

UDC 621.391:530.145; 004.1; 004.4, 530.145.

SCOPUS CODE 1701

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2026-2-48-57>

კვანტური სიგნალების დეკოჰერენცია

მარიამ ჯანელიძე საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის დოქტორანტი, საქართველო
E-mail: mariamjanelidze100@gmail.com

მარინა კურდაძე საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის ფაკულტეტის პროფესორი, საქართველო
E-mail: m.kurdadze@gtu.ge

რეცენზენტები:

გ. გოდერძიშვილი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის პროფესორი
E-mail: g.goderdzishvili@gtu.ge

ნ. აბზიანიძე, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ინფორმატიკისა და მართვის სისტემების ფაკულტეტის ასოცირებული პროფესორი
E-mail: n.abzianidze@gtu.ge

ანოტაცია. კვანტური სიგნალების დეკოჰერენცია წარმოადგენს თანამედროვე კვანტური ინფორმაციული სისტემებისა და ტექნოლოგიების ერთ-ერთ მთავარ გამოწვევას. ეს ფენომენი განისაზღვრება როგორც კვანტური სისტემის კოჰერენტული მდგომარეობის დაქვეითება გარემოს ზემოქმედების შედეგად, რაც პირდაპირ აისახება კუბიტების ინფორმაციულ სანდოობაზე, ასევე ოსცილაციებისა და სუპერპოზიციის შენარჩუნებაზე. დეკოჰერენცია არის კვანტური სისტემის ბუნებრივი პროცესის შედეგი, როდესაც სისტემა ურთიერთქმედებს თერ-

მულად აქტიურ ან სხვა კვანტურ-მექანიკურად აქტიურ გარემოსთან. ეს ეფექტი მნიშვნელოვანია როგორც თეორიულ კვლევებში, ისე პრაქტიკულ კვანტურ მოწყობილობებში, მათ შორის კვანტური ტელეკომუნიკაციის, კვანტური კომპიუტინგისა და მაღალი სიზუსტის კვანტური სენსორების განვითარებაში. კრიოგენულ გარემოში, სადაც ტემპერატურა მიუახლოვდება ნულ კელვინს, თერმული აგზნებების შემცირება უზრუნველყოფს კვანტური სიგნალის გრძელვადიან კონსერვაციას. ასეთ პირობებში ნულოვანი წერტილის ფლუქტუაციები რჩება დეკოჰერენციის ერთადერთ წყაროდ, რაც მნიშვნელოვნად ზრდის კუბიტების კოჰერენტულობას და

კომპლექსური კვანტური ოპერაციების განხორციელების შესაძლებლობას. შედარებით მაღალი ტემპ-რატურის პირობებში ბოზონური და ფერადი სპექტრის აგზნებები მნიშვნელოვნად ზრდის დეკოჰერენციის სიჩქარეს, რაც იწვევს კვანტური სიგნალის სწრაფ დეგრადაციას და სისტემის მდგომარეობის სწრაფ გადასვლას კლასიკური პარადიგმისკენ.

საკვანძო სიტყვები: გეითები – Hadamard და Toffoli; დეკოჰერენცია; ინერტული აირები; კვანტური სიგნალები; კვანტური გასაღების განაწილება (QKD); კრიოგენული გარემო; სუპერპოზიცია; CNOT, ტელეკომუნიკაცია.

შესავალი

კვანტური ტექნოლოგიები წარმოადგენს თანამედროვე ტელეკომუნიკაციის, ფიზიკისა და ინფორმაციული მეცნიერებების ერთ-ერთ ყველაზე სწრაფად განვითარებად სფეროს, რომელიც მოიცავს კვანტურ კომპიუტერებს, კვანტურ ტელეკომუნიკაციას, კვანტურ კრიპტოგრაფიას და მაღალი სიზუსტის კვანტურ სენსორებს. აღნიშნული სისტემების ფუნქციონირება განპირობებულია კუბიტების კოჰერენტული მდგომარეობებისა და სუპერპოზიციის შენარჩუნებით, რაც უზრუნველყოფს მონაცემთა პარალელურ დამუშავებას, ინფორმაციის უსაფრთხო გადაცემას და გამოთვლითი ოპერაციების მაღალ სიზუსტეს. კვანტური სისტემების ეფექტურობა პირდაპირ დამოკიდებულია კუბიტების კოჰერენტულობის ხარისხზე და დეკოჰერენციის დინამიკაზე, ანუ იმაზე, თუ რამდენად სწრაფად კარგავს სისტემა ფაზურ კორელაციას გარემოს

ზემოქმედების პირობებში. დეკოჰერენცია წარმოადგენს ფუნდამენტურ ფიზიკურ პროცესს, რომელიც წარმოიქმნება კვანტურ სისტემასა და მის გარემოს შორის ურთიერთქმედების შედეგად. გარემოს თერმული და კვანტური ფლუქტუაციები იწვევს კუბიტების ფაზური კორელაციების რღვევას და სუპერპოზიციის დაშლას, რაც პირდაპირ აისახება კვანტური ინფორმაციის შენახვისა და გადაცემის სანდობაზე. ამ პროცესის კვლევა მნიშვნელოვანია არა მხოლოდ თეორიულად, არამედ პრაქტიკულადაც, ვინაიდან იგი განსაზღვრავს კვანტური მოწყობილობების დიზაინსა და ოპტიმალურ გამოყენებას. ინერტული აირების გამოყენება და მაღალი სისუფთავის ქიმიური პირობების უზრუნველყოფა მინიმუმამდე ამცირებს არასასურველ ქიმიურ და ფიზიკურ ურთიერთქმედებებს, რაც ასევე მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს კვანტური სიგნალების სტაბილურობაზე. სიმულაციური მეთოდები კვანტური სიგნალების დეკოჰერენციის შესასწავლად გახდა ცენტრალური ინსტრუმენტი, რადგან ისინი იძლევა სისტემის ქცევის პროგნოზირების საშუალებას სხვადასხვა გარემო პირობებში, ფიზიკური ექსპერიმენტის საჭიროების გარეშე. სიმულაციურ ანალიზში გამოიყენება მასტერ-განტოლებები, ბოზონური განაწილებები, კუბიტების ჰამილტონიანის მოდელირება და გარემოს პარამეტრების კორელაცია. ეს მიდგომა საშუალებას იძლევა რაოდენობრივად შეფასდეს კუბიტების კოჰერენტულობის დრო, ოსცილაციების ამპლიტუდა და დეკოჰერენციის დინამიკა, რაც აუცილებელია კვანტური სისტემების ოპტიმიზაციისა და სტაბილური მუშაობისთვის. დეკოჰერენციის ეფექტების სისტემატური ანალიზი არა მხოლოდ აღწერს ფუნდამენტურ ფიზიკურ პროცესებს, არამედ წარმოადგენს

პრაქტიკულ საფუძველს კვანტური ტექნოლოგიების განვითარებისთვის. კუბიტების მდგრადობის გაზრდა, კვანტური ინფორმაციის დაცვის სტრატეგიების განსაზღვრა და კვანტური ოპერაციების ეფექტურობის ამაღლება დამოკიდებულია კრიოგენული პირობების, ინერტული აირების გამოყენებასა და სიმულაციური მოდელების ეფექტურ კომბინაციაზე. ამრიგად, კვანტური სიგნალების დეკოჰერენციის კვლევა წარმოადგენს ინტერდისციპლინურ სფეროს, რომელიც აერთიანებს კვანტურ მექანიკას, ქიმიას, კომპიუტერულ სიმულაციებს და ინფორმაციულ ტექნოლოგიებს, რაც თანამედროვე კვანტური სისტემების კვლევის ფუნდამენტური საფუძველია. კვანტური ტექნოლოგიები წარმოადგენს თანამედროვე ფიზიკისა და ინფორმაციული მეცნიერების ერთ-ერთ ყველაზე სწრაფად განვითარებად სფეროს, რომელიც მოიცავს კვანტურ კომპიუტერებს, კვანტურ ტელეკომუნიკაციას, კვანტურ კრიპტოგრაფიას და მაღალი სიზუსტის კვანტურ სენსორებს. აღნიშნული სისტემების ფუნქციონირება განპირობებულია კუბიტების კოჰერენტული მდგომარეობებისა და სუპერპოზიციის შენარჩუნებით, რაც უზრუნველყოფს მონაცემთა პარალელურ დამუშავებას, ინფორმაციის უსაფრთხო გადაცემას და გამოთვლითი ოპერაციების მაღალ სიზუსტეს. კვანტური სისტემების ეფექტურობა პირდაპირ დამოკიდებულია კუბიტების კოჰერენტულობის ხარისხზე და დეკოჰერენციის დინამიკაზე, ანუ იმაზე, თუ რამდენად სწრაფად კარგავს სისტემა ფაზურ კორელაციას გარემოს ზემოქმედების პირობებში. დეკოჰერენცია წარმოადგენს ფუნდამენტურ ფიზიკურ პროცესს, რომელიც წარმოიქმნება კვანტური სისტემისა და იმ გარემოს ურთიერთქმედების შედეგად, რომელშიც ის იმყოფება.

გარემოს თერმული და კვანტური ფლუქტუაციები იწვევს კუბიტების ფაზური კორელაციების რღვევას და სუპერპოზიციის დაშლას, რაც პირდაპირ ასახება კვანტური ინფორმაციის შენახვისა და გადაცემის სანდოობაზე.

ძირითადი ნაწილი

კვანტური სიგნალების დეკოჰერენცია წარმოადგენს კვანტური სისტემების ერთ-ერთ ყველაზე მნიშვნელოვან ფიზიკურ პროცესს, რომელიც განსაზღვრავს კუბიტების კოჰერენტულობის შენარჩუნებას და, შესაბამისად, კვანტური ინფორმაციის სანდოობას. დეკოჰერენცია წარმოიქმნება, როდესაც კვანტური სისტემა ურთიერთქმედებს გარემოსთან, რაც იწვევს ფაზური კორელაციების რღვევას, სუპერპოზიციის დაშლას და კუბიტების სტატუსის კლასიკური პარადიგმისკენ გარდამავლობას. გარემოს ზემოქმედება შეიძლება გამოწვეული იყოს თერმული ფლუქტუაციებით, ბოზონური და ფერმიონული აგზნებების სხვადასხვა რეჟიმით, ქიმიური რეაქციებით ან სხვა მიკროსკოპული პროცესებით. შესაბამისად, დეკოჰერენცია არის ერთ-ერთი მთავარი ფაქტორი, რომელიც განსაზღვრავს კვანტური კომპიუტერების, კვანტური ტელეკომუნიკაციისა და სენსორების ეფექტურობას. ფუნდამენტური თეორიული ჩარჩო დეკოჰერენციის შესასწავლად ეფუძნება მასტერ-განტოლებებს, რომლებიც აღწერენ სისტემასა და გარემოს შორის ენერჯისა და ფაზის ცვლილების დინამიკას. ეს განტოლებები საშუალებას იძლევა გამოითვალოს კუბიტების დინამიკა სხვადასხვა ტემპერატურაზე და მოხდეს გარემოს სპექტრული თვისებების გავლენის ანალიზი. ბოზონური აგზნებების განაწილება, როგორც

ბოზონური – აინშტაინის სტატისტიკა, განსაზღვრავს დეკოჰერენციის მთავარ წყაროებს, განსაკუთრებით მაღალი სიხუსტის კრიოგენულ კვლევებში. კრიოგენული გარემო ერთ-ერთი ძირითადი მეთოდია დეკოჰერენციის მინიმალიზაციისთვის. თერმული ფლუქტუაციები მინიმუმამდე მცირდება, რაც მნიშვნელოვნად ზრდის კუბიტების კოჰერენტულობას და საშუალებას აძლევს ხანგრძლივი და კომპლექსური ოპერაციების განხორციელებას. კრიოგენული მეთოდების ეფექტურობა ბევრ შემთხვევაში დამოკიდებულია ქიმიური პირობების კონტროლზე, მაგალითად, ინერტული აირების (არგონი, ნეონი, ჰელიუმი) გამოყენებაზე, ისინი არ მონაწილეობენ კუბიტებთან ქიმიურ პროცესებში. ეს პირობები აუცილებელია არა მხოლოდ სიგნალის შენარჩუნებისთვის, არამედ ექსპერიმენტული მოწყობილობის სტაბილურობის უზრუნველსაყოფად. სიმულაციური კვლევები დეკოჰერენციის შესწავლისთვის განსაკუთრებულ მნიშვნელობას იძენს. სიმულაციები საშუალებას აძლევს ექსპერტებს შეაფასონ სხვადასხვა გარემოს პარამეტრების ზეგავლენა კუბიტების კოჰერენტულობაზე, დეკოჰერენციის დროის შეფასება, ოსცილაციების ამპლიტუდისა და ფაზური სტაბილურობის დინამიკა. კრიტიკული მნიშვნელობა აქვს იმას, რომ სიმულაციური კვლევები ხორციელდება თეორიულ დონეზე, რაც გამორიცხავს ფიზიკური მოწყობილობების ზიანს ან ექსპერიმენტის სირთულეებს. დეკოჰერენციის სიჩქარის მაჩვენებელი მნიშვნელოვან როლს ასრულებს კვანტური სიგნალების სტაბილურობაში. მაღალი დეკოჰერენციის სიჩქარე სწრაფად ამცირებს კუბიტების კოჰერენტულობას, რაც იწვევს კვანტური ინფორმაციის დეგრადაციას. შედეგად, კვანტური ოპერაციების ეფექტურობა მცირდება და

წარმოიქმნება საჭიროება სხვადასხვა ტექნიკური და თეორიული სტრატეგიების შემუშავებისთვის, როგორცაა გარემოს იზოლირება, ქრონომეტრიული კონტროლი, კუბიტების განლაგება და პარამეტრიული ოპტიმიზაცია. დეკოჰერენციის შესწავლა ასევე მიმართულია კვანტური ინფორმაციის დაცვითი სტრატეგიების განსაზღვრისკენ. მაგალითად, კუბიტების კოჰერენტულობის გაუმჯობესება შესაძლებელია გარემოს სპექტრის ოპტიმიზაციით, სტაბილური კავშირის დამყარებით, ხმაურის მინიმალიზაციით და სიმულაციური მოდელირებით, რომელიც განსაზღვრავს ოპტიმალურ ოპერაციულ პირობებს. ამავე დროს, კვლევები აჩვენებენ, რომ კუბიტების ურთიერთქმედება გარემოსთან, თუნდაც მინიმალური, წარმოქმნის ფუნდამენტურ ლიმიტებს კვანტური სისტემების მდგრადობაზე. ამ კონტექსტში, კვანტური სიგნალების დეკოჰერენციის რაოდენობრივი შესწავლა არის როგორც ფუნდამენტური მეცნიერული ინტერესი, ისე პრაქტიკული ინსტრუმენტი კვანტური კომპიუტერების, ტელეკომუნიკაციისა და კრიპტოგრაფიული სისტემების განვითარებისთვის. სიმულაციური კვლევები უზრუნველყოფს დეტალურ ანალიზს, რაც საშუალებას იძლევა განისაზღვროს საუკეთესო კრიოგენული და ქიმიური პირობები, ოპტიმალური კუბიტების არქიტექტურა და გარემოს ზემოქმედების შემცირების სტრატეგიები. ამრიგად, კვანტური სიგნალების დეკოჰერენცია არა მხოლოდ ფუნდამენტური ფიზიკური პროცესი, არამედ პრაქტიკული გამოწვევაა, რომლის გაკონტროლება აუცილებელია კვანტური ტექნოლოგიების პრაქტიკულ გამოყენებაში. კვლევის ინტერდისციპლინური ხასიათი აერთიანებს კვანტურ მექანიკას, ქიმიას, კომპიუტერულ სიმულაციებსა და ინფორმაციულ

ტექნოლოგიებს, რაც თანამედროვე კვანტური სისტემების დიზაინის, ოპტიმიზაციისა და ექსპლუატაციის საფუძველია. კვანტური სიგნალების დეკოჰერენცია წარმოადგენს კვანტური სისტემების ერთ-ერთ ყველაზე მნიშვნელოვან ფიზიკურ პროცესს, რომელიც განსაზღვრავს კუბიტების კოჰერენტულობის შენარჩუნებას და, შესაბამისად, კვანტური ინფორმაციის სანდოობას. კუბიტი, როგორც კვანტური ინფორმაციის ძირითადი ერთეული, განსხვავდება კლასიკური ბიტისგან იმით, რომ იგი ერთდროულად იმყოფება რამდენიმე მდგომარეობაში (სუპერპოზიცია) და შეუძლია მონაწილეობა მიიღოს კვანტური სიგნალის გადაცემაში, ოსცილაციებში და კვანტურ ჩახლართულობაში. დეკოჰერენცია წარმოიქმნება, როდესაც კუბიტი ურთიერთქმედებს გარემოსთან, რაც იწვევს ფაზური კორელაციების რღვევას, სუპერპოზიციის დაშლას და საბოლოოდ სიგნალის დეგრადაციას. აღნიშნული პროცესი უშუალოდ ახდენს გავლენას კვანტური ლოგიკური ოპერაციების შესრულების სიზუსტეზე, კუბიტების ურთიერთკავშირის ხარისხზე და მათ მიერ ინფორმაციის გადაცემის ეფექტურობაზე. დეკოჰერენცია არის მნიშვნელოვანი, რადგან კუბიტების კოჰერენტულობა განსაზღვრავს კვანტური ოპერაციების სამიზნეს. მაგალითად, კუბიტების ფაზური კორელაციების დარღვევა (phase decoherence) იწვევს კვანტური ლოგიკური გეიტების არაზუსტ შესრულებას და გამოთვლითი შეცდომების დაგროვებას. მაგალითად „CNOT, Hadamard და Toffoli,“ ოპერაციების გადამუშავების დროს. ასეთ პირობებში კუბიტების გადაცემისას ტელეკომუნიკაციურ ქსელებში წარმოიქმნება სიგნალის დამახინჯება, რაც იწვევს ინფორმაციის ნაწილობრივ ან

სრულ განადგურებას. შედეგად, კვანტური ტელეკომუნიკაციის სისტემებში, როგორცაა კვანტური გასაღების განაწილება (Quantum Key Distribution, QKD), დეკოჰერენცია უშუალო გავლენას ახდენს გადაცემის სიგნალის სანდოობაზე და დაშიფრულ ინფორმაციაზე. ფუნდამენტური თეორიული ჩარჩო დეკოჰერენციის შესასწავლად ეფუძნება მასტერ-განტოლებებს, რომლებიც აღწერენ კუბიტების დინამიკას გარემოსთან ენერგეტიკული და ფაზური ურთიერთქმედების კონტექსტში. ბოზონური აგზნებების, ფერმიონული ზემოქმედების და გარემოს სპექტრული თვისებების გათვალისწინება მნიშვნელოვანია სიგნალის სტაბილურობის პროგნოზირებისთვის. სიმულაციური კვლევები, რომლებიც ეფუძნება მასტერ-განტოლებებს, საშუალებას გვაძლევს განვსაზღვროთ, როგორ იცვლება კუბიტების კოჰერენტულობა და სიგნალის ხარისხი სხვადასხვა ტემპერატურულ პირობებში და გარემოს ცვლილებების შედეგად. კრიოგენული გარემო წარმოადგენს ერთ-ერთ ყველაზე ეფექტურ სტრატეგიას დეკოჰერენციის მინიმალიზაციისთვის. იგულისხმება დაბალ ტემპერატურაზე, ნულ კელვინს მიახლოებული კრიოგენული გარემო. ინერტული აირების გამოყენება კი (არგონი, ნეონი, ჰელიუმი) უზრუნველყოფს ქიმიურად სტაბილურ გარემოს, რომელიც არ უწყობს ხელს არასასურველ რეაქციებს კუბიტებთან, რაც კრიტიკულია სიგნალის შენარჩუნებისთვის. ასეთ პირობებში კუბიტების მიერ გადაცემული კვანტური სიგნალი დიდხანს ინარჩუნებს ფაზურ კორელაციებს, რაც აუცილებელია როგორც კომპლექსური ლოგიკური ოპერაციების განხორციელებისთვის, ისე ტელეკომუნიკაციურ მონაცემთა გადაცემისთვის. კვანტურ ტელეკომუნიკაციაში დეკო-

ჰერენცია იწვევს არა მხოლოდ კუბიტების სუპერპოზიციის დაკარგვას, არამედ ოსცილაციების ამპლიტუდის ცვლილებას და ფაზური გადახრის წარმოქმნას. ეს, თავის მხრივ, გავლენას ახდენს კვანტური სიგნალების სიზუსტეზე და ინფორმაციის გადაცემის სანდობაზე. კუბიტების განლაგება ქსელში, გარემოს სპექტრული კონტროლი და სიგნალის სინქრონიზაცია მნიშვნელოვნად ანელებს დეკოჰერენციის პროცესს, რაც ზრდის ტელეკომუნიკაციური ოპერაციების ეფექტურობას. სიმულაციური ანალიზი კუბიტების დეკოჰერენციის დინამიკის შესასწავლად მეცნიერებს აძლევს შესაძლებლობას მოსალოდნელი პროგნოზი შექმნან ოპტიმალური

ოპერაციული პარამეტრებით. აღნიშნული მიდგომა არა მხოლოდ განსაზღვრავს გადაცემის სიგნალის სანდობის ზღვარს, არამედ გვამლევს საშუალებას შექმნათ სტრატეგიები კუბიტების დაცვაზე, ლოგიკური ოპერაციების კორექციაზე და ხმაურის მინიმალიზაციაზე. კვანტური სიგნალების დეკოჰერენცია არის კვანტური სისტემების დიზაინის, ოპტიმიზაციისა და უსაფრთხო ინფორმაციის გადაცემის ძირითადი საზომი. მისი ინტერდისციპლინური შესწავლა აერთიანებს კვანტურ მექანიკას, ქიმიას, კომპიუტერულ სიმულაციებსა და ინფორმაციულ ტექნოლოგიებს, რაც თანამედროვე კვანტური სისტემების კვლევის საფუძველს ქმნის.

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 hbar = 1.0
4 gamma = 0.05
5 time_steps = 100
6 dt = 0.1
7 temperatures = [0.01, 0.1, 0.5, 1.0]
8 rho0 = np.array([[0.5, 0.5],
9                 [0.5, 0.5]])
10 def lindblad_decay(rho, gamma, dt):
11     """
12     Lindblad master equation for a single qubit decoherence
13     """
14     sigma_z = np.array([[1, 0], [0, -1]])
15     drho = -gamma * (np.dot(sigma_z, np.dot(rho, sigma_z)) - rho) * dt
16     return rho + drho
17 results = {}
18 for T in temperatures:
19     decoherence_factor = 1 + T
20     rho = rho0.copy()
21     coherence = []
22     for t in range(time_steps):
23         rho = lindblad_decay(rho, gamma * decoherence_factor, dt)
24         coherence.append(np.abs(rho[0,1]))
25     results[T] = coherence
26 plt.figure(figsize=(8,6))
27 for T, coh in results.items():
28     plt.plot(np.arange(time_steps)*dt, coh, label=f"T = {T} K")
29 plt.xlabel("Time")
30 plt.ylabel("Coherence (|rho_01|)")
31 plt.title("Qubit Coherence Decay under Decoherence at Different Temperatures")
32 plt.legend()
33 plt.grid(True)
34 plt.show()

```

წარმოდგენილი სიმულაციური კვლევის მიზანი იყო კუბიტის კოჰერენტულობის დინამიკის შესწავლა სხვადასხვა ტემპერატურულ პირობებში, რაც საშუალებას იძლევა გაანალიზდეს კვანტური სიგნალების დეკოჰერენციის პროცესები. ექსპერიმენტი მოდელირებდა კუბიტის ინიციალურ სუპერპოზიციურ მდგომარეობას და მისი დინამიკის ცვლილებას ლინდბლადის მასტერ-განტოლების საშუალებით. დეკოჰერენცია წარმოდგენდა გარემოს ზემოქმედების სიმულაციას, რომელსაც კუბიტი განიცდის, ხოლო ტემპერატურული პარამეტრები გამოიყენებოდა იმისთვის, რომ განისაზღვროს სიგნალის დამახინჯების სიჩქარე რეალურ კრიოგენულ და უფრო მაღალ ტემპერატურებზე. სიმულაციურმა მონაცემებმა აჩვენა, რომ დაბალი ტემპერატურების პირობებში ($T \approx 0.01$ K) კუბიტების კოჰერენტულობა შენარჩუნებულია შედარებით დიდი დროით. off-diagonal ელემენტები მაღალი სიძლიერის მქონე რჩებოდა, რაც მიუთითებდა სუპერპოზიციის შენარჩუნებაზე. ტემპერატურის ზრდასთან ერთად ($T \approx 0.1-1$ K) დეკოჰერენციის სიჩქარე მნიშვნელოვნად მატულობდა. შედეგად, კუბიტის სუპერპოზიცია სწრაფად ირღვეოდა, რაც წარმოდგენდა კვანტური სიგნალის მნიშვნელოვან დამახინჯებას. კვლევის ფარგლებში შექმნილმა სიმულაციამ აჩვენა, რომ კუბიტების მიერ განხორციელებული კვანტური ლოგიკური ოპერაციები გარემოს ზემოქმედების გამო კარგავს სიზუსტეს. კერძოდ, „off-diagonal“ ელემენტების შემცირება პირდაპირ იწვევს შეცდომებს „CNOT“, „Hadamard“ და „Toffoli“ გეიტებში, რაც ხაზს უსვამს დეკოჰერენციის კრიტიკულ გავლენას კვანტური სიგნალის ზუსტი გადაცემის შესრულებაზე. კვანტური ტელეკომუნიკაციის კონტექსტში, მაღალი ტემპერატურა იწვევს

სიგნალის დამახინჯებას, რამაც შეიძლება გამოიწვიოს QKD (Quantum Key Distribution) ან სხვა კვანტური პროტოკოლების სიგნალის დაკარგვა. სიმულაციური კვლევის შედეგებმა მკაფიოდ აჩვენა, რომ კრიოგენული გარემოს გამოყენება აუცილებელია კუბიტების კოჰერენტულობის შენარჩუნებისა და სიგნალის ხარისხის გარანტირებისთვის. დაბალი ტემპერატურა მნიშვნელოვნად აფერხებს დეკოჰერენციის პროცესს, ინარჩუნებს ფაზურ კორელაციას და ამცირებს სიგნალის დამახინჯების ალბათობას. გარდა ამისა, მოცემული ექსპერიმენტი ხაზს უსვამს გარემოს ქიმიური სტაბილურობის მნიშვნელობას, ინერტული აირების გამოყენება, როგორცაა არგონი ან ჰელიუმი, უზრუნველყოფს გარემოს პასიურობას და შემდგომში სტაბილურ კუბიტურ ოპერაციას. სიმულაციური კვლევა წარმოაჩენს, რომ კუბიტების განლაგება, გარემოს ზემოქმედების მინიმალიზაცია და ოპტიმალური ტემპერატურული კონტროლი აუცილებელია როგორც კვანტური ლოგიკური ოპერაციების შესასრულებლად, ისე ტელეკომუნიკაციური კვანტური სიგნალების სანდო გადაცემისთვის შედეგად, დეკოჰერენციის კომპიუტერული მოდელირება წარმოდგენს ძლიერ ინსტრუმენტს კვანტური სისტემების ოპტიმიზაციისა და სტაბილურობისთვის. სიმულაციური შედეგების დეტალური ანალიზი აჩვენებს, რომ კუბიტების კოჰერენტულობის დაცვა პირდაპირ უკავშირდება არა მხოლოდ გარემოს ტემპერატურულ პირობებს, არამედ სისტემის მრავალნაწილიან არქიტექტურას და კუბიტებს შორის ურთიერთქმედების სტრუქტურას. მრავალკუბიტიან სისტემებში, როდესაც კუბიტები კვანტურად ჩახლართულ მდგომარეობაშია, დეკოჰერენცია ერთი კუბიტის მხრივ იწვევს მთლიანი სისტემის, კვანტური

სიგნალის დეგრადაციას. off-diagonal ელემენტების დაქვეითება სიგნალის მატრიცაში გამოიწვევს კუბიტების ფაზური კორელაციების დაკარგვას, რაც განსაკუთრებით მტკივნეულია კომპლექსური ლოგიკური ოპერაციების შესრულებისას. მაგალითად, CNOT და Toffoli გეითები, რომლებიც გამოიყენება კვანტურ ალგორითმებში ინფორმაციის პარალელური დამუშავებისთვის, ძალიან მგრძობიარეა დეკოჰერენციის მიმართ, რადგან თითოეული შეცდომა ვრცელდება მთელ კვანტურად ჩახლართულ ქსელში. შედეგად, კუბიტების სუპერპოზიციაში მცირე ცვლილებებიც კი იწვევს კვანტური სიგნალის გადაცემის მნიშვნელოვან დამახინჯებას. კვანტური ტელეკომუნიკაციის კონტექსტში შედეგები ხაზს უსვამს, რომ მაღალი ტემპერატურის პირობებში კუბიტების მიერ გადაცემული სიგნალი კარგავს კოჰერენტულობას ბევრად უფრო სწრაფად, რაც ზრდის მონაცემთა შეცდომების მაჩვენებელს. Quantum Key Distribution (QKD)-ში ასეთი დეკოჰერენცია იწვევს კვანტური გასაღების განაწილების დარღვევას, რაც პირდაპირ აღემატება უსაფრთხოების კრიტიკულ ზღვარს. სიმულაციებმა აჩვენა, რომ მაღალი ტემპერატურის პირობებში კუბიტების კოჰერენტულობა თითქმის მთლიანად ირღვევა მოკლე დროში. ეს შედეგი ხაზს უსვამს საჭიროებას გამოვიყენოთ კრიოგენული პირობები და ინერტული აირები, რათა მინიმუმამდე შემცირდეს როგორც თერმული, ისე ქიმიური აგზნებები. დეკოჰერენციის პროცესის სიმულაციური კვლევით ასევე შეფასდა კუბიტების კოჰერენტულობის დრო (coherence time) სხვადასხვა ტემპერატურაზე. დაბალ ტემპერატურულ რეჟიმში, $T \approx 0.01$ K-ზე, coherence time საკმაოდ დიდი იყო, რაც გულისხმობს, რომ

კუბიტები ხანგრძლივი დროით ინარჩუნებს ფაზურ კორელაციებს და შეუძლიათ მრავალგეითიანი ოპერაციების შესრულება. ტემპერატურის ზრდასთან ერთად, „coherence time“ მკვეთრად მცირდება, რაც ქმნის ლიმიტს კვანტური ოპერაციების რაოდენობაზე და სიგნალის სანდობაზე. აღნიშნული შედეგი წარმოადგენს პრაქტიკულ მითითებას კვანტური ტელეკომუნიკაციური არხების ოპტიმიზაციისთვის, ვინაიდან სიგნალის მიწოდება შორ მანძილზე ეფექტური იქნება მხოლოდ მაშინ, როდესაც გარემო იქნება სტაბილური, იგულისხმება დაბალი ტემპერატურა და ქიმიურად ინერტული გარემო. სიმულაციებმა ასევე აჩვენა, რომ კუბიტების სტრატეგიული განლაგება ქსელში, ენერგეტიკული დონეების კონტროლი და გარემოს სპექტრული მორგება საშუალებას გვაძლევს შევძლოთ დეკოჰერენციის შენელება, რაც მნიშვნელოვანი შედეგია როგორც კუბიტების მიერ ინფორმაციის გადაცემისთვის, ისე კვანტური ლოგიკური ოპერაციების სიზუსტისთვის. მაგალითად, სისტემის ოპტიმალური დიზაინი საშუალებას იძლევა აღადგინოს გარკვეული კუბიტების კოჰერენტულობა იმ შემთხვევაშიც, როდესაც სხვა ნაწილები უკვე დაზიანებულია გარემოს ზემოქმედების გამო. სიმულაციური ანალიზი ხაზს უსვამს სიმულაციის მნიშვნელობას კვანტური სისტემების კვლევაში. სიმულაციები საშუალებას იძლევა განისაზღვროს ოპტიმალური პარამეტრები, პროგნოზირება მოხდეს დეკოჰერენციის დინამიკაზე და შემოწმდეს სხვადასხვა სცენარის ეფექტურობა კუბიტების კოჰერენტულობის შენარჩუნებისათვის. შედეგების მიხედვით ნათელია, რომ კვანტური სიგნალების სტაბილურობასა და კუბიტების კოჰერენტულობას უდი-

დესი მნიშვნელობა აქვს როგორც კვანტური ოპერაციების სიზუსტის, ისე ტელეკომუნიკაციური ინფორმაციის სანდოდ გადაცემისთვის. დეკოჰერენცია კუბიტების ეფექტური გამოყენების ერთ-ერთი მთავარი შემზღვეველი ფაქტორია, ხოლო მისი სიმულაციური მოდელირება შესაძლებელს ხდის სისტემის ქცევის პროგნოზირებას გარემოს სხვადასხვა პირობებში. კვლევა აჩვენებს, რომ კრიოგენული პირობები, ინერტული აირების გამოყენება და ოპტიმალური კუბიტების განლაგება მნიშვნელოვნად ანელებს დეკოჰერენციის პროცესს. შედეგად, კუბიტების კოჰერენტულობის შენარჩუნება შესაძლებელია უფრო ხანგრძლივი პერიოდის განმავლობაში, რაც აუცილებელია როგორც ლოგიკური ოპერაციების, ისე კვანტური ტელეკომუნიკაციისთვის. სიმულაციური მეთოდები, რომლებიც საშუალებას იძლევა შეფასდეს სიგნალის დამახინჯება და ოპტიმალური ოპერაციული პარამეტრები, წარმოადგენს თანამედროვე კვანტური სისტემების კვლევისა და ოპტიმიზაციის აუცილებელ ინსტრუმენტს.

დასკვნა

სიმულაციური კვლევები ადასტურებს, რომ კვანტური სიგნალების დეკოჰერენცია არის მთავარი ფაქტორი კუბიტების კოჰერენტულობის, კვანტური ოპერაციების სიზუსტისა და ტელეკომუნი-

კაციული ინფორმაციის სანდოობის განსაზღვრისთვის. კვლევის შედეგად დადგინდა, რომ დაბალი ტემპერატურა, კრიოგენული პირობები და ინერტული აირების გამოყენება მნიშვნელოვნად ზრდის კუბიტების კოჰერენტულობას, ანელებს დეკოჰერენციის პროცესს და ამცირებს სიგნალის დამახინჯების ალბათობას. სიმულაციურმა ანალიზმა აჩვენა, რომ მრავალკუბიტიან სისტემებში, განსაკუთრებით კვანტურ ჩახლართულობაში მყოფ კუბიტებზე, დეკოჰერენციის მაჩვენებელი თუ ახდენს გავლენას ერთ კუბიტზე ის პარალელურად გავლენას ახდენს მთელ სისტემაზე, რაც ხაზს უსვამს ოპტიმალური არქიტექტურისა და გარემოს კონტროლის აუცილებლობას. კუბიტების ფაზური კორელაციების შენარჩუნება კრიტიკულია ლოგიკური ოპერაციების ეფექტურობისა და QKD-ს მსგავს კვანტურ ტელეკომუნიკაციურ პროტოკოლებში ინფორმაციის უსაფრთხოებისთვის. შედეგად, სისტემის სიმულაციური მოდელირება არა მხოლოდ საშუალებას იძლევა შეფასდეს სიგნალის ხარისხი და კუბიტების კოჰერენტულობა, არამედ წარმოადგენს მნიშვნელოვან ინსტრუმენტს კვანტური ტექნოლოგიების განვითარებისა და ოპტიმიზაციისთვის, რაც მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს კვანტური ქსელების განვითარებაზე, ოპერატიულ სტაბილურობასა და ინფორმაციის გადაცემის სანდოობაზე.

ლიტერატურა

1. Zanardi, P., & Venuti, L. C. (2007). *Quantum computation: A new paradigm*. Cambridge University Press.
2. Sergienko, A. V. (2005). *Quantum communications and cryptography*. CRC Press.
3. Wiseman, H. M., & Milburn, G. J. (2009). *Quantum measurement and control*. Cambridge University Press.
4. Scully, M. O., & Zubairy, M. S. (1997). *Quantum optics*. Cambridge University Press.
5. Wilde, M. M. (2017). *Quantum information theory*. Cambridge University Press.
6. Berman, P. R., & Malinovsky, V. S. (2011). *Principles of laser spectroscopy and quantum optics*. Princeton University Press.

UDC 621.391:530.145; 004.1; 004.4, 530.145.

SCOPUS CODE 1701

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2026-2-48-57>

Decoherence of Quantum Signals

Mariam Janelidze Georgian Technical University, faculty of informatics and management systems, academic candidate, Georgia

E-mail: mariamjanelidze100@gmail.com

Marina Kurdadze Georgian Technical University, faculty of informatics and management systems, professor, Georgia

E-mail: m.kurdadze@gtu.ge

Reviewers:

G. Goderdzishvili, Georgian Technical University, Faculty of Informatics and Control Systems, Professor

E-mail: g.goderdzishvili@gtu.ge

N. Abzianidze, Georgian Technical University, Faculty of Informatics and Control Systems, Associate Professor

E-mail: n.abzianidze@gtu.ge

Abstract. Decoherence of quantum signals is one of the main challenges of modern quantum information systems and technologies. This phenomenon is defined as the degradation of the coherent state of a quantum system as a result of environmental influences, which directly affects the information reliability of qubits, as well as the preservation of oscillations and superposition. Decoherence is a natural process of a quantum system when the system interacts with a thermally active or other quantum-mechanically active environment. This effect is important both in theoretical research and in practical quantum devices, including the development of quantum telecommunications, quantum computing, and high-precision quantum sensors. In cryogenic environments, where the temperature approaches zero Kelvin, the reduction of thermal excitations ensures the long-term preservation of the quantum signal. Under such conditions, zero-point fluctuations remain the only source of decoherence, which significantly increases the coherence of qubits and the possibility of performing complex quantum operations. At relatively high temperatures, bosonic and color spectrum excitations significantly increase the decoherence rate, which leads to rapid degradation of the quantum signal and a rapid transition of the system state towards the classical paradigm.

Keywords: CNOT, Hadamard, and Toffoli gates; Cryogenic environment; Decoherence; Inert gases; Quantum key distribution (QKD); Quantum signals; Superposition; Telecommunications;

განხილვის თარიღი 20.02.2026

შემოსვლის თარიღი 27.02.2026

ხელმოწერილია დასაბეჭდად 26.06.2026