთან დაკავშირებული საკითხები აპრობირებული იქნა: 1. „სტუდენტური IoT ჰაკათონი“ - პროექტის პრეზენტაცია და ჰაკათონში გამარჯვება (ეროვნული სამეცნიერო ბიბლიოთეკა და Internet Society – Georgia, 14 ოქტომბერი, 2018 წელი, თბილისი); 2. „სტუდენტთა 87-ე ღია საერთაშორისო სამეცნიერო კონფერენცია“ (საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, 28 მაისს, 2019 წელი, თბილისი); 3. „I საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია“ (საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, 7 –11 ოქტომბერი, 2019 წელი, თბილისი); 4. ბრიტანეთის საბჭოს „THE BIG IDEA CHALLENGE“ : უმაღლეს სასწავლებლებში სამეწარმეო უნარების განვითარების პროგრამა (საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის და კილის უნივერსიტეტის ერთობლივი პროექტი № EV16048P8P - №2181, მაისი. 2021 წელი, თბილისი); 5. I, II და III კოლოქვიუმები და წინასწარი დაცვა. გარდა ამისა დისერტაციის თემაზე გამოქვეყნებულია 4 სტატია.

დისერტაციის სტრუქტურა და მოცულობა. დისერტაცია შედგება შესავალისგან, სამი თავის, დასკვნისა და ლიტერატურის ნუსხისაგან. დისერტაციის საერთო მოცულობა შეადგენს 116 გვერდს, 15 ცხრილისა და 51 ნახაზის ჩათვლით.

სამუშაოს ძირითადი შინაარსი

I თავში. წარმოდგენილია საგნების ინტერნეტის აქტუალურ პრობლემები და მოყვანილია მათი გადაჭრის სავარაუდო გზები, როგორცა არის ახალი ქსელების და მეთოდების რეალიზაცია.

2019 წლის აპრილის მდგომარეობით, მსოფლიო მოსახლეობა, 7.7 მილიარდ ადამიანს მიაღწია. IPv4-ში დამისამართება ხდება 4 ბაიტით. მისამართების რაოდენობა შეგვიძლია დავთვალოთ შემდეგნაირად:

$$2^8 \times 2^8 \times 2^8 \times 2^8 = 4\,294\,967\,296$$

გამოდის, რომ 7.7 მილიარდ ადამიანზე მოდის მაქსიმუმ 4.3 მილიარდი მისამართი. ასევე მისამართების ნაწილი დარეზერვებულია ან გამოიყენება სხვა მიზნებისთვის. IPv6-ის შემთხვევაში დამისამართება გაზრდილია 16 ბაიტამდე და მისამართების რაოდენობა შესაბამისად შეგვიძლია დავთვალოთ შემდეგნაირად:

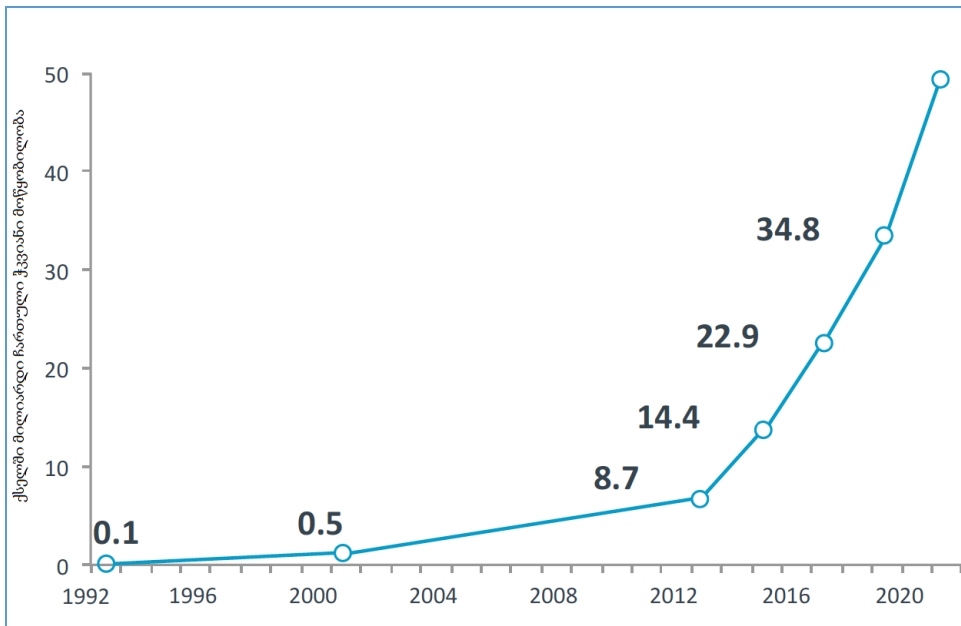
$$2^8 \times 2^8 \times 2^8 \times 2^8 \times 2^8 \times 2^8 \times 2^8 \times 2^8 \times 2^8 \times 2^8 \times 2^8 \times 2^8 \times 2^8 \times 2^8 \times 2^8 \times 2^8 \approx 3.4 \times 10^{38}$$

IPv6-ის პროტოკოლი გვამძლევს საშუალებას, რომ თითოეულ ადამიანს ჰქონდეს გამოყოფილი უნიკალური მისამართი და კიდე უფრო მეტი. ერთ ადამიანზე მოსული მისამართების რაოდენობა შეგვიძლია დავთვალოთ შემდეგნაირად:

$$(3.4 \times 10^{38}) / (7.7 \times 10^9) \approx 4.4 \times 10^{28}$$

შესაძლებელი ხდება, რომ ყველა ჩვენს ჭკვიან მოწყობილობებს ჰქონდეს თავისი საკუთარი მისამართი, რაც გაამარტივებს მოწყობილობის წვდომადობას ქსელთან. დაცულობის მხრივ, IPv6 პროტოკოლს აქვს ჩაშენებული IPsec პროტოკოლის მხარდაჭერა, რაც დაამატებს უსაფრთხოებას OSI მოდელის ქსელის დონეზე. 2015 წლისთვის ქსელში ჭკვიანი მოწყობილობების რაოდენობა უკვე გადაცდა 10 მილიარდს და ეს ჯერ საწყისი ეტაპია.

ნახ. 1-ზე ნაჩვენებია წლების მიხედვით ქსელში ჩართული ჭკვიანი მოწყობილობების რაოდენობა და მისი ზრდა.

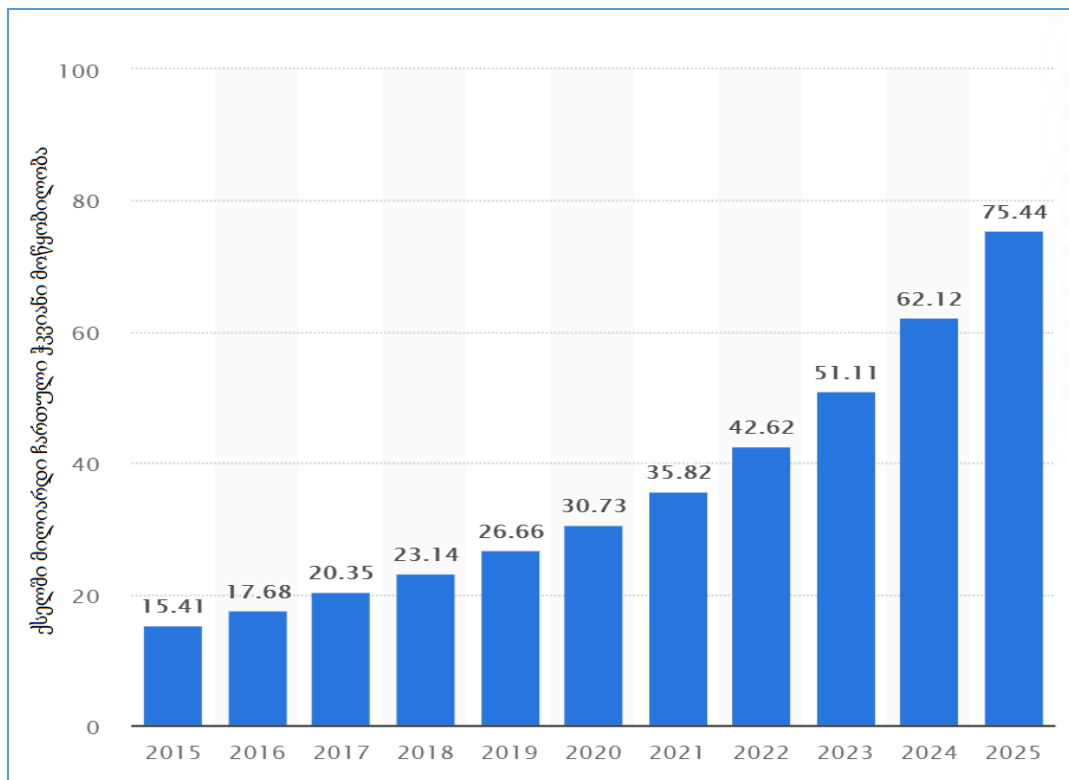


ნახ. 1. ქსელში ჩართული ჭკვიანი მოწყობილობების რაოდენობა

თავიდან ქსელის ძირითად ნაწილს შეადგენდა პერსონალური კომპიუტერები და სერვერები. შემდეგ ამას დაემატა მობილური ტელეფონები პლანშეტები და მედია მოწყობილობები. სადღეისოდ IoT ტექნოლოგიის განვითარების ეტაპზე შემოდის სხვა ჭკვიანი მოწყობილობები. ეს შეიძლება იყოს ჩაიდანი, მაცივარი, სარეცხი მანქანა, მტვერსასრუტი და სატრანსპორტო საშუალებებიც კი. ტენდენცია იმატებს და 2025 წლისთვის 2015 წელთან შედარებით მოსალოდნელია ჭკვიანი მოწყობილობების მინიმუმ გასამმაგება. ნახ. 2-ზე ნაცვენებია ჭკვიანი მოწყობილობების ზრდის ტენდენცია.

“Cloud” ტოპოლოგიის შემთხვევაში მოწყობილობასთან წვდომის დაყოვნება შეიძლება გაიზარდოს. იმის გამო, რომ ჭკვიან მოწყობილობებსა და IoT პლათფორმას შორის ხდება დამატებითი სასიგნალო პროცედურები, საერთო წარმადობა შეიძლება დაეცეს. იმისთვის, რომ სწრაფი რეაგირების ხელსაწყოებს ჰქონდეთ საიმედო და მცირე დაყოვნების კავშირი საჭიროა შემუშავდეს ჰიბრიდული ტოპოლოგიის მოდელი. მიზანშეწონილია, რომ ხელსაწყოების გარჩევა ხდებოდეს OSI მოდელის ქსელის დონეზე. ცენტრალიზებული სისტემის შემთხვევაში მომხმარებელი ცდილობს გარე

ქსელიდან დაუკავშირდეს IoT “Cloud” აპლიკაციას და შემდგომ OSI მოდელის ზედა დონეებიდან ხდება IoT მოწყობილობასთან დაკავშირება. ამას ემატება ორმაგი ან მეტი აუთენტიფიკაციის პროცედურები, რის შედეგადაც იზრდება დაყოვნება. ცხრ. 1-ში მოყვანილია დაყოვნების მაგალითი “Cloud” მოდელსა და პირდაპირ კავშირს შორის. „Cloud“ სერვისი დაყოვნება დამოკიდებულია მის მდებარეობაზე და სასიგნალო ქსელის ტიპზე. შემთხვევაში, სადაც „Cloud“ სერვისი არის ლოკალურ ქსელშივე დაყოვნება იქნება ნაკლები.

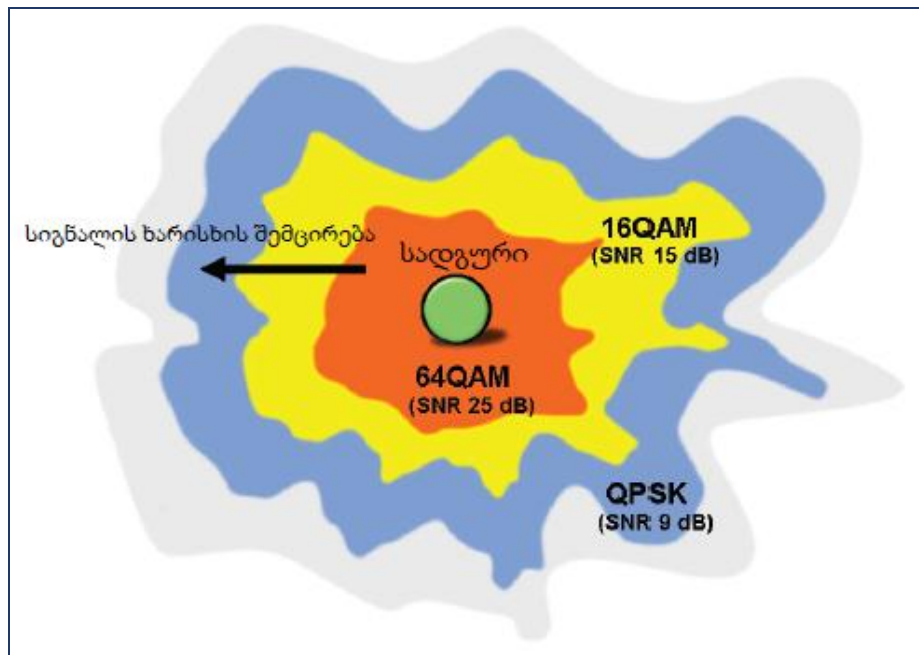


ნახ. 2. ქსელში ჭკვიანი მოწყობილობების მატების ტენდენცია

ცხრ. 1. დაყოვნება „Cloud“ მოდელსა და პირდაპირ კავშირს შორის		
	Cloud სერვისი	პირდაპირი დაერთება
სესიის შექმნის პროცედურა	150 მწმ	15 მწმ
მოწყობილობასთან კავშირი	55 მწმ	5 მწმ

ცუდი SNR ის შემთხვევაში მაღალი რიგის მოდულაციებზე იზრდება შეცდომების რაოდენობა. იმისთვის, რომ გამოვიყენოთ 64QAM მოდულაცია

ჩვენ უნდა გვქონდეს გამოკვეთილი სიგნალი. SNR-ი განისაზღვრება შემდარებელი არხის მეშვეობით და ფიჭაში დარჩენილი სიმძლავრის რესურსის მიხედვით. ძირითადად სადგურის სიახლოვეში სიგნალის დონე მაღალია და აჭარბებს სხვა სიგნალების ხმაურს, ხოლო მოშორებით სიგნალის დონე იწყებს შერევას მეზობელ ფიჭებთან და სიგნალის ხარისხი ეცემა. ნახ. 3-ზე ნაჩვენებია სადგურის პირობითი სიგნალის ხარისხი შემცირება მანძილის გაზრდის შემთხვევაში.



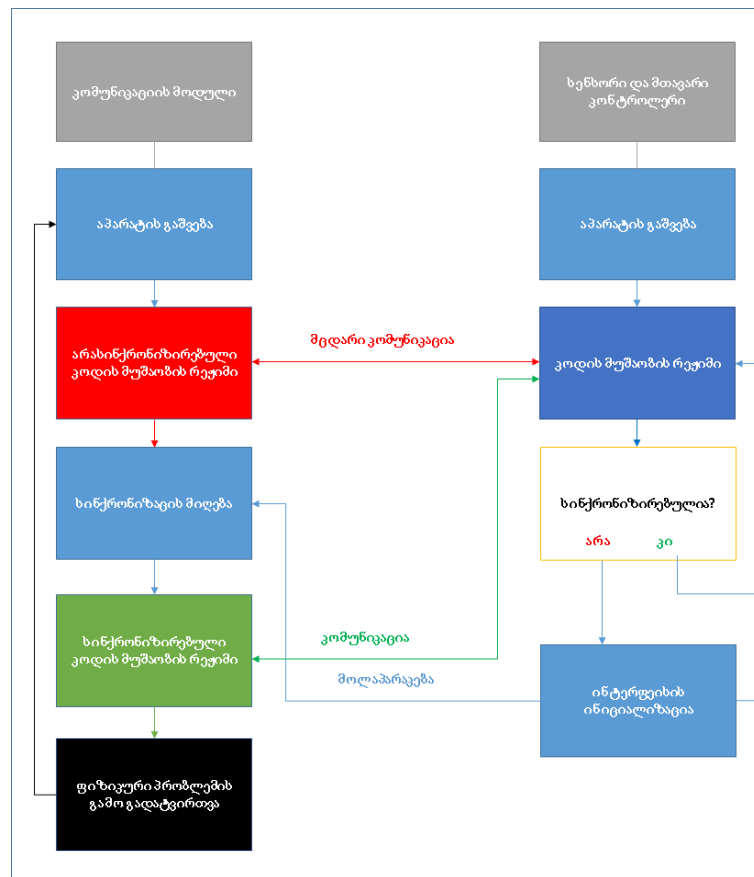
ნახ. 3. სადგურის სიგნალის ხარისხი დამოკიდებულება მანძილის გაზრდაზე

სპექტრული ეფექტურობის მისაღწევად საჭიროა გვქონდეს ძლიერი გამოკვეთილი სიგნალი. სიგნალმა უნდა გადააჭარბოს ხმაურს 200-ჯერ, რაც მობილური სისტემების შემთხვევაში ხდება მარტო ფიჭების ცენტრებში, სადაც ანტენის გაძლიერება და ეფექტურობა მაღალია.

საგნების ინტერნეტის სენსორების აქტუალური საკითხია მისი ექსპლუატაციის დრო. ფიზიკური კომპონენტები განიცდიან დეგრადირებას და ამასთან ერთად აპარატურის გაუმართაობის ალბათობა იზრდება. გაუმართავ აპარატს შეუძლია შექმნას მოულოდნელი მონაცემები პროგრამული უზრუნველყოფისთვის. თუ კოდი არ არის მოქნილი,

შეიძლება გაიზარდოს პროგრამული უზრუნველყოფის შეცდომებიც. ასეთი პრობლემა ხშირია ქსელის მოდულების გამოყენებისას.

თუ გვინდა, რომ მოწყობილობების გამართული მუშაობა გაგრძელდეს, საჭიროა სხვადასხვა სახის ტესტირების ჩატარება და შესაბამისი მექანიზმების რეალიზება. ნახ. 4-ზე გთავაზობთ ჩვენ მიერ შემუშავებული კოდის განახლებული მუშაობის სტრუქტურას. აქ, პერიუდულად მოწმდება მოდულის გამართული მუშაობა. დესინქრონაციის შემთხვევაში ჩვენს კოდს აქვს საკმარისი მოქნილობა თავიდან აწარმოოს მოლაპარაკება მოდულთან. თუ მოდული გამოვა მწყობრიდან, ჩვენ მოწობილობას ექნება ამის დეტექტირების შესაძლებლობა და შესაბამისი რეაგირება. შემუშავების ფაზაზე ფიზიკური კომპონენტების მწყობრიდან გამოსვლის ალბათობა უფრო მცირეა ვიდრე ექსპლუატაციის დროის ბოლოსკენ.



ნახ. 4. კოდის განახლებული მუშაობის სტრუქტურა

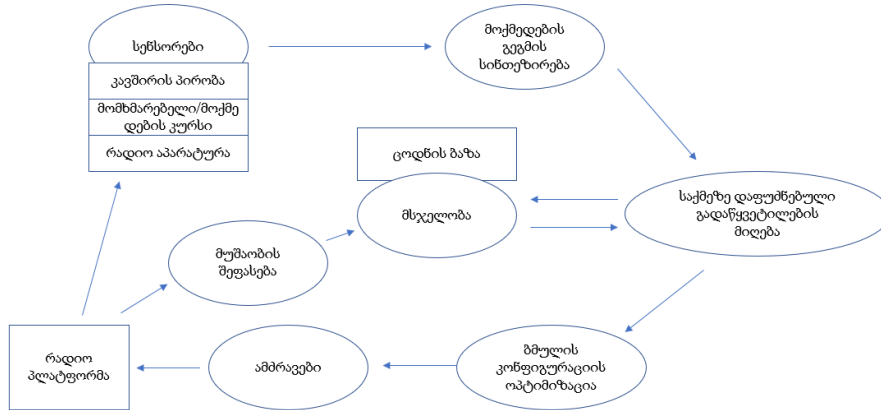
დისერტაციის I თავის ძირითადი შედეგების შეჯამება. ქვეთავებში ჩამოთვლილი იყო საგნების ინტენეტის აქტუალური საკითხები, მათი პრობლემატიკა და სავარაუდო გადაჭრის გზები. მოვიყვანეთ IoT მოწყობილობების ზრდის ტენდენციის სტატისტიკა. აქ, განხილული იყო პრობლემის გადაჭრის გზები IPv6-ით, Cloud-ით და ინფორმაციაზე ორიენტირებული ქსელით. ჩამოთვლილი იყო მათი უპირატესობები და ნაკლოვანებები. ჩატარებული იყო ასევე მცირე ექსპერიმენტი, სადაც განვსაზღვრეთ Cloud-ით მიღებული დაყოვნების მნიშვნელობა. განხილული და ნაჩვენები იყო რადიო ტექნოლოგიების სუსტი მხარეები. შემოთავაზებული იყო IoT მოწყობილობებისთვის სამუშაო პროცესის ტესტირების მოდელი, რომელსაც შეუძლია გაზარდოს ექსპლუატაციის ვადები.

II თავში. განხილულია კოგნიტური რადიო და მისი ერთიანი შემეცნებითი სისტემა. იმისათვის, რომ რადიო შემეცნებითი გავხადოთ, ჩვენ უნდა გამოვიყენოთ კომუნიკაციებისა და კომპიუტერული მეცნიერების მრავალი ასპექტი. დავინახავთ, რომ ეს ცნებები და მათი გამოყენება საკომუნიკაციო სისტემებში მოითხოვს მრავალნაირი დისციპლინების ფართო გაგებას. ეს კოგნიტურ რადიოს ძალიან საინტერესოს გახდის, მაგრამ ამავდროულად საკმაოდ ძნელ შესასწავლ თემად აქცევს მას.

შემეცნებითი რადიო არის ინტელექტუალური დამუშავების პროგრამა და ადაპტაცია უკაბელო საკომუნიკაციო სისტემაზე. ჩვენ ამას ვიყენებთ, გარემოს დაკვირვებების საფუძველზე, როგორც გადამამუშავებელ ძრავას. რადიოს ამ ნაწილს შემეცნებით ძრავას ვუწოდებთ. შემეცნებითი ძრავის აღწერითა და განვითარების შემდეგ, თავის დასასრულს გადავდივართ უსადენო საკომუნიკაციო სისტემებში სწავლის ტექნიკის და ხელოვნური ინტელექტის გამოყენების უფრო ზოგად მიდგომებზე.

შემეცნებითი ძრავა არის სისტემის ინტელექტუალური ბირთვი. მისი დიზაინი ემსახურება ერთდროულად ორ მიზანს:

1. შემეცნებითი რადიოალგორითმების შემუშავებასა და გამოყენებას;
2. კოგნიტური რადიოს ფუნქციონირების გაფართოებას.

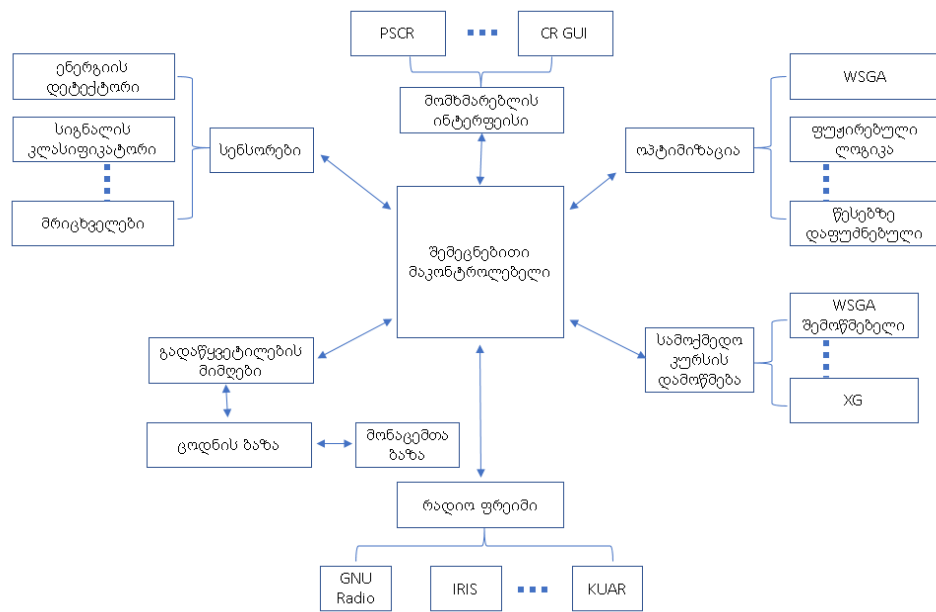


ნახ. 5. შემეცნების ციკლი

კერძოდ, შემეცნებითი რადიოს ქმედებებს მოყვება პირველად მიტოლას მიერ შემოთავაზებული შემეცნების ციკლი: დაკვირვება, ორიენტირება, დაგეგმვა, გადაწყვეტა, სწავლა და ქმედება. შემეცნების ციკლის შეცვლილი ვერსია, მსგავსი ფორმატით, ნაჩვენებია ნახ. 5-ზე. ეს სურათი ამარტივებს მიტოლას ციკლის მოქმედებებს და უზრუნველყოფს უფრო პრაქტიკულთან მიახლოებულ სისტემას. გარკვეულწილად, ეს არის ჭკვიანი შემეცნებითი სისტემა.

შემეცნებითი ძრავის მუშაობის უკეთ ასახსნელად, ჩვენს მსჯელობას განვაგრძობთ იმპლემენტაციის ზოგიერთი სპეციფიკაციის წარდგენით. ნახ. 6-ზე წარმოდგენილია შემეცნებითი ძრავის სტრუქტურა. იგი შედგება ძირითადი კომპონენტისაგან, რომელსაც შემეცნებით მაკონტროლებელს უწოდებენ. იგი ასრულებს სისტემის ბირთვის და მგეგმავის ფუნქციას, და არეგულირებს სხვა დაკავშირებული კომპონენტების დროსა და შემავალ/გამავალ ინფორმაციას. სენსორები აგროვებენ რადიო და გარემო მონაცემებს. ოპტიმიზატორი, მოცემული ამოცანისა და გარემოს გათვალისწინებით, ქმნის ოპტიმიზებული ტალღის ფორმას. გადაწყვეტილების მიმღები ახდენს ინფორმაციის კოორდინირებას და

იღებს გადაწყვეტილებას, როგორ მიაღწიოს ოპტიმიზაციას და როგორ იმოქმედოს. სამოქმედო კურსის ძრავა აწესებს მარეგულირებელ შეზღუდვებს. რადიოს ფრეიმი უკავშირდება რადიოპლატფორმას ახალი ტალღების ფორმების შესაქმნელად და სენსორებიდან ინფორმაციის ამოსაღებად. მომხმარებლის ინტერფეისი უზრუნველყოფს შემეცნებითი ძრავის კონტროლსა და მხარდაჭერას.



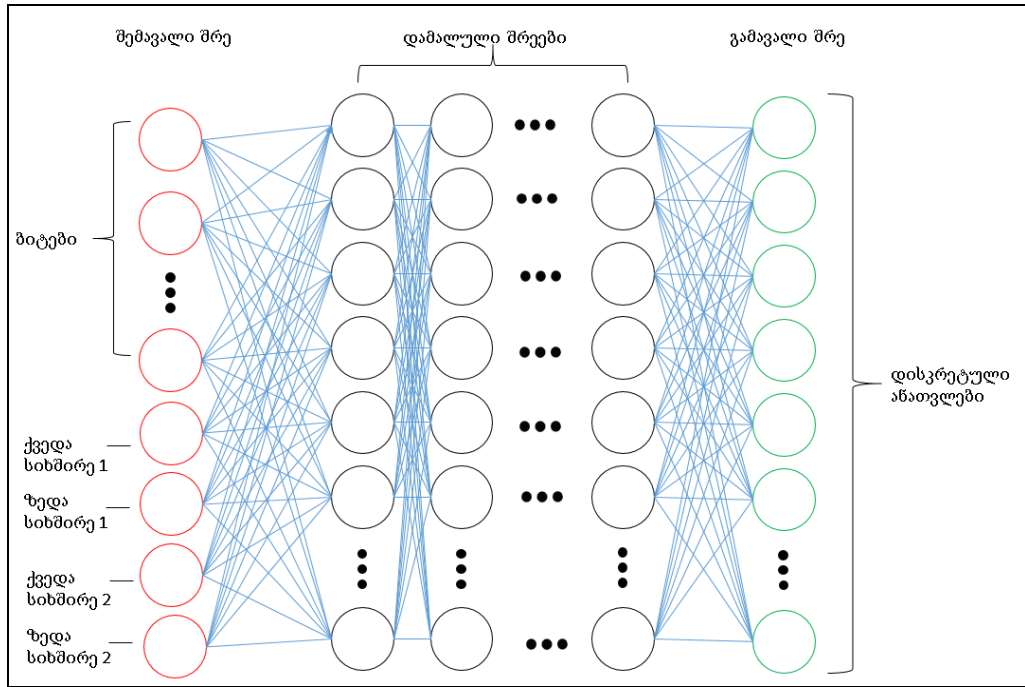
ნახ. 6. უსადენო ტელეკომუნიკაციების შემეცნებითი ძრავა

დისერტაციის II თავის ძირითადი შედეგების შეჯამება. განვიხილეთ მიტოლას მიერ შემოთავაზებული შემეცნების ციკლი: დაკვირვება, ორიენტირება, დაგეგმვა, გადაწყვეტა, სწავლა და ქმედება. ამის პრინციპზე გავავრცელეთ კოგნიტური რადიოს სისტემა. ქვეთავებში აღწერილია უსადენო ტელეკომუნიკაციების შემეცნებითი ძრავის მთავარი ელემენტები, რომლებიც კრიტიკულია ხელოვნური ალგორითმების ინტეგრაციისთვის. შემოთავაზებული და შერჩეული იყო სხვადასხვა კომპონენტი. შემეცნებითი ძრავს აქვს მრავალ სისტემასთან თავსებადობის საშუალება. ამის გამოყენებით შევადგინეთ მაკონტროლებლის კონფიგურაცია. ქვეთავებში ასევე განხილული იყო გენეტიკური ალგორითმების პრინციპი და

შემოთავაზებულია მათი გამოყენების ვარიანტები რადიო ტექნოლოგიების დახვეწაში.

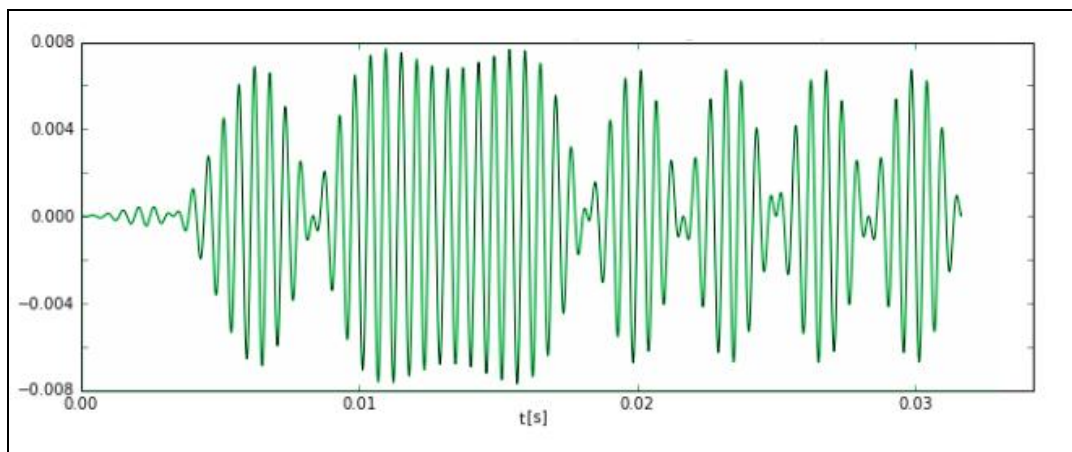
III თავში. წარმოდგენილია ახალი რადიოსიგნალების დამუშავების მეთოდები, რომლებსაც გააჩნიათ გაუმჯობესებული ხელშეშლამგრადობა. მოდულაციის და დემოდულაციის შედეგად იქმნება გვერდითი მდგენელები, ეს განპირობებულია როგორც მათემატიკური მოდელირებით, ასევე არაიდეალური სტრუქტურის საკაბელო სისტემებში გავლით და ეთერში გავრცელებით. შედეგათ სიგნალის ფორმა არის შეცვლილი და სწრაფი ფურიეს გარდაქმნის ფუნქციაში გატარების შემდეგ გვაქვს მიღებული დამატებითი ხმაურები. ამის დანახვა შეგვიძლია სპექტრის წერტილებით. ხმაურების კომპენსაციისთვის ჩვენ შემოთავაზებული და შედგენილი გვაქვს ნეირონული ქსელით დაგენერირებული მოდულაციები. ნეირონული ქსელის უპირატესობა მისი ადაპტაციის შესაძლებლობაა. ნეირონული ქსელის ფუნქციონალის რეალიზების შემდეგ შესაძლებლობა გვექნება ალგორითმის ადგილის და პირობების მიხედვით იდივიდუალური ოპტიმიზაცია. ეს მოგვცემს მაღალ ეფექტიანობას და გაზრდის სისტემის ჯამურ ტევადობას. იხილეთ სატესტო განზოგადოებული ნეირონული დიაგრამა ნახ. 7_ზე.

ნეირონული სწავლება გავაკეთეთ მოდელირებულ, ვირტუალურ გარემოში. სწავლების მოხდენა ასეთ გარემოში კარგია იმიტომ, რომ შეგვიძლია სწავლების მრავალი პარალელური ციკლის შესრულება. ახალი თაობის მობილურ სისტემებში მიზანშეწონილია სპეციალური სატესტო არხის შემუშავება. ასეთი არხით შევძლებთ ალგორითმის ოპტიმიზაციას კონკრეტული ლოკაციისთვისა და დროისთვის. ალგორითმი საწყისს აიღებს ვირტუალურ და ლაბორატორიულ გარემოში, შემდეგ კი გააგრძელებს განვითარებას ნამდვილ ქსელში. ჩვენს მაგალითში ვირტუალურ გარემოში დაგენერირებული FSK ალგორითმის სწავლებაზე გავიდა 2 400 000 ციკლი.



ნახ. 7. მოდულაციის განზოგადოებული ნეირონული დიაგრამა

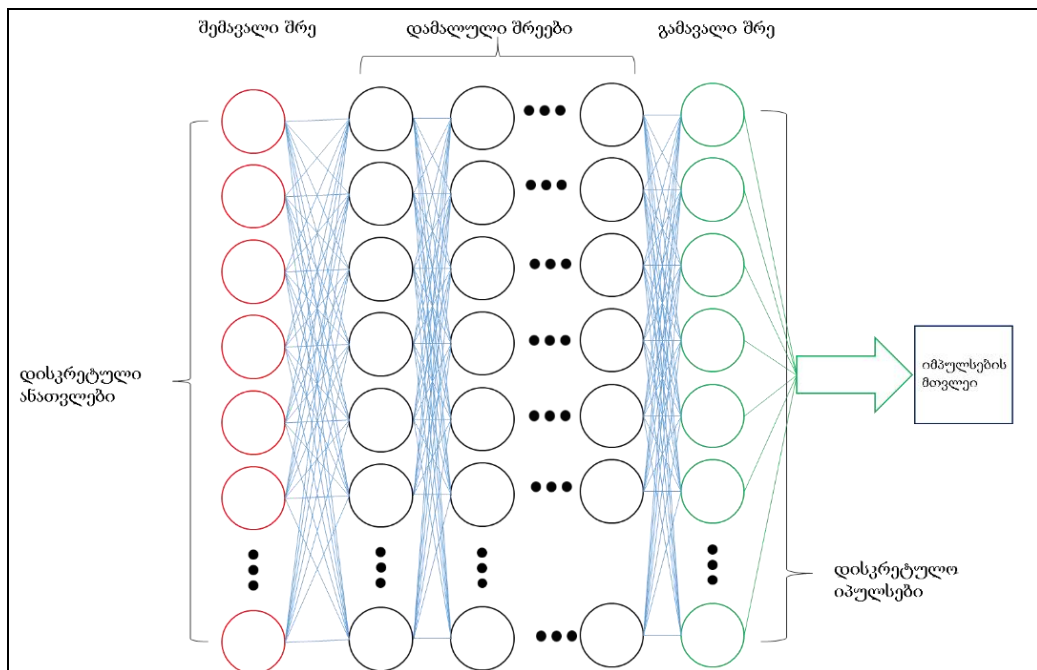
დროის მონაკვეთზე ამოღებული სიგნალის ფორმა შეგიძლიათ იხილოთ ნახ. 8_ზე. აქ სიგნალის ფორმა საკმაოდ განსხვავებულია იმისგან, თუ რაც არის კლასიკური ფაზური მოდულაციის შემთხვევაში. ასეთი სიგნალის ფორმა გამოწვეული შეყვანილი ზედა და ქვედა სიხშირეების პარამეტრებით და შემდგომ ფორმის შეფასება FFT_ფუნქციის მეშვეობით.



ნახ. 8. ნეირონული ქსელით მიღებული ფაზით მოდულირებული სიგნალი

მოდულაციის გარდა ასევე გვინდოდა დემოდულატორის აგება. ვფიქრობდით, რომ დემოდულაციის პროცესი ზოგადად უფრო რთულია,

რადგან მოიცავს უფრო მეტ გამოთვლებს და მათემატიკურ კორელაციებს. თავდაპირველი სქემა მოიცავდა FFT ბლოკს, რომელიც იდგა შემავალი შრეების წინ. დემოდულაციის შედეგად ვლბულობთ დაკვანტულ ერთეულებს, შესაბამისად ნეირონული ქსელის გადაწყვეტილებები გამარტივებულია, ამიტომ ვარჩიეთ FFT ბლოკის ამოღება. ნახ. 9_ზე იხილეთ დემოდულაციის განზოგადოებული ნეირონული დიაგრამა. აქ გამავალ შრედ ავიღეთ იმპულსების მნიშვნელობები. შეგვეძლო შრეების შემცირება და პირდაპირ ბიტების ამოკითხვა, თუმცა ასეთი მიდგომა დაარღვევა რეალური დემოდულაციის იდენტურობის წინაპირობის. გამავალი შრეების დამუშავება ხდება იმპულსების მთვლელის ბლოკში. ამ ბლოკში ხდება იმპულსების გადაყვანა ბიტებში. შეფასებას ვაკეთებთ მხოლოდ გამავალი შრის მეშვეობით.

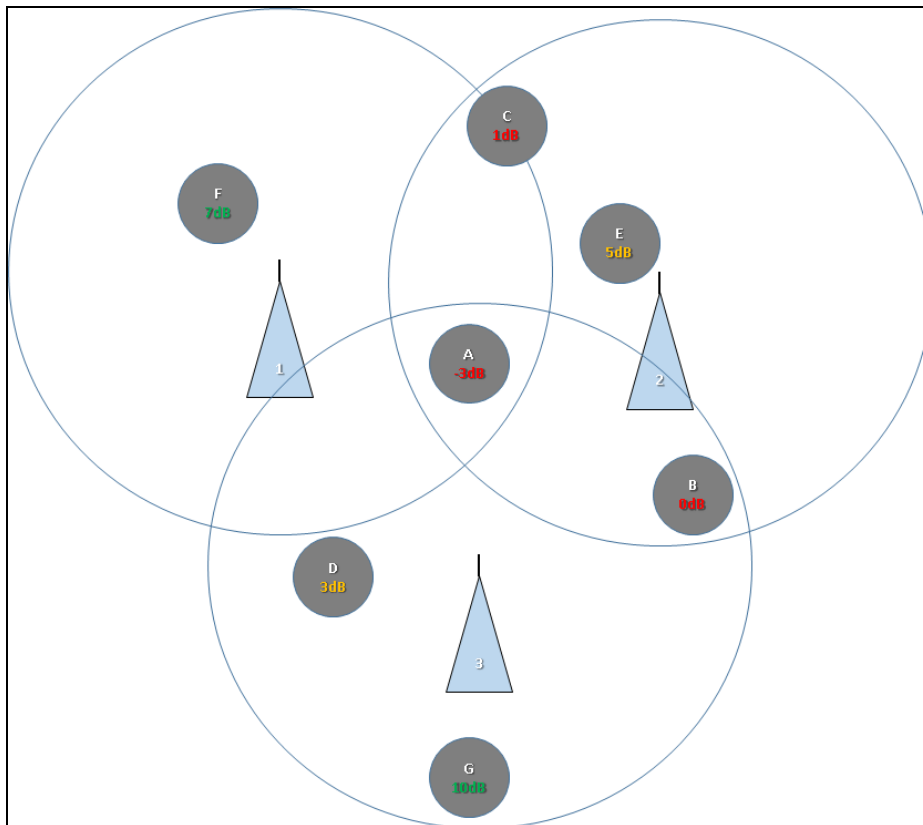


ნახ. 9. დემოდულაციის განზოგადოებული ნეირონული დიაგრამა

იგივე ნეირონული ქსელის მოდელი გამოსადეგია სხვა მოდულაციების სასწავლად. გასათვალისწინებელია ისიც, რომ უფრო კომპლექსური მოდულაციებს დასჭირდებათ სწავლების მეტი ციკლი.

მაგალითად QAM16 მოდულაციის სწავლებას დასჭირდა დაახლოებით 9600000 ციკლი.

ავიღეთ ქსელი 3 საბაზო სადგურით. ირგვლივ განვათავსეთ რამოდენიმე მოწყობილობა. თითო დემოდულატორი იქნება სხვადასხვა SNR-ის პირობებში. ნახ. 10-ზე ნაჩვენებია სატესტო ტოპოლოგია. აქ A,B,C,D,E,F,G მიმღები მოწყობილობებია და ზედ მიწერილი აქვთ SNR-ის საშუალო მნიშვნელობები (საბაზო სადგურიდან თანაბარი სიმძლავრის გასხივების პირობების შემთხვევაში).



ნახ. 10. ნეირონული ქსელისთვის განკუთვნილი რადიოგარემოს სატესტო ტოპოლოგია

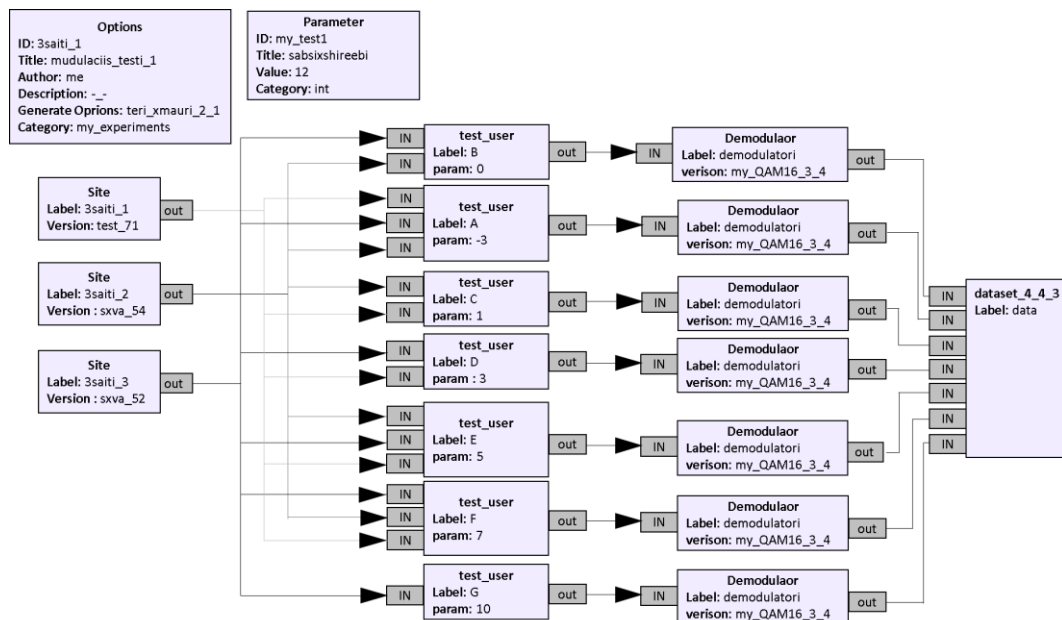
გავითვალისწინოთ შემდეგი პირობები:

- A და F მოწყობილობებს ემსახურება საბაზო სადგური ნომერი 1;
- B, E და C მოწყობილობებს ემსახურება საბაზო სადგური ნომერი 2;
- D და G მოწყობილობებს ემსახურება საბაზო სადგური ნომერი 3;

- გარდა საბაზო სადგურებს შორის ინტერფერენციისა ასევე სიგნალში ფიგურირებს თეთრი ხმაური ფარდობით 10:1-თან.

იმის გამო, რომ ზოგიერთი მომხმარებლის SNR-ი გაფუჭებულია, სტანდარტული მაღალი რიგის მოდულაცია ვერ იმუშავებს ეფექტურად. ამ ექსპერიმენტის მიზანია აჩვენოს ის, რომ ნეირონული ქსელის გამოყენებით შესაძლოა ძალისხმევის ჩარევის გარეშე, ისეთი ხერხის ჩართვა, რომელიც ავტომატურად მოერგება ნებისმიერ პირობას და აუწევს ეფექტურობას.

არსებული მოდულაციები და ნეირონულ ქსელების შემოწმებას ვახდენთ GNU Radio-ს ბლოკების მეშვეობით. ნახ. 11-ზე იხილეთ GNU Radio-ზე ბლოკებით აწყობილი ტოპოლოგია.



ნახ. 11. GNU Radio-ზე აწყობილი სატესტო რადიოტოპოლოგია

ოპტიმიზაციის პროცესის დაბალი შეცდომის კოეფიციენტის მიღების შედეგად ვასრულებთ ნეირონული ქსელის სწავლებას და ვიყენებთ არსებულ ალგორითმს დემოდულატორების სახით. ვუყურებთ მიღებულ საბოლოო შედეგებს. QPSK მოდულაციის მიღებული შეცდომების კოეფიციენტები იხილეთ ცხრ. 2-ზე

ცხრ. 2. QPSK მოდულაციის საშუალოდ სწორად მოსული სიმბოლოების პროცენტი		
SNR	სტანდარტული QPSK	გაგენერირებული QPSK
-3dB	75.65%	85.48%
0dB	83.12%	94.76%
1dB	97.73%	100.00%
3dB	99.98%	100.00%
5dB	100.00%	100.00%
7dB	100.00%	100.00%
10dB	100.00%	100.00%

QAM16 მოდულაციის მიღებული შეცდომების კოეფიციენტები იხილეთ ცხრ. 3_ზე.

ცხრ. 3. QAM16 მოდულაციის საშუალოდ სწორად მოსული სიმბოლოების პროცენტი		
SNR	სტანდარტული QAM16	გაგენერირებული QAM16
-3dB	17.22%	19.80%
0dB	24.10%	27.47%
1dB	39.15%	45.81%
3dB	51.09%	63.86%
5dB	78.24%	92.19%
7dB	94.89%	100.00%
10dB	100.00%	100.00%

QAM64 მოდულაციის მიღებული შეცდომების კოეფიციენტები იხილეთ ცხრ. 4_ზე.

ცხრ. 4. QAM64 მოდულაციის საშუალოდ სწორად მოსული სიმბოლოების პროცენტი		
SNR	სტანდარტული QAM64	გაგენერირებული QAM64
-3dB	2.19%	2.43%
0dB	8.42%	9.38%
1dB	17.27%	19.29%
3dB	24.01%	27.01%
5dB	31.00%	35.40%
7dB	41.89%	50.27%
10dB	55.54%	73.31%

როგორც წინა ცხრილებიდან ჩანს, ნეირონული ქსელით შემუშავებული მოდულაციების ეფექტურობა უფრო მაღალია ვიდრე სტანდარტულის. QPSK მოდულაციით მიღებული სპექტრული ეფექტურობის ფარდობა სიმბოლოსთან იხილეთ ცხრ. 5_ზე.

ცხრ. 5. QPSK მოდულაციის სიმბოლოსთან შეფარდებით სპექტრული ეფექტურობა		
SNR	სტანდარტული QPSK	გაგენერირებული QPSK
-3dB	1.51	1.71
0dB	1.66	1.90
1dB	1.95	2.00
3dB	2.00	2.00
5dB	2.00	2.00
7dB	2.00	2.00
10dB	2.00	2.00

QAM16 მოდულაციით მიღებული სპექტრული ეფექტურობის ფარდობა სიმბოლოსთან იხილეთ ცხრ. 6_ზე.

ცხრ. 6. QAM16 მოდულაციის სიმბოლოსთან შეფარდებით სპექტრული ეფექტურობა		
SNR	სტანდარტული QAM16	გაგენერირებული QAM16
-3dB	0.69	0.79
0dB	0.96	1.10
1dB	1.57	1.83
3dB	2.04	2.55
5dB	3.13	3.69
7dB	3.80	4.00
10dB	4.00	4.00

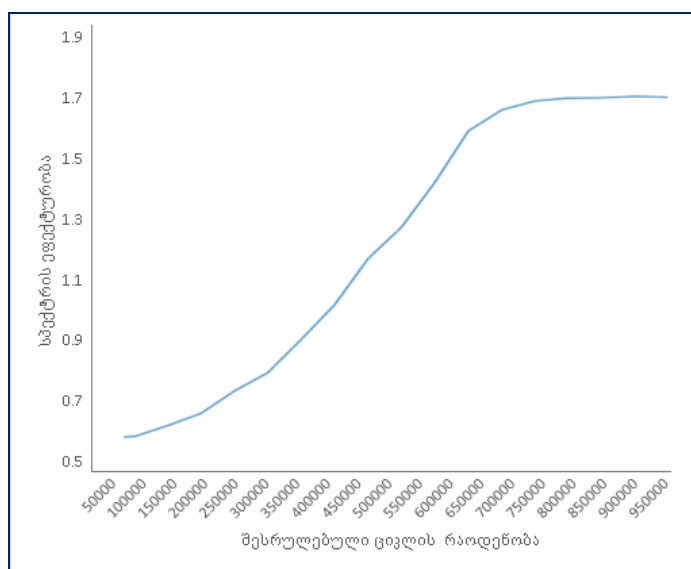
QAM64 მოდულაციით მიღებული სპექტრული ეფექტურობის ფარდობა სიმბოლოსთან იხილეთ ცხრ. 7_ზე.

არსებული მოდულაციების იმიტირების გარდა, ასევე საინტერესოა ახალი ტიპის მოდულაციის შედგენა. აქ, მოდულირების პარამეტრი

შეიძლება გახდეს უშუალოდ სიგნალის კომლექსური ფორმები და არა მარტივი მნიშვნელობები როგორცაა ამლიტუდა და ფაზა. ნეირონული ქსელების უპირატესობაა ბუნებრივად გადაჭრას ნებისმიერი სირთულის ამოცანა იქამდე, სანამ გვაქვს საკმარისი ნეირონების რაოდენობა და ადეკვატური შემავალი შრე.

ცხრ. 7. QAM64 მოდულაციის სიმბოლოსთან შეფარდებით სპექტრული ეფექტურობა		
SNR	სტანდარტული QAM64	გაგენერირებული QAM64
-3dB	0.13	0.15
0dB	0.51	0.56
1dB	1.04	1.16
3dB	1.44	1.62
5dB	1.86	2.12
7dB	2.51	3.02
10dB	3.33	4.40

ნახ. 12-ზე იხილეთ ოპტიმიზაციის პროცესის დიაგრამა, სადაც ნაჩვენებია ციკლების რაოდენობის გაზრდის შედეგად მოდულაციის სპექტრული ეფექტურობის გაუმჯობესება -3dB SNR პირობების შემთხვევაში.

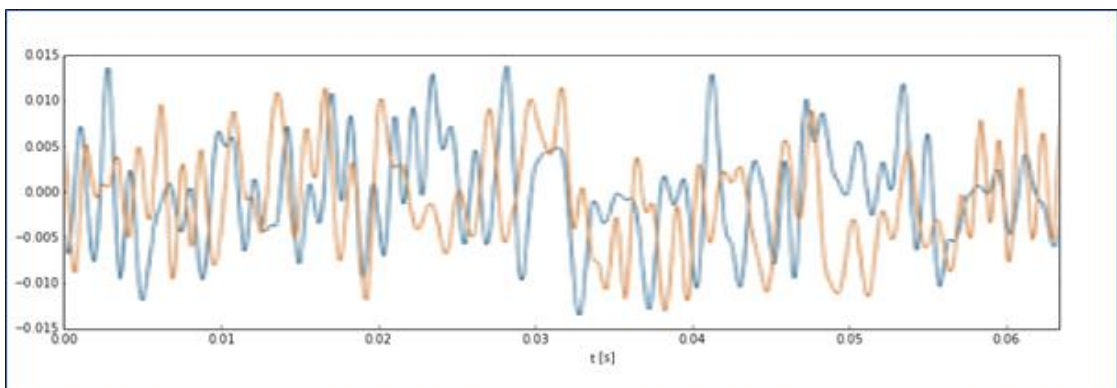


ნახ. 12. ახალი მოდულაციის სპექტრული ეფექტურობის დამოკიდებულება ციკლების რაოდენობაზე, -3dB SNR პირობებში

შემოწმების შემდეგ ჩანს, რომ SNR-ის ყველა პირობაში ახალი მოდულაცია იძლევა უფრო მაღალ სპექტრულ ეფექტურობას ვიდრე სხვა სტანდარტული მოდულაციები. ცხრ. 8-ზე იხილეთ სხვადასხვა SNR-ის პირობებში ახალი მოდულაციის სპექტრული ეფექტურობა და მისი შედარება სხვა სტანდარტულ მოდულაციებთან.

ცხრ. 8. ახალი მოდულაციის სპექტრული ეფექტურობა				
SNR	სტანდარტული QPSK	სტანდარტული QAM16	სტანდარტული QAM64	ახალი მოდულაცია
-3dB	1.57	0.72	0.22	1.72
0dB	1.68	1.06	0.6	1.87
1dB	1.87	1.62	1.08	2.14
3dB	2	2.11	1.47	2.43
5dB	2	3.14	1.88	3.5
7dB	2	3.84	2.82	4.23
10dB	2	4	3.41	4.4

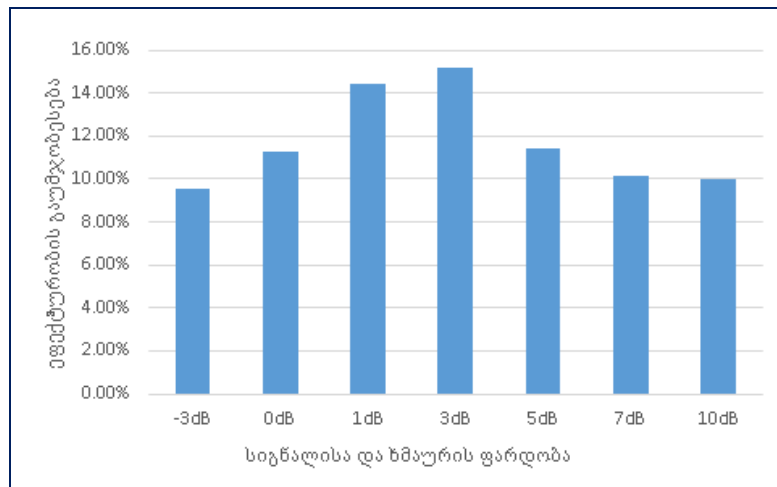
აქ სიბოლეს ფორმა იცვლება არამარტო მოდულირებადი მონაცემებით, არამედ რადიოარხში არსებული სიგნალებითაც. ნახ. 13-ზე მოყვანილია 0dB SNR-ის შემთხვევაში ორი რადიოსიგნალის ფორმები.



ნახ. 13. ახალი მოდულაციით 2 სადგურიდან მიღებული ორი რადიოსიგნალის ფორმები

საინტერესოა ის ფაქტიც, რომ აქ სიმბოლო აღწერს დროში ბიტების დინამიურ რაოდენობას, პირდაპირ სიგნალის დამუშავების დონეზე. ახალი

მოდულაციით მიღწეული ეფექტურობის გაუმჯობესება შეგიძლიათ იხილოთ ნახ. 14-ზე. აქ ყველა სიგნალსა და ხმაურის ფარდობის პირობებში, ახალი მოდულაცია ჯობნის დაახლოებით 10%-ით ყველა ჩამოთვლილ სტანდარტულ მოდულაციებს. აღსანიშნავია, რომ მკვეთრი სხვაობა არის იმ შუალედში სადაც სტანდარტული QPSK-ს სპექტრული ეფექტურობა დაახლოებით გაუტოლდა სტანდარტულ QAM16-ის სპექტრულ ეფექტურობას.



ნახ. 14. ახალი მოდულაციით მიღწეული ეფექტურობის გაუმჯობესება

დისერტაციის III თავის ძირითადი შედეგების შეჯამება. პროგრამული უზრუნველყოფის გამოყენებით ავაგეთ არსებული მუდულაციების მოდელები. ვაჩვენეთ, რომ სტანდარტული მათემატიკური მოდელების გამოყენებით მაინც გვაქვს მცირე სპექტრული გაჟონვა. ამის გამო, დატვირთული რადიოსისტემის ჯამური ტევადობა შემცირებულია. ამ პრობლემის მოსაგვარებლად შევადგინეთ მზგავსი მოდულატორების და დემოდულატორების იმიტატორები ნეირონული ქსელის გამოყენებით. შეცდომით მოსული ბიტების რაოდენობა სხვადასხვა მოდულაციის ტიპზე საშუალოდ შემცირდა დაახლოებით 12%-ით. ნეირონული ქსელით შექმნილი მოდულაციამ წარმოშვა უფრო მკვეთრი ფორმის სიმბოლოები, რომლებსაც აქვთ ნაკლები გვერდითი მდგენელების მნიშვნელობები ვიდრე სტანდარტულ მოდულაციებს. შედეგად, სისტემაში გვერდითი არხებს

შორის ხმაურის დონე დაიწია. არსებული მოდულაციების იმიტირების გარდა, ასევე დავაგენერირეთ ახალი ტიპის მოდულაცია. აქ ყველა სიგნალსა და ხმაურის ფარდობის პირობებში, ჩვენ მიერ მიღებული მოდულაცია ჯობნის დაახლებით 10%-ით ყველა ჩამოთვლილ სტანდარტულ მოდულაციებს. იმიტირებულ მოდულატორებთან შედარებით გაუარესებული შედეგის მიღება გამოწვეულია ახალი მოდულაციის ოპტიმიზაციის ეტაპის გამკაცრებით. კერძოთ კი იმით, რომ მოდულატორი ერთდროულად ეჯიბრებოდა დაბალი და მაღალი რიგის სტანდარტულ მოდულაციებს, როდესაც მისი სიმბოლო შეესაბამებოდა მაქსიმუმ 6 ბიტს.

დასკვნა

დახასიათებული იყო უსადენო კავშირის ქსელებში საგნების ინტერნეტის რეალიზების საკითხები, პრობლემატიკა და სავარაუდო გადაჭრის გზები. ნეირონულ ქსელის საშუალებით გავზარდეთ რადიოსისტემის ეფექტურობა. ასეთი მიდგომის დიდი უპირატესობა არის ის, რომ სხვადასხვა გარემოში შესაძლებელი იქნება სიგნალების დაოპტიმიზირება. ეს განსაკუთრებით გამართლებულია, ადგილებში სადაც ხდება მრავალი არეკვლები, დიფრაქცია, სიგნალის დონის ფლუქტუაციები, ელექტრონიკით წარმოქმნილი დამატებითი ხმაურები და ინტერმოდულაციები, რომელთა კონტროლი და კომპენსირება ფიქსირებულ მოდულაციის ხერხებით არ არის ეფექტურად შესაძლებელი. გარდა ამისა, ახალი მეთოდის გამოყენებით, სისტემაში უამრავი მოწყობილობის ჩართვის შემთხვევაში წარმოქმნილი ხმაურები იქნება მინიმალური.

ნაშრომში ჩატარებული კვლევები და მიღებული შედეგები შეიძლება ასე ჩამოვყალიბოთ:

- 1) მოყვანილია IoT მოწყობილობების ზრდის ტენდენციის სტატისტიკა. განხილულია დამისამართების პრობლემის გადაჭრის გზები IPv6-ით, Cloud-ით და ინფორმაციაზე ორიენტირებული ქსელით. ჩამოთვლილია მათი უპირატესობები და ნაკლოვანებები.
- 2) შემოთავაზებულია IoT მოწყობილობებისთვის სამუშაო პროცესის ტესტირების მოდელი, რომელსაც შეუძლია გაზარდოს ექსპლუატაციის ვადები.
- 3) განხილულია მიტოლას მიერ შემოთავაზებული შემეცნების ციკლი: დაკვირვება, ორიენტირება, დაგეგმვა, გადაწყვეტა, სწავლა და ქმედება. ამის პრინციპზე წარმოდგენილია კოგნიტური რადიოს სისტემა.

- 4) ნეირონული ქსელის საშუალებით აგებულია და გაუმჯობესებულია არსებული მოდულაციები. ხმაურის პირობებში ეს მოდულაციები გაუმჯობესდა საშუალოდ 14%-ით.
- 5) დაგენერეირებულია ახალი ტიპის ადაპტური მოდულაცია, რომელიც ჯობნის სტანდარტულ მოდულაციებს დაახლოებით 10%-ით.

გამოქვეყნებული ნაშრომების სია დისერტაციის თემაზე:

1. Kvirkvelia Sh.V., Kvernadze S.A. and Beridze J.L. ANALYSIS OF CODE TESTING AND LONG TERM RELIABILITY FOR INTERNET OF THINGS COMPONENTS. საქართველოს საინჟინრო სიახლენი, 2020, №1, vol. 90, გვ. 46-51;
2. Zangaladze A. P., Kvernadze S. A., Kvirkvelia S. V. INFORMATION-CENTRIC NETWORKING AND ITS OFFLOAD BENEFITS FOR IOT REMOTE DEVICES. Научные Горизонты, 2021, №5(45), pp. 132-138;
3. Kvernadze S. A. ADAPTIVE GENERATED MODULATION AND ITS EFFICIENCY IN MOBILE SYSTEMS. Международный научный журнал «Научные вести», 2021, № 6(35) pp. 68-74;
4. კვერნაძე მ.ა., ზანგალაძე ა.პ., კვირკველია შ.ვ., კვერნაძე ს.ა., ბერიძე ჯ.ლ. რადიოსიგნალების დამუშავების ადაპტიური მოდელი შემდეგი თაობის რადიოსისტემებისთვის. საქართველოს საინჟინრო სიახლენი, 2021, №1, vol. 92, გვ. 45-56;
5. კვირკველია შ., კვერნაძე ს., ბერიძე ჯ. ელექტროენერგეტიკულ სისტემებში საგნების ინტერნეტის გამოყენების შესაძლებლობები. I საერთაშორისო სამეცნიერო-ტექნიკური კონფერენცია: "ენერგეტიკის ნთანამედროვე პრობლემები და მათი გადაწყვეტის გზები". "ენერჯია", 2019, №3(91), გვ. 148-151.

Abstract

New electronic devices are coming in every day. There is a tendency to operate different types of devices remotely. Until now, the scale of this was quite limited. It can be a kettle, a refrigerator, a washing machine, a vacuum cleaner and even a vehicle. According to statistics, the trend is increasing and by 2025, compared to 2015, smart devices are expected to triple at least. The growth of devices in the network has led to a tendency to increase its capacity. Based on the analysis, we can say that the increase in devices far exceeds the improvement in spectral efficiency. The paper discusses and demonstrates some of the weaknesses of radio technologies. The spectral efficiencies of mobile systems are slowly increasing, but new models need to be developed for further development. Access technologies changed almost every time, but system speeds mostly increased with increasing channel width. In the case of a bad SNR, the number of errors on high-order modulations increases. In order to use 64QAM modulation we need to have a good signal. To achieve spectral efficiency we need to have a strong clear signal. The signal have to exceed the noise by about 200 times, which in the case of mobile systems occurs only in the centers of the beams, where the antenna gain and efficiency are high.

A key component of reliability is the development of software that does not rely on the state of the device. Hardware errors cause additional software errors. The total number of errors increases the probability of a fatal error. With new adaptive software we will be able to increase the operating time of the device. We propose a workflow testing model for IoT devices that can extend service life.

To make radio cognitive, we must use many aspects of communications and computer science. We will see that these concepts and their application in communication systems require a broad understanding of many disciplines. This will make cognitive radio very interesting, but at the same time make it a rather difficult subject. Cognitive radio is an intelligent processing program and adaptation of a wireless communication system. We use it here, based on environmental observations, as a processing engine. This part of the radio is called the cognitive engine. Following the description and development of the cognitive engine, we move on to the more general approaches to the use of learning techniques and artificial intelligence in wireless communication systems. Neural networks are the oldest form of AI in computer science. Recent advances in both hardware and software allow them to be used in more applications. Of particular importance are cognitive radios, neural networks provide the means for the detection and classification of signals and modulations.

Today, fixed, stereotyped signal processing algorithms are used in signal transmission systems. The basis of these algorithms are mathematical models that have been worked on by a number of eminent scientists.

The Fourier series consists of harmoniously sinusoids. Using such a function we are able to transmits signals through different harmonic oscillations so that even if these oscillations are superimposed on each other, we can still

mathematically detect all these oscillations. This model is designed only for systems of harmonic oscillations where the frequency of these oscillations is different. Unfortunately this harmony may be disturbed after the signal is formed, transmitted through radio components and transmitted. Harmonic oscillation changes shape. The change in shape leads to the formation of new harmonic constituents and interference to other signals because these harmonic constituents coincide with the frequency of the harmonic constituents of other signals.

We propose to add new functionality to radio systems that can intelligently process waves. In addition to existing algorithms and radio signal processing techniques, there will also be flexible adaptive mechanisms. SDR allows you to do this. Nowadays, the signal processing of radio units is done programmatically and not physically as it was before. All the leading manufacturers of base station radio units on the market already use SDRs. To some extent this means that the introduction of new modulations should theoretically be possible on existing devices.

As a result of modulation and demodulation, sideband components are formed, this is due to both mathematical modeling and transmission in non-ideal structure cable systems. As a result, the shape of the signal is changed and we receive additional noises after performing the fast Fourier transform function. We can see this from points on the spectrum. To compensate for the noise, we have proposed modulations generated by the neural network. The advantage of a neural network is its ability to adapt. After integrating the functionality of the neural network, we will be able to make individual algorithm optimizations according to the place and condition. This will give us high efficiency and increase the total capacity of the system.