

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის  
თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ვასილ ალექსის ძე ტაბატაძე

დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდის გამოყენება  
შებრუნებული ამოცანებისა და  
ფოტონური კრისტალების კომპიუტერული მოდელირებისთვის  
ხელმძღვანელები:  
რ. ზარიძე  
ფიზ. მათ. მეცნიერებათა დოქტორი, პროფესორი  
დ. კაკულია  
ფიზ. მათ. მეცნიერებათა კანდიდატი,  
დოქტორი



თბილისის  
უნივერსიტეტის  
გამომცემლობა

2008

## სარჩევი

<b>შესავალი</b> .....	3
<b>თავი I დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი</b>	
§1.1 დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი და გაბნეული ველის განსაკუთრებულობები.....	7
§1.2 დგმ-ს გამოყენება ველის აღდგენისთვის და გაბნეული ველის განსაკუთრებულობების ვიზუალიზაციისათვის .....	9
§1.3 დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი ფოტონური კრისტალების მოდელირებისას.....	11
§1.4 ფოტოგრაფიული მეთოდი .....	13
§1.5 ჰოლოგრაფიული მეთოდი .....	16
<b>თავი II შებრუნებული ამოცანების ამოხსნა</b>	
ზოგადი მიმოხილვა.....	18
§2.1 მიწის მახასიათებლის აღდგენა .....	20
<b>შებრუნებული ამოცანების ამოხსნა ჰოლოგრაფიული მეთოდის საშუალებით</b>	
§2.2 წყაროთა ველის აღდგენა.....	27
§2.3 სხეულის ზედაპირის აღდგენა.....	30
§2.4 ჩაძირული სხეულის ზედაპირის აღდგენა .....	36
§2.5 სეგმენტზე ველის ინტერპოლაცია .....	40
§2.6 მიწის შთანთქმის უნარიანობის დამოკიდებულება სხეულის ჩაძირვის სიღრმეზე.....	41
<b>შებრუნებული ამოცანების ამოხსნა ფოტოგრაფიული მეთოდის საშუალებით</b>	
§2.7 ლინზის თვისებების გამოკვლევა .....	45
§2.8 სხეულის მდებარეობისა და ზედაპირის განსაზღვრა .....	47
§2.9 კუბის ზედაპირის აღდგენა .....	49
§2.10 საგნის გარჩევის უნარიანობის დამოკიდებულება ლინზიდან მანძილზე..	51
§2.11 ტოროიდის ზედაპირის აღდგენა .....	55
§2.12 ადამიანის ზედაპირის აღდგენა .....	56
§2.13 ჩაძირული სხეულის ზედაპირის აღდგენა .....	57
§2.14 ფოტოგრაფიული და ჰოლოგრაფიული მეთოდების შედარება დასკვნა .....	60
<b>თავი III ფოტონური კრისტალების კომპიუტერული მოდელირება</b>	
ზოგადი მიმოხილვა .....	62
პროგრამული პაკეტი .....	64
<b>ელექტრონული მოწყობილობები</b>	
§3.1 წრფივი ტალღამტარი .....	64
§3.2 სიმძლავრის გამყოფი .....	66
§3.3 სისწირული ფილტრი .....	68
§3.4 სიმძლავრეთა შემრევი .....	70
§3.5 ცირკულატორი .....	70
§3.6 ანტენური სტრუქტურები .....	74
§3.7 ინტეგრალური სქემა ფოტონური კრისტალის ბაზაზე .....	79
§3.8 ქარხნული დამზადების სიზუსტის მოდელირება .....	80
დასკვნა .....	81
<b>ლიტერატურა</b> .....	83

## შესავალი

**ნაშრომის ძირითადი მიზანი.** კომპიუტერული ტექნიკის განვითარებამ ხელი შეუწყო, მათემატიკური ფიზიკის სასაზღვრო ამოცანების ამოსახსნელად, რიცხვითი მეთოდების ინტენსიურ გამოყენებას. ეს გულისხმობს ფიზიკური ამოცანის გაიგივებას მათემატიკურ მოდელთან. რიცხვით ექსპერიმენტს თანამედროვე ელექტროდინამიკაში მნიშვნელოვანი ადგილი უჭირავს. გამოკვლევის სპეციფიკა იმაში მდგომარეობს, რომ ეს არ არის ცნობილი ფორმულებით რაიმე მოდელის მახასიათებლების დადგენა ერთჯერადი გამოთვლებით, არამედ რთული გამოთვლების მთელი კასკადია, რომლის პროცესშიც ხდება როგორც მოდელის დაზუსტება, ასევე გათამაშებული ფიზიკური მოვლენის შესწავლა. ამგვარად, შესაძლებელი ხდება ძვირად ღირებული რეალური ექსპერიმენტების ჩანაცვლება კომპიუტერული მოდელირებითა და გამოთვლებით. ამ მიზნით მნიშვნელოვანია, გამოყენებითი ელექტროდინამიკის ამოცანების ამოსახსნელად, ეფექტური რიცხვითი მეთოდების შემუშავება და არსებულის სრულყოფა, რადგან რიცხვითი მეთოდები ამოცანების ამოსხნისას გარკვეულ, დიდ სირთულეებს აწყდება. უნივერსალური მიდგომის შექმნა ცალკე პრობლემას წარმოადგენს. გამოკვლევებისთვის შემუშავებული რიცხვითი მეთოდები და ალგორითმები უნდა ხასიათდებოდნენ საკმარისი ეფექტურობით, ხოლო მათი ქმედითუნარიანობა უნდა ჩანდეს როგორც კონკრეტული, ასევე არატრივიალური ამოცანების ამოსხნისას.

ნაშრომი შედგება ორი ნაწილისაგან.

პირველ ნაწილში წარმოდგენილია შებრუნებული ამოცანის ამოსხნის ორი მეთოდი და თითოეული მეთოდის საშუალებით ხდება შებრუნებული ამოცანის ამოსხნა. მათი ძირითად მიზანია სამგანზომილებიან თავისუფალ სივრცეში, ან რაიმე გარემოში, მოთავსებული სხეულის ვიზუალიზაცია, მისი ფორმის, ზომის, მდებარეობისა და ელექტროდინამიკური პარამეტრების განსაზღვრა.

ნაშრომის მეორე ნაწილი შეეხება ფოტონური კრისტალების კომპიუტერულ მოდელირებას და მისი ძირითადი მიზანია: ორგანზომილებიან სივრცეში რთული შინაგანი სტრუქტურის მქონე ფოტონურ კრისტალებზე ელექტრომაგნიტური ტალღის დიფრაქციის ამოცანის ამოსხნა; მათი ელექტროდინამიკური თვისებების გამოკვლევა დაცემული ელექტრომაგნიტური ტალღის კონკრეტული პარამეტრების დროს; რეზონანსული ველების ყოფაქცევის შესწავლა ობიექტის გეომეტრიაში შეტანილი ცვლილებების შემთხვევაში; ფოტონური კრისტალების, როგორც ერთიანი სისტემის, სიხშირული მახასიათებლების შესწავლა და რიცხვითი ექსპერიმენტის შედეგების შედარება რეალურ ექსპერიმენტთან.

**თემის აქტუალობა.** თემები, რომელსაც წინამდებარე ნაშრომი ეხება, მეტად აქტუალურია. კერძოდ, შებრუნებული ამოცანის ამოსხნა წლების მანძილზე კვლევის მნიშვნელოვან საგანს წარმოადგენდა. ის გამოიყენება ისეთ დარგებში, როგორიცაა არქეოლოგია – მიწაში არსებული ძვირფასი არქეოლოგიური მასალების აღმოჩენა დისტანციურად, რაც თავიდან გვაცილებს მიწის გათხრის მძიმე და ხანგრძლივ პროცესს; სამედიცინო ტომოგრაფიაში ადამიანის შინაგანი ორგანოების გამოკვლევისთვის; აგრეთვე სამხედრო სფეროში მიწაში არსებული ფეთქებადი მასალების დეტექტირებისათვის. ამ ბოლო დროს ეს თემა მეტად აქტუალური გახდა მიწაში გამავალი წყალგამტარი მილების დეფექტური ნაწილების აღმოსაჩენად. ნაშრომის ამ ნაწილზე მუშაობა ხორციელდებოდა საბერძნეთის გრანტის ფარგლებში, რომელიც სწორედ ამ პრობლემას შეეხება.

მეტად აქტუალურია ნაშრომის აგრეთვე შემდეგი ნაწილი, რომელიც შეეხება ფოტონური კრისტალების თვისებების შესწავლას მათი კომპიუტერული მოდელირების საშუალებით. ინფორმაციის ჭარბი ზრდა და მისი სწრაფი გადამუშავების მოთხოვნილება საჭიროებს ულტრაზემადალ და ოპტიკურ დიაპაზონში მომუშავე ელექტრონული მოწყობილობების დამზადებას. სინშირის ზრდის პარალელურად მცირდება მოცემული მოწყობილობების ზომები, რაც მათ დამზადებას საკმაოდ ართულებს. ამ პრობლემის გადაჭრის მიზნით იყენებენ ფოტონურ კრისტალებს, რომელთა დამზადებაც შედარებით მარტივია ზემოთ აღნიშნული დიაპაზონისთვის. თუმცა მათი თვისებების უშუალო შესწავლა დიდ დროსთან და თანხებთან არის დაკავშირებული. ამიტომ მეტად აქტუალური გახდა მათი გამოკვლევა რიცხვითი ექსპერიმენტის საშუალებით, რომელიც გაცილებით სწრაფია და ეკონომიური. წინამდებარე ნაშრომში განხილულია ფოტონური კრისტალების კომპიუტერული მოდელირება დამხმარე გამომსახივებლების მეთოდის საშუალებით. ნაშრომის ამ ნაწილზე მუშაობა ხორციელდებოდა შვეიცარიის გრანტის ფარგლებში.

**ამოცანის ამოხსნის მეთოდიკა.** გასული საუკუნის ორმოციან წლებში ელიფსური ტიპის განტოლებებისთვის სასაზღვრო ამოცანების ამოხსნა შესწავლილ იქნა იტალიელი მეცნიერების პიკონეს და ამერიოს მიერ. მათი შრომების ძირითადი ღირებულება მდგომარეობდა ასეთი კლასის ამოცანების ამოხსნის ალგორითმების შექმნის შესაძლებლობებში, რომლებშიც ამონახსნი წარმოდგენილია სრული, წრფივად დამოუკიდებელი, არაორთოგონალური ფუნქციათა სისტემით. გაშლის კოეფიციენტები განისაზღვრება სასაზღვრო პირობებიდან.

იმ შემთხვევაში, როდესაც გაშლის ფუნქციები წარმოდგენილია ჰელმჰოლცის განტოლების ფუნდამენტური ამონახსნებით, არაორთოგონალური მწკრივების მეთოდს ეწოდება დამხმარე გამომსახივებლების მეთოდი.

დამხმარე გამომსახივებლების მეთოდი შემუშავებული იყო ელექტროდინამიკის ამოცანების ფართო კლასის ამოსახსნელად. როგორც გამოცდილება უჩვენებს, მეთოდი აკმაყოფილებს იმ მოთხოვნების უმრავლესობას, რომლებიც ზემოთ იყო ჩამოთვლილი. ეს მეთოდი ეფექტურად იყო გამოყენებული მთელი რიგი ელექტროდინამიკური ამოცანების ამოსახსნელად. გამოყენების პროცესში მეთოდმა შემდგომი განვითარებაც ჰპოვა.

მეთოდის მათემატიკური საფუძვლები ჩაყრილია ქართველი მათემატიკოსების ვ.კუპრაძის და ი.ვეკუას მიერ [17-19]. თუმცა არსებობს რიგი შრომებისა, რომელთა ავტორების მიერ დამოუკიდებლად არის შემოთავაზებული გაბნეული ველების მსგავსი წარმოდგენები [21-25]. გარკვეულ პერიოდში მეთოდი განიხილებოდა, როგორც ფიზიკური ამოცანების ამოხსნის მათემატიკური საშუალება და ყურადღება არ ექცეოდა ფიზიკურ თავისებურობებს. დამხმარე გამომსახივებლების მეთოდს იყენებდნენ მათემატიკური ფიზიკის სასაზღვრო ამოცანებში დამხმარე პარამეტრების ოპტიმიზაციის გარეშე. ვ.კუპრაძის და ი.ვეკუას შრომებში დამტკიცებულია, რომ ნებისმიერი გამბნევი არეს შიგნით, ჩაკეტილ ზედაპირზე დამხმარე გამომსახივებლების რაოდენობის ზრდით, ამონახსნი მისწრაფვის ჭეშმარიტი ამონახსნისკენ. მოგვიანებით, კონკრეტული გამოყენებითი ამოცანების ამოხსნისას გაირკვა, რომ გაბნეული ველის თვისებების გაუთვალისწინებლად წარმოიქმნება სერიოზული პრობლემები. მეთოდის კრებადობა და სტაბილურობა დამოკიდებულია დამხმარე პარამეტრების სწორ არჩევაზე. აქ იგულისხმება, რომ დამხმარე ზედაპირი უნდა მოიცავდეს გაბნეული ველის ყველა განსაკუთრებულობას.

**მიღებული შედეგების მართებულობა.** მიღებული შედეგების მართებულობა მოწმდება სხეულის ზედაპირზე სასაზღვრო პირობების შესრულების შემოწმებით, შედეგების ფიზიკური არსის გაანალიზებით. აგრეთვე მცირე ელექტრული ზომების მქონე მარტივ გეომეტრიულ ფიგურებზე განსხვავებული მეთოდით, კერძო შემთხვევებში ანალიზურად მიღებულ შედეგებთან შედარებით.

**სადისერტაციო ნაშრომის მოკლე მიმოხილვა.** წინამდებარე ნაშრომში წარმოდგენილია დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდის (დგმ) გამოყენება შებრუნებული ამოცანების კომპიუტერული მოდელირებისას; ამ მეთოდით ფოტონური კრისტალების თვისებების შესწავლა რიცხვითი ექსპერიმენტის საშუალებით.

ნაშრომი შედგება სამი თავისაგან:

პირველ თავში ლაპარაკია: უშუალოდ დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდზე ზოგადად; თუ რა სახეზე დაიყვანება ეს მეთოდი კონკრეტული ამოცანების ამოხსნისას; კერძოთ, შებრუნებული სამგანზომილებიანი და რთული მეტალო-დიელექტრიკულ სტრუქტურაზე დიფრაქციის ამოცანების ამოხსნისას.

მეორე თავი ეხება შებრუნებული ამოცანის ამოხსნას ორი ცნობილი, ფოტოგრაფიული და ჰოლოგრაფიული მეთოდის საშუალებით. შესწავლილია კონკრეტული ამოცანა, რომელიც დაკავშირებულია მიწაში ჩადირული სხეულის ვიზუალიზაციასთან.

მესამე თავში განხილულია ფოტონური კრისტალების გამოყენება ისეთი მოწყობილობების შესაქმნელად, როგორცაა სიხშირული ფილტრი, სიმძლავრეთა გამყოფი, სიმძლავრეთა შემრევი, ცირკულატორი; აგრეთვე ფაზირებული ანტენის მოდელის შექმნა. წარმოდგენილია რიცხვითი ექსპერიმენტის შედეგები. ნაჩვენებია დგმ-ს ეფექტურობა და გარკვეულ შემთხვევაში მისი აუცილებლობა ასეთი ტიპის ამოცანების ამოხსნისას.

თავი I  
დამხმარე გამომსახვებლების მეთოდი

## §1.1 დამხმარე გამომსხიველების მეთოდი და გაბნეული ველის განსაკუთრებულობები

დიფრაქციისა და გაბნევის მოვლენების გამოკვლევა, რომელიც შეეხება ორ და სამ განზომილებიან ობიექტებს, მეტად მნიშვნელოვანი თემაა მრავალ პრაქტიკულ ამოცანაში და ამ ბოლო წლებში გამოიწვია საკმაოდ დიდი ინტერესი. ეფექტური რიცხვითი მეთოდების შემუშავება წარმოადგენს დიდ პრაქტიკულ ინტერესს.

თანამედროვე ტექნოლოგიების ტექნიკური და ფიზიკური პარამეტრების მიმართ მოთხოვნილებების გაზრდის გამო, ეხლანდელი კომპიუტერული რესურსი, რადგან მესხიერებისა და ცენტრალური პროცესორის შესაძლებლობები დროში შეზღუდულია, შემოსაზღვრავს ისეთი კარგად ცნობილი მეთოდების გამოყენებას, როგორებიცაა: მომენტების მეთოდი, სასრული ელემენტების მეთოდი, სასრული სხვაობები დროით არეში და სხვა.

არსებობს მეთოდები, რომლებიც ეფუძნებიან სხვადასხვა მეთოდების კომბინაციას, რომლებიც ცნობილია როგორც ჰიბრიდული მეთოდები. ჩვენი ნაშრომი ეხება დამხმარე გამომსხიველების მეთოდის (დგმ) საშუალებით ორი და სამი განზომილებიანი ამოცანების ამოხსნისას კომპიუტერული რესურსების მინიმიზაციას.

ჩვენ მიერ ქვემოთ მოცემული განხილვა შეიძლება გადატანილ იქნას შებრუნებული ამოცანის ამოხსნისას. დგმ შეიქმნა ელექტროდინამიკის ამოცანების ფართო კლასის გადასატრედად და გაუმჯობესდა მრავალი პრაქტიკული ამოცანის ამოსახსნელად. დამხმარე გამომსხიველების მეთოდის მათემატიკური დასაბუთება მოცემული იყო კუპრადის მიერ [7]. მეთოდი [7] ტრადიციულად გამოიყენებოდა დგმ-ის საშუალებით მათემატიკური ფიზიკის სასაზღვრო ამოცანების ამოხსნისათვის მისი დამხმარე პარამეტრების ოპტიმიზაციის გარეშე.

[4,5]-ში ნაჩვენები იყო, რომ მოცემულ ალგორითმში მხედველობაში მიიღებოდა გაბნეული ველის განსაკუთრებულობების (გვგ) ყველა ძირითადი ფიზიკური თვისებები. ჩვენ მიერ დადგენილია გაბნეული ველის სტაბილურობა და გვგ. §1.2 წარმოდგენილია დგმ-ზე დაფუძნებული ახალი ალგორითმი, გვგ ლოკალიზაცია და ველის ვიზუალიზაცია – დაფუძნებული გაბნეული ველის ანალიზურ გაგრძელებაზე.

და ბოლოს ორ განზომილებიან ამოცანებში გამოყენებულია ფუნქცია  $H_0^{(1)}(kr)$ , რომელიც აღწერს განშლად ტალღებს. ხოლო სამ განზომილებიან ამოცანაში ჩვენ მიერ გამოყენებული იქნა ელემენტარული დიპოლის ფუნქცია პირდაპირი ამოცანის ამოსახსნელად; შებრუნებული ამოცანის გადასაწყვეტად კი გამოყენებული იქნა იგივე ფუნქცია, ოღონდ მასში ტალღური ვექტორის მიმართულება შეცვლილი იქნა საწინააღმდეგოთი. ცნობილია, რომ გვგ განაწილებულია როგორც „მნათი წერტილები კაუსტიკური ზედაპირის მახლობლად.“ გვგ-ს ამ განლაგების გამოყენებით, ჩვენ მიერ მიღწეულ იქნა, დიდ ობიექტებზე გაბნევის ამოცანების ეფექტური ამოხსნა გაბნეული ველის ნაწილობრივი წარმოდგენების საშუალებით.

განვიხილოთ ორ განზომილებიანი გაბნევის ამოცანა, რომელიც ნაჩვენებია ნახ. I.1-ზე, სადაც შემომსაზღვრელი ზედაპირი  $S$  არის იდეალური გამტარი და ზედაპირის შიგა არე აღნიშნულია  $D$ -თი (იგივე განხილვა მცირე შესწორებებით შეიძლება გადატანილ იქნას დიფრაქციის ამოცანის ამოხსნისას, როგორც ორი ისე სამი განზომილებიანი შემთხვევისთვის) და მოითხოვება

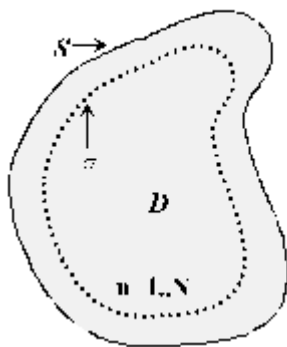
განისაზღვროს ელექტრული  $\vec{E}$  და მაგნიტური  $\vec{H}$  ველები  $D$ -ს გარეთ, რომლებიც აკმაყოფილებენ ტალღურ განტოლებას სასაზღვრო  $S$  ზედაპირზე, როდესაც გვაქვს დაცემული ტალღა.  $U^i$  ველის დროზე დამოკიდებულება მივიჩნიოთ  $e^{-i\omega t}$  -სახის. გაბნევის ამოცანა დაიყვანება ჰელმჰოლცის განტოლების ამონახსნის პოვნაზე:

$$\Delta U^s(x, y, z) + k^2 U^s(x, y, z) = 0 \tag{1}$$

აქ მოითხოვება სასაზღვრო პირობების შესრულება

$$W\{U^s(x, y, z) + U^i(x, y, z)\} = 0, M(x, y, z) \in S \tag{2}$$

სადაც  $U^s(x, y, z)$  არის გაბნეული ველი (გვ),  $U^i(x, y, z)$  არის დაცემული ველი  $W$  არის სასაზღვრო პირობის ოპერატორი:



ნახ 1.1 დგმ ორ განზომილებიანი, იდეალურად გამტარი ობიექტის გეომეტრია. დამხმარე წყაროები განთავსებულია თანაბრად  $\sigma$  დამხმარე ზედაპირის გასწვრივ  $D$  გამბნევის არაფიზიკური არეს შიგნით. ზედაპირი  $S$  არის იდეალურად გამტარი საზღვარი  $D$  არესი.

[7]-ს თანახმად, დამხმარე  $\sigma$  ზედაპირი თავსდება  $D$  არეს შიგნით; წყაროთა წყება განთავსებული წერტილებში  $\{x_n, y_n, z_n\}_{n=1}^{\infty} \in \sigma$  არის თანაბრად განაწილებული, როგორც ნახ. 1.1 -ზეა ნახვენები.

დაეუშვათ  $\{U(|\vec{r}_n - \vec{r}|\})_{n=1}^{\infty}$  -არის ჰელმჰოლცის განტოლების ამოხსნა დაკავშირებული ელემენტარულ ელექტრომაგნიტური ველის წყაროებთან, რომლითაც გაბნეული ველი (გვ) უნდა იქნას წარმოდგენილი. შესაბამისი ფუნქციები არიან:

$$U(|\vec{r}_n - \vec{r}|) = H_0^{(1)}(k|\vec{r}_n - \vec{r}|) \tag{3} - 2 \text{ განზომილებიანი შემთხვევისთვის;}$$

$$U(|\vec{r}_n - \vec{r}|) = \frac{e^{ik|\vec{r}_n - \vec{r}|}}{|\vec{r}_n - \vec{r}|} \tag{4} - 3 \text{ განზომილებიანი სკალარული შემთხვევისთვის. ხოლო}$$

ვექტორული შემთხვევისთვის გამოიყენება ელემენტარული ელექტრული დიპოლი, რომელზეც ქვემოთ ვილაპარაკებთ.



დამტკიცებულია რომ [7] :

1. ფუნქციათა ერთობლიობა  $\{U(|\vec{r}_n - \vec{r}|)\}_{n=1}^{\infty}$  – ელემენტარული დამხმარე გამომსხივებლები (დგ), რომლებიც აღწერენ ველის ხასიათს (ელექტრული, მაგნიტური ან ველის პოტენციალი) – არიან სრული და წრფივად დამოუკიდებელნი  $S$  ზედაპირზე  $L_2$ -სივრცეში.

2. არიან ისეთი კოეფიციენტები  $j_n$ , რომ ზემოთაღნიშნული სისტემის პირველი  $N$  ფუნქციის გამოყენებით, ნებისმიერი სახის ფუნქცია ზედაპირზე  $S$  შეიძლება წარმოდგენილი იქნას ფუნდამენტური ამონახსნების წრფივი კომბინაციით შესაბამისი ამ კოეფიციენტების საშუალებით. იდეალურად გამტარი გამბნევისთვის:

$$W\left\{\sum_{n=1}^N j_n U(|\vec{r}_n - \vec{r}|)\right\}\Big|_S = -W\{U^i(x, y, z)\}\Big|_S \quad (5)$$

შემდეგ, მიახლოებითი ამოხსნა სასაზღვრო ამოცანისა  $D$ -ს გარეთ არის:

$$\tilde{U}^s(x, y, z) = \sum_{n=1}^N j_n U(|\vec{r}_n - \vec{r}|) \quad (6)$$

რომელიც უახლოვდება ზუსტ ამონახსნს  $U^s(x, y, z)$ , როდესაც  $N \rightarrow \infty$ .

ეს არის არსი კუპრადის მიერ შემოთავაზებული დგმ-ისა [7].

გამოკვლევებში [4-6] ნახვენებია, რომ დამხმარე კონტურის კორექტული შერჩევა და დამხმარე გამომსხივებლების განთავსება, შემოთავაზებული მეთოდის ეფექტურობის მიღწევისთვის მნიშვნელოვანი ფაქტორებია.

ანდა აღინიშნოს, რომ თუ გვგ-ის მდებარეობა კარგად არ შეირჩა, გამოთვლითი პროცესი შეიძლება არ იყოს კრებადი.

აუცილებელი რაოდენობა წევრებისა, რომელიც (5) განტოლებაში უნდა მივიღოთ მხედველობაში, მკაცრად არის დამოკიდებული დახმარე კონტურის ფორმაზე და დამხმარე ზედაპირის მდებარეობაზე.

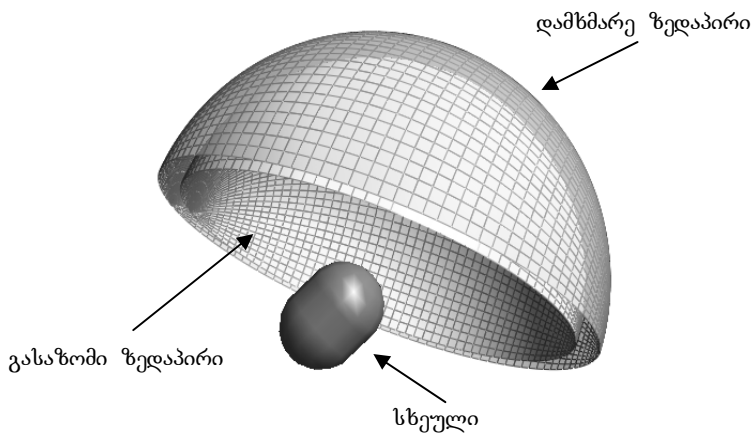
როდესაც დამხმარე კონტურს ვამოძრავებთ შორს ფიზიკური  $S$  ზედაპირიდან, წევრების მოთხოვნადი რაოდენობა (5) განტოლებაში, მაღალი სიზუსტის მისაღწევად, მკვეთრად კლებულობს და CPU (ცენტრალური პროცესორი) ამოხსნის დროც კლებულობს [4-6]. ეს შეიძლება აიხსნას იმ ფაქტით, რომ დამხმარე ზედაპირის წანაცვლება გამბნევი სხეულის შიგნით, ხდის გაბნეული ველის ფუნქციას უფრო გლუვს სხეულის ზედაპირზე და ხდება დაცემული ველის კომპენსაცია კოლოკაციის წერტილებში. ე.ი. სასაზღვრო პირობების შესრულება კოლოკაციის წერტილებს შორის უმჯობესდება. თუმცა წყაროთა ძალიან ღრმად მოთავსებამ სხეულის შიგნით, შეიძლება განშლადი ამონახსნი მოგვცეს. ეს ხდება თუ გვგ აღმოჩნდება დამხმარე კონტურის გარეთ: დამხმარე წყაროებით წარმოქმნილი ველი ვეღარ აღწერს ამ განსაკუთრებულობებს, რადგან გაბნეული ველი ანალიზურია ყველგან დამხმარე კონტურის გარეთ.

## §1.2 დგმ-ს გამოყენება ველის აღდგენისა და გაბნეული ველის განსაკუთრებულობების ვიზუალიზაციისათვის

ცნობილია, რომ გამბნევი სხეულიდან არეკლილი გამრბენი ველი რეგულარულია და ცალსახად განისაზღვრება შესაბამისი წყაროთა განსაკუთრებულობებით, რომლებიც მოთავსებულია გამბნევის შიგნით [1].

შესაბამისად, ველის სიდიდეები რეგულარულ, გაბნეულ ველის არეში და დამატებით ფიზიკური ზედაპირის განსაკუთრებულობების რეგიონის სიახლოვეში, შეიძლება განისაზღვროს მოცემულ არეში მოსახერხებელი ანალიზური ტალღური ფუნქციების საშუალებით.

არსებობს გაბნეული ველის აღდგენისა და ანალიზური გაგრძელების მრავალი მეთოდი. ამ მეთოდთა მათემატიკური დასაბუთება მოცემულია [18,19]-ში. არის აგრეთვე სხვა მეთოდები ველის ვიზუალიზაციის მიმართულებით [20]. ჩვენ მიერ წარმოდგენილი იქნება ჰოლოგრაფიული მეთოდი, ანუ ველის აღდგენა მეზობელ არეში გარკვეულ ზედაპირზე გაბნეული ველის ამპლიტუდების და ფაზების ცნობილი მონაცემების საშუალებით. განვიხილოთ სამგანზომილებიანი შემთხვევა.



ნახ.1.2 შებრუნებული ამოცანა სამგანზომილებიანი შემთხვევაში

შემოთავაზებული მეთოდი დაფუძნებულია ველის ანალიზურ გაგრძელებაზე, რომელიც ასევე დგმ-ს საშუალებით ითვლება. ჩვენ მიერ ნაშრომში წარმოდგენილია ახალი იდეა ისეთი ფუნქციების გამოყენების შესახებ, რომელიც აღწერს წყაროსკენ მიმართულ კრებად ველს. ასეთი ფუნქცია ელემენტარული ელექტრული დიპოლის ფუნქცია, რომლის გამოსახულებაშიც ხდება შეცვლა  $k \Rightarrow -k$ , რის შედეგადაც მიიღება კრებადი ტალღა. ამ ფუნქციას აღნიშნავენ  $G(-kr)$ -ით და უწოდებენ გრინის ფუნქციას. განვიხილოთ სხეული (სურ. 1.2) დასხივებული წერტილოვანი წყაროს მიერ.

შემდეგ დავუშვათ, რომ  $S$  რაიმე ზედაპირზე (გასაზომი ზედაპირი) – ობიექტიდან გარკვეულ მანძილზე, ცნობილია კომპლექსური გაბნეული ველი  $U^s(\vec{r})$  (ამპლიტუდები და ფაზები). ჩვენი მიზანია აღვადგინოთ გვ-ს ანალიზური გაგრძელება ობიექტის მახლობლად, მანამ სანამ ის მიაღწევს განსაკუთრებულ წერტილებს (გაბნეული ველის წყაროებს ან მეორად წყაროებს). როგორც ნახ. 1.2-ზეა ნაჩვენები, გასაზომი ზედაპირის მახლობლად მდებარე დამხმარე ზედაპირზე მოთავსებულია დამხმარე წყაროები იგივე სიხშირის და ნებისმიერი კოეფიციენტებით. ამ დამხმარე გამომსხივებლების შერჩევა მეტად მნიშვნელოვანი საკითხია. მას შემდეგ, რაც დამხმარე გამომსხივებლებს გამოვიყენებთ კრებადი წყაროების აღსაწერად, გაბნეული ველის ტალღური ვექტორი უნდა იყოს

მიმართული აგრეთვე წყაროებისკენ. ამრიგად, ეს დამხმარე წყაროები არ უნდა ემორჩილებოდნენ გამოსხივების პირობას. პირიქით უნდა იქცეოდნენ როგორც მშთანთქმელები, რომელიც ახდენენ იმ  $U(\vec{r})$  ველის გენერირებას რომელიც მათკენ ვრცელდება. მას აქვს შემდეგი სახე:

$$U(\vec{r}) = \sum_{n=1}^N a_n G(-kr_n) \quad (7)$$

მაშასადამე, ეს დამხმარე გამომსხივებლები ცნობილია როგორც დამხმარე მშთანთქმელები (დმ); დროზე დამოკიდებულება მოცემულია  $e^{-i\omega t}$  სახით. შემდეგ ცნობილი გაბნეული ველი გამოისახება დმ-ს ველის მიერ იმ პირობით, რომ გასაზომ ზედაპირზე წერტილთა რაოდენობა  $M \geq N$ . შესაბამისი წრფივ განტოლებათა სისტემა იწერება შემდეგნაირად:

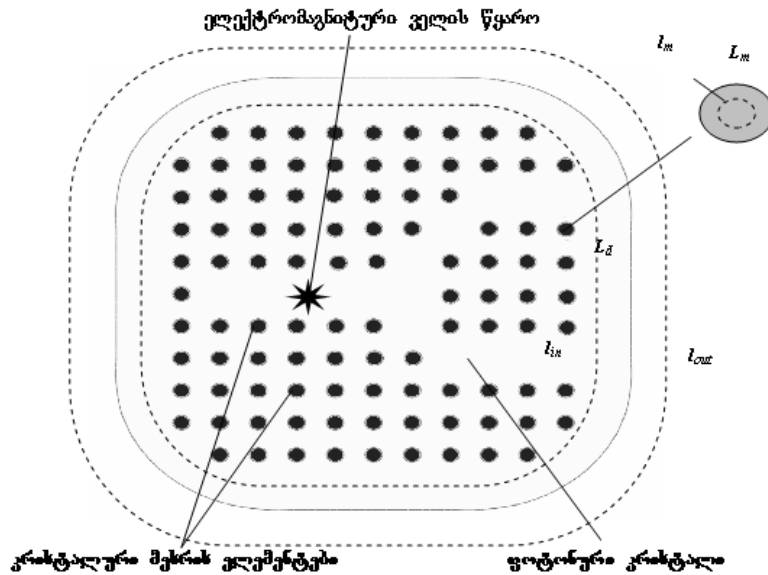
$$\sum_{n=1}^N a_n G(kr_{nm}) = U^s(r_m) \quad (8)$$

ამ სისტემის ამონახსნი განსაზღვრავს დმ-თა ამპლიტუდებს და ფაზებს. გაბნეული ველის ანალიზური გაგრძელების ერთადერთობის გამო, დმ-ები აღადგენენ ველს მთავარ განსაკუთრებულობების წერტილებამდე, ანუ დასასხივებელი სხეულის აკრძალულ არემდე.

### §1.3 დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი ფოტონური კრისტალების მოდელირებისას.

დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი ორ განზომილებიანი რთული შიდა სტრუქტურის მქონე მეტალო-დიელექტრიკული სხეულებისათვის, ანუ ჩვენს შემთხვევაში ფოტონური კრისტალებისათვის, დადის შემდეგ სახეზე:

ფოტონური კრისტალის მოდელად აღებული გვაქვს ნებისმიერი ფორმის დიელექტრიკული სხეული, რომელშიც დეფექტების სახით შეტანილია ცილინდრული გამტარები. (ნახ. 1.3) განვიხილოთ ორ განზომილებიანი შემთხვევა, როცა სისტემა  $Z$  ღერძის გასწვრივ ერთგვაროვანია.



ნახ. 1.3  
ფოტონური კრისტალის ფიზიკური მოდელი

კრისტალში ვათავსებთ ელექტრომაგნიტური ველის წყაროებს, რომელთა განლაგება და რაოდენობა შესაძლებელია წინასწარ ნებისმიერად შეირჩეს. დაცემული ველის მნიშვნელობა  $\vec{r}$  წერტილში გამოისახება შემდეგი სახით:

$$E^{inc}(\vec{r}) = k \sum_{n=1}^N C_n H_0^{(1)}(k\sqrt{\epsilon\mu}(\vec{r}_n - \vec{r})) \quad (1)$$

სადაც  $k$ -არის ტალღური რიცხვი,  $N$  - კრისტალური მესრის ელემენტების რაოდენობა,  $C_n - \vec{r}_n$  წერტილში მოთავსებული  $n$ -ურ ელემენტში დენის კომპლექსური ამპლიტუდა,  $\epsilon$  და  $\mu$  - ფოტონური კრისტალის დიელექტრიკული და მაგნიტური შეღწევადობა,  $E^{inc}$  - დაცემული ველი ხოლო  $H_0^{(1)}$  - ჰანკელის პირველი რიგის ფუნქცია.

ელექტროდინამიკის ამოცანის ამოსახსნელად გამოყენებული იქნა დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი (დგმ), რომლის საშუალებითაც, წინასწარ არჩეული სიზუსტით, აღიწერება მოცემულ ელემენტებში მიმდინარე ტალღური პროცესები.

კრისტალის მიერ გაბნეული ველი წარმოიადგინება უცნობი ამპლიტუდების მქონე დამხმარე გამომსხივებლების საშუალებით, რომლებიც განლაგებულნი არიან შესაბამისად  $L_{in}, L_{out}, L_m$  დამხმარე კონტურებზე. ფოტონური კრისტალისათვის  $L_{in}$  კონტური მოთავსებულია დიელექტრიკული ზედაპირის შიგნით, და მასზე მოთავსებული გამომსხივებლები აღწერენ ველს კრისტალის გარეთ თავისუფალ გარემოში.  $L_{out}$  კონტური მოთავსებულია დიელექტრიკული ზედაპირის გარეთ, და აღწერს ველს კრისტალის შიგნით  $L_m$  კონტურზე მოთავსებულ დამხმარე გამომსხივებლებთან ერთად, სადაც  $L_m$  წარმოადგენს ცილინდრული გამტარების - მეტალური მავთულებისათვის დამხმარე კონტურს. ვექტორ-პოტენციალის ფუნქციას  $r_n$  წერტილში მოთავსებული დამხმარე გამომსხივებლისთვის აქვს შემდეგი სახე:

$$\vec{P}(|\vec{r} - \vec{r}_n|) = \vec{i}_z H_0^{(1)}(k\sqrt{\epsilon\mu} |\vec{r} - \vec{r}_n|) \quad (2)$$

ელექტრული ველის მნიშვნელობა კრისტალის გარეთ გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$E^{out}(\vec{r}) = k \sum_{n=1}^{N_m} a_n^{in} H_0^{(1)}(k(\vec{r}_n - \vec{r})) \quad (3)$$

სადაც  $N_m$ -არის დამხმარე გამომსხივებლების რიცხვი  $l_m$  კონტურზე,  $a_n^{in}$  მათი ამპლიტუდები.

ელექტრული ველისათვის კრისტალის შიგნით გვაქვს:

$$E^{in}(\vec{r}) = k\varepsilon\mu \sum_{n=1}^{N_{out}} a_n^{out} H_0^{(1)}(k\sqrt{\varepsilon\mu}(\vec{r}_n - \vec{r})) + \sum_{i=1}^{N_m} b_i^{in} H_0^1(k(\vec{r}_i - \vec{r})) \quad (4)$$

სადაც  $N_{out}$  და  $N_m$ - არის დამხმარე გამომსხივებლების რიცხვი შესაბამისად  $l_{out}$  და  $l_m$  კონტურებზე, ხოლო  $a_n^{out}$  და  $b_i^{in}$  მათი ამპლიტუდები. მაგნიტური ველი როგორც კრისტალის შიგნით, ასევე მის გარეთ, შეიძლება განისაზღვროს მაქსველის განტოლების დახმარებით:

$$rot\vec{E} = -ik\mu\vec{H} \quad (5)$$

უცნობი ამპლიტუდები განისაზღვრება სასაზღვრო პირობებიდან. დიელექტრიკის ზედაპირზე მოითხოვება ელექტრული და მაგნიტური ველის ტანგენციალური მდგენელის უწყვეტობის პირობა, ხოლო მეტალის ზედაპირზე ელექტრული ველის ტანგენციალური მდგენელის ნულთან ტოლობა.

დიელექტრიკის და მეტალის ზედაპირის წერტილებისთვის ამ პირობის დაწერით ვღებულობთ წრფივ ალგებრულ განტოლებათა სისტემას უცნობი  $a_n^{in}$ ,  $a_n^{out}$ ,  $b_i^{in}$  კოეფიციენტებისათვის:

$$\begin{cases} E_\tau^{out}(\vec{r}_i) - E_\tau^{in}(\vec{r}_i) = E_\tau^{inc}(\vec{r}_i) \\ H_\tau^{out}(\vec{r}_i) - H_\tau^{in}(\vec{r}_i) = H_\tau^{inc}(\vec{r}_i), \\ E_\tau^{in}(\vec{r}_j) = E_{inc} \end{cases} \quad (6)$$

მოცემული სისტემის ამოხსნა გვაძლევს დამხმარე გამომსხივებლების ამპლიტუდებს, რომელთა ჩასმით (3) და (4)-ში ვითვლით ველს სივრცის ნებისმიერ წერტილში.

## §1.4 ფოტოგრაფიული მეთოდი

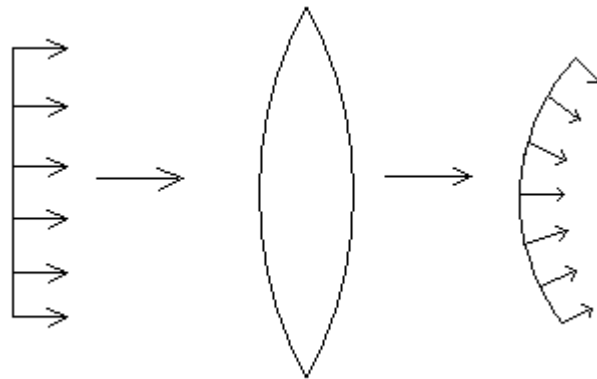
ფოტოგრაფიული მეთოდი ეყრდნობა დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდს და ერთერთი მძლავრი მეთოდია შებრუნებული ამოცანების ამოსახსნელად. მეთოდის არსი მდგომარეობს შემდეგში. სხეულს ეცემა ელექტრომაგნიტური ველი და ხდება ამ ველის არეკვლა მოცემული სხეულიდან. არეკვლილ ველს ვზომავთ რაღაც არეში. ჰიუგენსის პრინციპის თანახმად ჩვენ შეგვიძლია მოვახდინოთ ველის ანალიზური გაგრძელება თუ თითოეულ წერტილში, რომელშიც ველს ვზომავთ, მოვათავსებთ კომბინირებულ დიპოლს იმ ამპლიტუდით და ფაზით, რომელიც გაზომილ ველის მნიშვნელობებს ჰქონდა. მაშინ ჩვენ შევძლებთ ვიპოვოთ ველის შემდგომი სვლა. ამ შემთხვევაში ჩვენ აღვადგენთ ველს ხარისხობრივად და არა რაოდენობრივად. კომბინირებულ დიპოლს აქვს შემდეგი მათემატიკური სახე:

$$E_{el} = \frac{e^{ikr}}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^3} \{ (1 - ikr) \cdot (3(\vec{n} \cdot (\vec{n} \cdot \vec{p}) - \vec{p}) - k^2 r^2 [\vec{n}[\vec{n} \cdot \vec{p}]]) \}$$

$$E_{mag} = \frac{ikW_0 e^{ikr}}{4\pi\mu_0} \cdot \left( \frac{1}{r^2} - \frac{ik}{r} \right) \cdot [\vec{p} \cdot \vec{n}] \quad E_{komb} = E_{el} + 120\pi \cdot E_{mag}$$

$$k = k_0 \sqrt{\epsilon\mu} \quad \vec{n} = \frac{\vec{r}}{r}$$

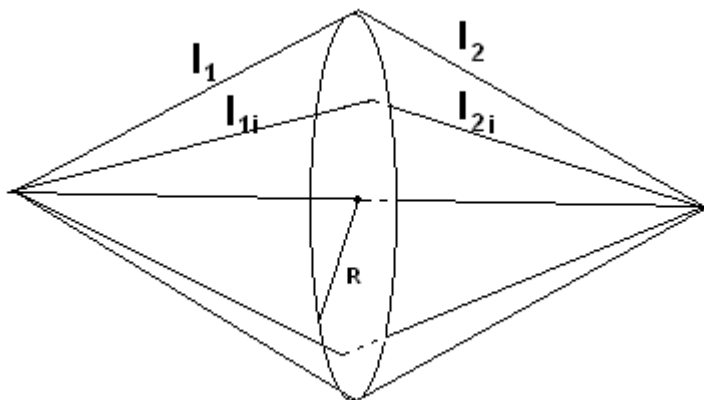
ამასთან ერთად, ჩვენ გვინდა ეს ველი დავაფოკუსიროთ რაიმე სიბრტყეში მკაფიო გამოსახულების მისაღებათ. ამისათვის ჩვენ უნდა მოვათავსოთ ლინზა იმ ადგილას, სადაც ველს ვზომავთ. ლინზა, როგორც ვიცით იწვევს ტალღური ფრონტის შეცვლას; კერძოდ, ტალღური ფრონტის თითოეული ნაწილი ლინზაში გასვლის შემდეგ იძენს გარკვეულ ფაზურ დაგვიანებას, რაც აისახება ტალღური ფრონტის ფორმის შეცვლაში. თუ ლინზას ბრტყელი ტალღა ეცემა, მაშინ მასში გასვლის შემდეგ ტალღურ ფრონტს ექნება ნახ. 14-ზე ნაჩვენები ფორმა. ამიტომ ის ფოკუსირდება.



ნახ. 14

ტალღის ფრონტის ცვლილება ლინზაში გასვლის შემდეგ, რის შედეგადაც ხდება ველის ფოკუსირება

ლინზის დასამოღებლად ვიყენებთ ტაუტოქრონიზმის პირობას, რაც გამოიხატება შემდეგში:



ნახ. 15 სიბრტყის წრიულ კვეთაზე სადაც ხდება ველის მნიშვნელობების გაზომვა მოითხოვება სხივთა ტაუტოქრონულობის პირობა

ყოველი სხივი, რომელიც წყაროდან გამოდის, ერთ და იგივე დროს ანდომებს ფოკუსირების წერტილამდე მისვლას (ნახ. 1.5). როგორც ნახაზზე ჩანს, სხვადასხვა სხივის მიერ განვლილი მანძილები არ არის ერთი და იგივე; მაგრამ ლინზა თითოეულ სხივს აყოვნებს სხვადასხვა დროით, რაც უზრუნველყოფს სხივების ტაუტოქრონულობას. მოდელირების დროს ჩვენ ვზომავთ ველის ამპლიტუდებს და ფაზებს ლინზის ზედაპირზე და შემდეგ ველის ამ მნიშვნელობებს ვამრავლებთ  $e^{i\varphi}$  - ზე, სადაც  $\varphi$  - არის ფაზური დაგვიანება, რომელსაც ლინზა იწვევს. ფაზურ დაგვიანებებს განვსაზღვრავთ შემდეგნაირად:  $\varphi = k \cdot d$ ,  $d = (l_1 + l_2) - (l_{1i} + l_{2i})$  (ნახ. 1.6)  $k$ -არის ტალღური რიცხვი თავისუფალ გარემოში. კომბინირებული დიპოლების საშუალებით მიიღება ველის ხარისხობრივი ხასიათი. რომ მივიღოთ აღდგენილი ველის ზუსტი რაოდენობრივი აღწერა, უნდა ავიღოთ კირსჰოფის ინტეგრალი, რომლის საშუალებით ელექტრული და მაგნიტური ველის დაძაბულობებს აქვს შემდეგი სახე:

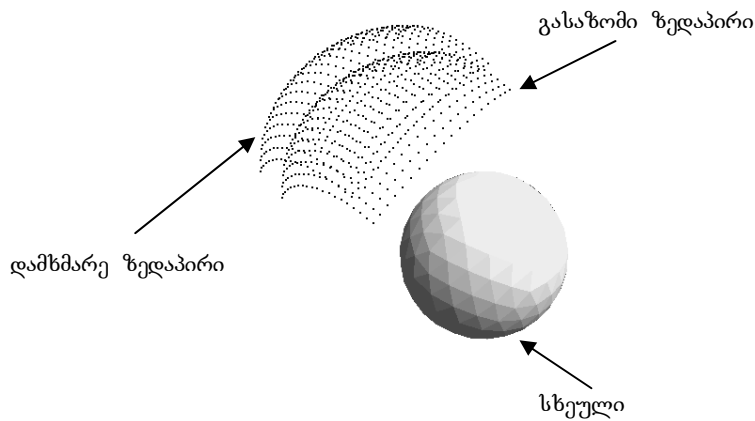
$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\pi} \int ds' \frac{\exp(i(kr - \omega t))}{r} \left[ ik \vec{j}_e \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} - \left( ik - \frac{1}{r} \right) (\vec{j}_m \times \vec{r}_0 + q_e \vec{r}_0) \right]$$

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = -\frac{1}{4\pi} \int ds' \frac{\exp(i(kr - \omega t))}{r} \left[ ik \vec{j}_m \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} - \left( ik - \frac{1}{r} \right) (\vec{j}_e \times \vec{r}_0 + q_m \vec{r}_0) \right]$$

სადაც  $\vec{r}$ -არის გასაზომი ზედაპირის წერტილიდან იმ წერტილამდე მანძილი, სადაც ველი გვიანტერესებს,  $r = |\vec{r}|$ ,  $\vec{r}_0 = \frac{\vec{r}}{r}$ ,  $\vec{j}_e = \vec{n} \times \vec{H}$  სადაც  $\vec{n}$  არის გასაზომი ზედაპირის ნორმალი.  $\vec{j}_m = \vec{n} \times \vec{E}$ ,  $q_e = \vec{n} \cdot \vec{E}$   $q_m = \vec{n} \cdot \vec{H}$

§1.5 ჰოლოგრაფიული მეთოდი

შებრუნებული ამოცანების ამოსახსნელად ერთერთი ყველაზე ეფექტური მეთოდი არის ჰოლოგრაფიული მეთოდი. მისი არსი მდგომარეობს შემდეგში: გარკვეულ ზედაპირზე (ჩვენ კონკრეტულ შემთხვევაში ვიღებთ სფერულ სეგმენტს) განლაგებულია ელექტრომაგნიტური ველის სენსორები, რომლებიც ზომავენ ელექტრული ველის დაძაბულობის ამპლიტუდის და ფაზის მნიშვნელობებს. ეს არის ველი, რომელსაც ასხივებს ელექტრომაგნიტური ველის წყარო, ან რომელიც აირეკლება სხეულიდან მასზე დაცემული ველის შედეგად.



ნახ. 1.7  
დასასხივებელი სხეული გასაზომი ზედაპირი და  
დამხმარე ზედაპირი

ამის შემდეგ ნახ. 1.7-ზე ნაჩვენებ დამხმარე ზედაპირზე ვათავსებთ კრებად დამხმარე წყაროებს. კრებადი წყაროს მისაღებად ჩვეულებრივი ველის წყაროს განტოლებაში ტალღურ ვექტორს უნდა შევუცვალოთ მიმართულება  $k \Rightarrow -k$  დამხმარე წყაროებად ვიყენებთ ელემენტარულ ელექტრულ დიპოლს რომლის ელექტრული და მაგნიტური ველის დაძაბულობა გამოისახება შემდეგი ფორმულებით:

$$\vec{E}_n(\vec{R}_n) = \frac{1}{4\pi\epsilon} e^{-i\omega t} \left\{ \frac{1}{R_n^3} (3\vec{R}_n^o(\vec{R}_n^o, \vec{p}) - \vec{p}) - \frac{ik}{R_n^2} (3\vec{R}_n^o(\vec{R}_n^o, \vec{p}) - \vec{p}) - \frac{k^2}{R_n} [\vec{R}_n^o[\vec{R}_n^o, \vec{p}]] \right\}$$

$$\vec{H}_n(\vec{R}_n) = -\frac{i\omega}{4\pi} e^{-i\omega t} \left( \frac{1}{R_n^2} - \frac{ik}{R_n} \right) [\vec{p}, \vec{R}_n^o]$$

იმ წერტილებში სადაც გავზომეთ ველი, ვითხოვთ სასაზღვრო პირობების შესრულებას – ელექტრული ველის უწყვეტობის პირობას, რომელსაც უნდა აკმაყოფილებდნენ დამხმარე ზედაპირზე განლაგებული დამხმარე წყაროები. შედეგად მიიღება განტოლებათა სისტემა რომლის ამოსხნაც საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ დამხმარე წყაროთა კომპლექსური ამპლიტუდები. მათი განსაზღვრის შემდეგ უკვე შესაძლებელია ველის ანალიზური გაგრძელება, ანუ ველის აღდგენა ჩვენთვის სასურველ არეში. მოცემული მეთოდი საშუალებას გვაძლევს ველი აღვადგინოთ იმ არეში, სადაც ველი სასრულია და არ გვაქვს განსაკუთრებული.



თავი II  
შებენებული ამოცანების ამოხსნა

## ზოგადი მიმოხილვა

ადამიანის ძირითადი ინსტრუმენტი სივრცეში ორიენტირებისათვის თავიდანვე იყო თვალი, რომლითაც ის აკვირდებოდა სამყაროს, განასხვავებდა საგნებს ერთმანეთისგან, ადგენდა საგნამდე მანძილს, მის ზომას, ფორმას. ელექტრომაგნიტური ტალღების დიაპაზონი საკმაოდ ფართოა. ადამიანის თვალი მგრძობიარეა ამ დიაპაზონის მხოლოდ საკმაოდ ვიწრო უბნის, კერძოდ ხილული სინათლის მიმართ. მზის თუ სინათლის სხვა წყაროს მიერ გამოსხივებული სინათლე ირეკლება სხვადასხვა სხეულიდან, ხვდება ადამიანის თვალში და პროექცირდება თვალის ბადურაზე არსებულ ნერვულ დაბოლოებებზე. ამ უკანასკნელში აღძრული ნერვული იმპულსები მიეწოდება ტვინს. ტვინი ახდენს ამ ინფორმაციის დამუშავებას და გარემომცველ სამყაროს ხდის ხილულს. ოდითგანვე ადამიანი ახდენდა სხვადასხვა მოვლენის აღწერას და შემდეგი თაობისთვის გადაცემას წერილობითი სახით, მაგრამ საუკეთესო საშუალებას ამ მიზნის განხორციელებისთვის, მაინც თვალით მიღებული ინფორმაციის შენახვა წარმოადგენდა. ამ მიზნით მეცნიერებმა შექმნეს ფოტო აპარატი. რომელიც საშუალებას იძლევა ამა თუ იმ მოვლენის დაფიქსირებისა. იგივე ფოტო აპარატი კარგი საშუალებაა დააკვირდეს სხვადასხვა მანძილზე მდებარე საგნებს, მაგრამ მხოლოდ იმ შემთხვევაში თუ საგნებს სხვა საგნები არ ეფარება. ცნობილია, რომ ყველა საგანი არ უშლის ხელს სხვა საგნის დანახვას, მაგალითად წყალი, მინა, რადგან ისინი ხილულ დიაპაზონში გამჭვირვალეა. მეცნიერულმა გამოკვლევებმა ცხადყო, რომ ყველა ნივთიერებას შეესაბამება ელექტრომაგნიტური ტალღების სპექტრის დიაპაზონი, რომელშიც ის მეტნაკლებად გამჭვირვალეა და ამრიგად თუ შევქმნით თვალის ანალოგს მოცემული სიხშირული დიაპაზონისათვის, შევძლებთ დავინახოთ საგნები რომლებიც იმყოფებიან სხვა გარემოში, ან რომლებიც არ არიან უშუალო ხედვის არეში.

ქვემოთ განხილული იქნება ამ ამოცანის გადაჭრის ერთერთი საშუალება. ტვინის როლს შეასრულებს კომპიუტერი, რომელიც გარკვეულ სეგმენტზე დალაგებულ სენსორებში გაზომილ ველის მნიშვნელობებით მიღებულ ინფორმაციას დაამუშავებს და მოახდენს ველის ვიზუალიზაციას სასურველ არეში, რაც შესაძლებელს გახდის იმ საგნის ან სინათლის წყაროს დანახვისა, რომლიდან მოსული ველის მნიშვნელობებიც ჩვენ სეგმენტზე გავზომით.

ასეთი ტიპის ამოცანებს შებრუნებული ამოცანები ეწოდება.

შებრუნებული ამოცანები დღესდღეობით მეტად აქტუალურია. მათ გამოყენების ფართო არე აქვთ. მაგალითად ის გამოიყენება სამედიცინო ტომოგრაფიაში ადამიანის შინაგანი ორგანოების გამოსაკვლევად, მიწაში არსებული ძვირფასი მასალების აღმოსაჩენად არქეოლოგიური გათხრების თავიდან ასაცილებლად, ან ფეთქებადი საგნების მდებარეობის დასადგენად (დეექსპლერიკული თუ მეტალური ნაღმები). დღესდღეობით ის განსაკუთრებულ აქტიურ გამოყენებას პოულობს მიწაში არსებული წყალსადენი დეფექტური მილების დეტექტირებისთვის: როგორც ცნობილია, დროთა განმავლობაში მილი ზიანდება, რაც შეიძლება გამოწვეული იყოს კოროზიით ან თუ ის პლასტმასისგანაა დამზადებული - ღვობით; ან შესაძლოა მილს ჰქონდეს ქარხნული დეფექტი, რაც დიდი ხნის შემდეგ იჩენს თავს. წყალი, რომელიც უნაავს გამსკდარი მილიდან, იკავებს გარკვეულ მოცულობას მიწაში. თუ წყალი არ აღწევს მიწის ზედაპირს, მაგალითად ის შეიძლება მიწაში იკეთებს არხს და გაედინება. მისი დეტექტირება ზემოდან თვალით შეუძლებელია და ამიტომ

ხდება დიდი მასის სასმელი წყლის დაკარგვა. წყლის დროებით შეწყვეტის შემთხვევაში, გაუნილი წყალი შეიძლება უკან მიღშივე შებრუნდეს და დააბინძუროს სასმელი წყალი. ამიტომ სასურველია შეიქმნას ისეთი მოწყობილობა, რომელიც საშუალებას მოგვცემს ზემოდან, მიწასთან უშუალოდ შეხების გარეშე, დადგინდეს სად არის მილი დაზიანებული. ეს ამოცანა შეიძლება ამოიხსნას მიწის ზემოდან ელექტრომაგნიტური ტალღის დასხივების და შემდგომ მიწიდან და მისი სიღრმეებიდან არეკვლილი ველით მიღებული ინფორმაციის დამუშავების შედეგად, რადგან არეკვლილი ველი შეიცავს ინფორმაციას მიწის სტრუქტურის შესახებ.

მიწა არსებობს სხვადასხვა სახის. ეს შეიძლება იყოს ნიადაგი, ქვიშა, თიხა და ა.შ. ამიტომ სხვადასხვა ადგილას მისი პარამეტრები (დიელექტრიკული შეღწევადობა, მაგნიტური შეღწევადობა, გამტარებლობა) განსხვავებულია. მიწის პარამეტრები დამოკიდებულია აგრეთვე ტემპერატურაზე და მასში წყლის შემცველობაზე. ექსპერიმენტი გვიჩვენებს, რომ როგორც არ უნდა იყოს მიწა, აუცილებლად არსებობს სისშირული დიაპაზონი, რომელშიც ის მეტ-ნაკლებად გამჭვირვალეა. ეს ნიშნავს იმას, რომ ის შედარებით ნაკლებად შთანთქმავს მასში შესულ ელექტრომაგნიტურ ტალღებს მოცემულ დიაპაზონში. ეს იძლევა საშუალებას აღმოვაჩინოთ მასში მოთავსებული სხეულები საკმაოდ დიდ სიღრმეზე.

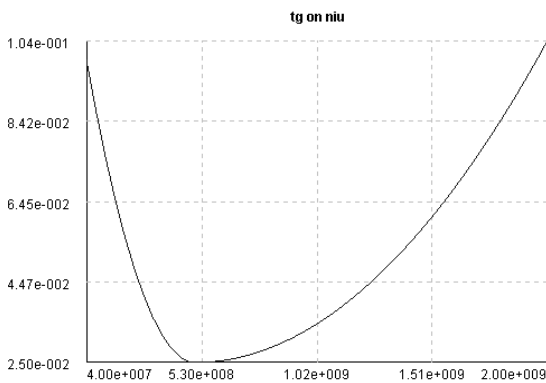
შებრუნებული ამოცანის ამოხსნა ნიშნავს, შორ ზონაში გაზომილი ველის საშუალებით, ამ ველის წყაროს პოვნას. ველის წყარო შეიძლება იყოს როგორც აქტიური, ისე პასიური. სხეული, რომლიდანაც რაიმე წყაროს მიერ გამოსხივებული ელექტრომაგნიტური ტალღა ირეკლება, წარმოადგენს ველის პასიურ წყაროს. თავად ელექტრომაგნიტური ველის წყარო კი წარმოადგენს აქტიურ წყაროს. აქტიური წყარო შეიძლება იყოს იმპულსის გენერატორი, რომელიც ასხივებს პერიოდულ იმპულსებს. იმპულსის პერიოდი ისე უნდა იყოს შერჩეული, რომ არეკვლილი იმპულსის დეტექტირება უნდა მოხდეს მანამ, სანამ მეორე იმპულსი მოასწრებს მოსვლას. იმპულსის სპექტრი მდიდარი უნდა იყოს ისეთი სისშირეებით, რომლისთვისაც გარემო მეტ-ნაკლებად გამჭვირვალეა. წინააღმდეგ შემთხვევაში ენერჯის დიდი ნაწილი შთანთქმება და არეკვლილი ველის გაზომვას ვერ შევძლებთ მისი სიმცირის გამო.

**§2.1 მიწის მახასიათებლის აღდგენა**

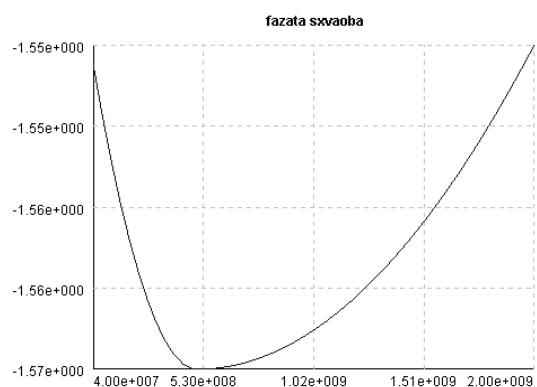
როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, იმისათვის რომ ამოიხსნას ძირითადი ამოცანა, ანუ მოხდეს მიწაში ჩაძირული სხეულების ვიზუალიზაცია და მათი ფორმების გარჩევა ე.მ. იმპულსების ზონდირებით და სათანადო არეკვლილი ველის ანალიზით, საჭიროა მოხდეს მიწის ელექტროდინამიკური თვისებების შესწავლა, რათა შეირჩეს ისეთი დაცემული იმპულსი, რომლის ფურიე სპექტრიც შეიცავს სიხშირეებს, რომლისთვისაც მიწა მეტ-ნაკლებათ გამჭვირვალეა. ეს გასაგებია, რადგან ჩვენი ამოცანაა რაც შეიძლება უფრო დიდი\_სიღრმიდან ამოვიღოთ ინფორმაცია. როგორც უკვე ზემოთ აღვნიშნეთ, მიწის ელ. დინამიკური პარამეტრები მკვეთრად იცვლება ადგილიდან ადგილამდე, დამოკიდებულია ტემპერატურაზე, მის შემადგენლობაზე (ქვიშიანი, თიხიანი, თუ სხვა სახის), წყლის პროცენტულ შემცველობაზე და ა. შ. ამიტომ, წინასწარ მისი შთანთქმისა და დიფექტრიკული შეღწევადობის დამოკიდებულება სიხშირეზე ზოგადად უცნობია. მიწის სინჯის აღება და მისი ლაბორატორიული გამოკვლევა კი დიდ დროს და დამატებით სამუშაოებს საჭიროებს.

ამ შუალედური ამოცანის ამოსახსნელად, ჩვენს მიერ შემუშავებული იქნა მეთოდი, რომელიც იძლევა საშუალებას განისაზღვროს ან შეფასდეს მიწის ელ-დინამიკური მახასიათებლები სინჯის აღების გარეშე. კერძოდ, თუ მიწას დავასხივებთ სასინჯ, (წინასწარ ცნობილი ამპლიტუდური და ფაზური ფურიე სპექტრის მქონე) რაიმე იმპულსით და შემდგომ, მისგან არეკვლილ იმპულსს აგრეთვე დავშლით ფურიე სპექტრად, დაცემული და არეკვლილი იმპულსების ფაზური და ამპლიტუდური სპექტრალური კომპონენტების შედარებით, კერძოდ, მათი სხვაობებით, შესაძლებელია შევაფასოთ დედამიწის ელ-დინამიკური თვისებები. რიცხვითმა ექსპერიმენტებმა გვაჩვენა, რომ დაცემული და არეკვლილი იმპულსების ფურიეს სპექტრალური კომპონენტების ფაზათა სხვაობის სიხშირეზე დამოკიდებულება, ზუსტად იმეორებს მიწის შთანთქმითი სიხშირული მახასიათებლის დამოკიდებულებას. ეს ფაქტი საშუალებას იძლევა განვსაზღვროთ მიწის შთანთქმითი მახასიათებლის სიხშირული დამოკიდებულებების გრაფიკი და დავადგინოთ, რომელ დიაპაზონში არის მიწა უფრო, ან მეტ-ნაკლებათ გამჭვირვალე, ანუ მისი შთანთქმის დამოკიდებულებას რა სიხშირეზე გააჩნია მინიმუმი.

მაგალითის სახით, ნახ. 2.1-ზე მოცემულია გარკვეული მიწის მიღევა-დანაკარგების კუთხის ტანგენსის სიხშირეზე დამოკიდებულება, ხოლო ნახ. 2.2-ზე დაცემულ და არეკვლილ იმპულსთა სპექტრალური კომპონენტების ფაზათა სხვაობის დამოკიდებულება სიხშირეზე.



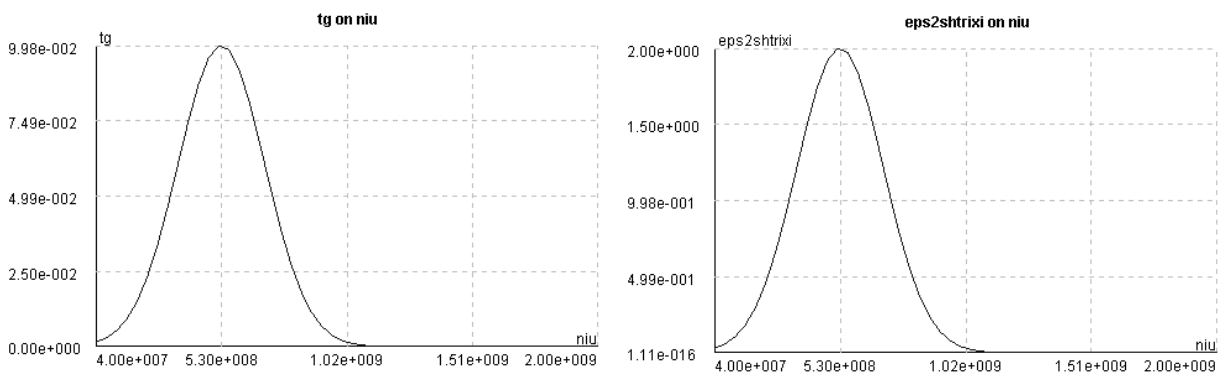
**ნახ. 2.1** სველი ნიადაგის მიღევის ტანგენსის სიხშირეზე დამოკიდებულება



**ნახ. 2.2** აღდგენილი მახასიათებლის საზე

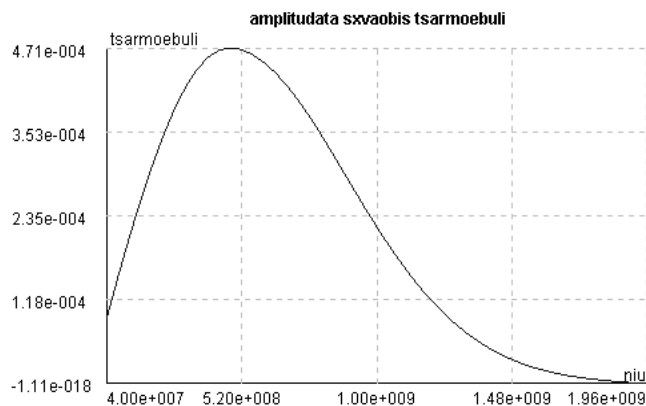
როგორც სურათიდან ჩანს თანხვედრა საკმაოდ კარგია და ეს ფაქტი იძლევა იმედს, რომ დისტანციურად, ელ-მაგნიტური ტალღის იმპულსის ზონდირებით, შესაძლებელია სწრაფად დადგინდეს ნიადაგის “გამჭვირვალობის” სიხშირული არე.

განვიხილოთ შემთხვევა როდესაც  $\epsilon'$  მუდმივია, ხოლო  $\epsilon''$  და მიღევის კუთხის ტანგენსი დამოკიდებულია სიხშირეზე ისე, როგორც ეს ნახ. 2.3-ზეა ნაჩვენები (კომპლექსური დიელექტრიკული შეღწევადობა  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ ; ხოლო მიღევის კუთხის ტანგენსი  $tg\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$ .)



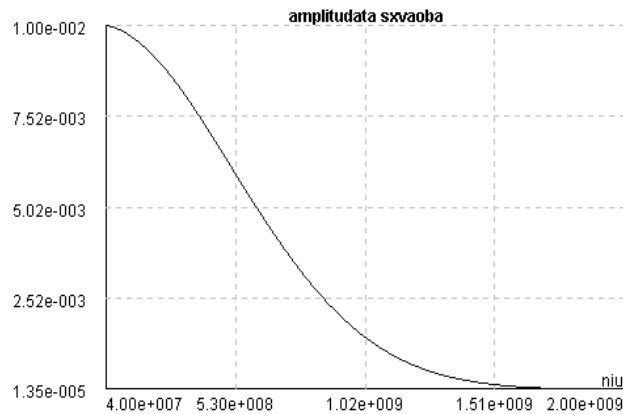
ნახ. 2.3 მიღევის ტანგენსის სიხშირული მახასიათებელი (მარცხნივ) და  $\epsilon''$  – ის ადგილობრივი სიხშირული მახასიათებელი (მარჯვნივ)

დაცემული და არეკვლილი იმპულსების სპექტრალური კომპონენტების ფაზათა სხვაობის სიხშირეზე დამოკიდებულება იმეორებს  $\epsilon''$ -ის მახასიათებლის ფორმას. მახასიათებლის შესახებ ინფორმაციას იძლევა არა მარტო ფაზათა სხვაობა, არამედ ამპლიტუდათა სხვაობის წარმოებულები. მისი სიხშირეზე დამოკიდებულება წარმოდგენილია ნახ. 2.4-ზე.



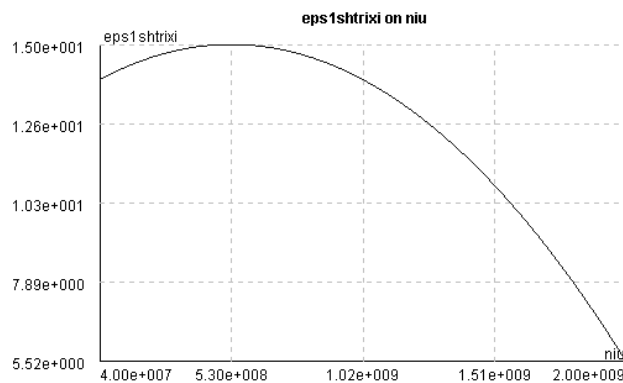
ნახ. 2.4 ამპლიტუდათა სხვაობის წარმოებულის სპექტრის სიხშირეზე დამოკიდებულება

ყურადღება უნდა მიექცეს იმ ფაქტს, რომ აქ ლაპარაკია ამპლიტუდათა სხვაობის წარმოებულზე და არა ამპლიტუდათა სხვაობაზე. ამ უკანასკნელის სისშირული მახასიათებელი წარმოდგენილია ნახ. 2.5-ზე და ნათლად ჩანს, რომ ის მახასიათებლის შესახებ ინფორმაციას არ იძლევა:



ნახ. 2.5  
ამპლიტუდათა სხვაობის სპექტრის სისშირული მახასიათებელი

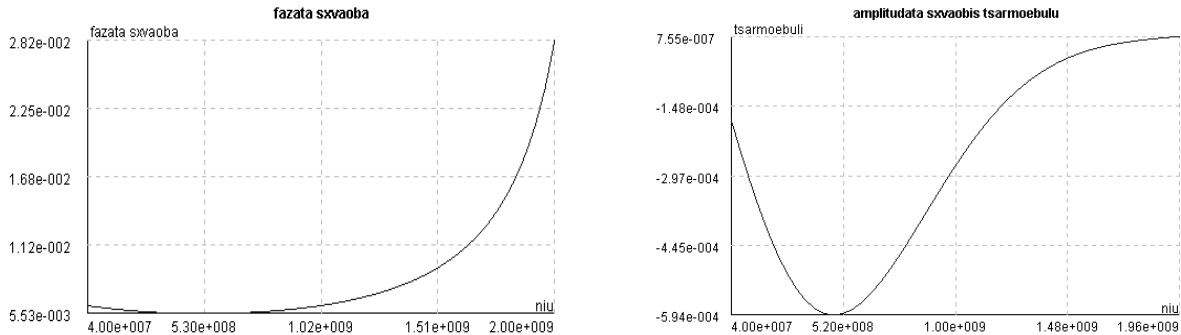
ახლა განვიხილოთ შემთხვევა როდესაც პირიქით  $\epsilon''$  მუდმივია, ხოლო  $\epsilon'$  დამოკიდებულია სისშირეზე, ისე როგორც ეს ნახ. 2.6-ზეა ნაჩვენები.



ნახ. 2.6  
 $\epsilon'$  – ის სისშირული მახასიათებელი

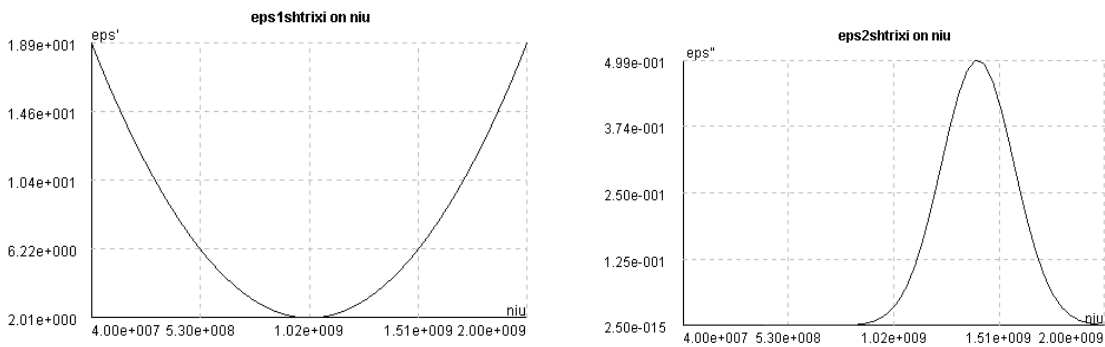
ამ შემთხვევაში დაცემული და არეკვლილი იმპულსის სპექტრალური კომპონენტების ფაზათა სხვაობა და ამპლიტუდათა სხვაობის წარმოებული

იძლევა საშუალებას ვიპოვოთ მახასიათებლის ექსტრემუმი. ნახ. 2.7-ზე წარმოდგენილია მათი სიხშირული მახასიათებლები.



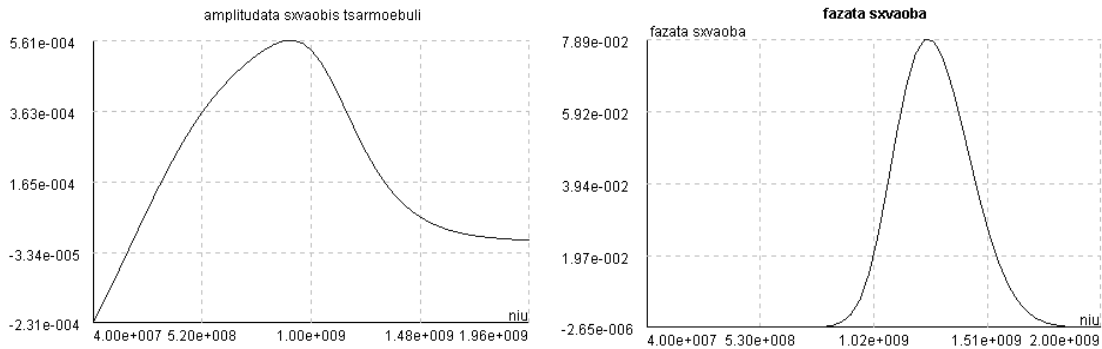
ნახ. 2.7 დაცემული და არეკვლილი იმპულსის სპექტრალურ კომპონენტების ფაზათა სხვაობისა (მარცხნივ) და ამპლიტუდათა სხვაობის (მარჯვნივ) წარმოებულის სიხშირული მახასიათებლები

განვიხილოთ საბოლოო ყველაზე ზოგადი შემთხვევა, როდესაც  $\epsilon'$  და  $\epsilon''$  ორივე დამოკიდებულია სიხშირეზე. ეს დამოკიდებულებები მოცემულია ნახ. 2.8-ზე.



ნახ. 2.8  $\epsilon'$  -ის (მარცხნივ) და  $\epsilon''$  -ის (მარჯვნივ) სიხშირული მახასიათებლები

ამ შემთხვევაში დაცემული და არეკვლილი იმპულსის სპექტრალური კომპონენტების ამპლიტუდათა სხვაობის წარმოებულები აღადგენს და პოულობს  $\epsilon'$ -ის ექსტრემუმს, ხოლო ფაზათა სხვაობა კარგი სიზუსტით აღადგენს  $\epsilon''$ -ის სიხშირულ მახასიათებელს (ნახ. 2.9).



**ნახ. 2.9** ამპლიტუდათა სხვაობის წარმოებული ადადგენს  $\epsilon'$ -ის ექსტრემუმს (მარცხნივ), ხოლო ფაზათა სხვაობა კარგი სიზუსტით ადადგენს  $\epsilon''$ -ის სიხშირულ მახასიათებელს (მარჯვნივ)

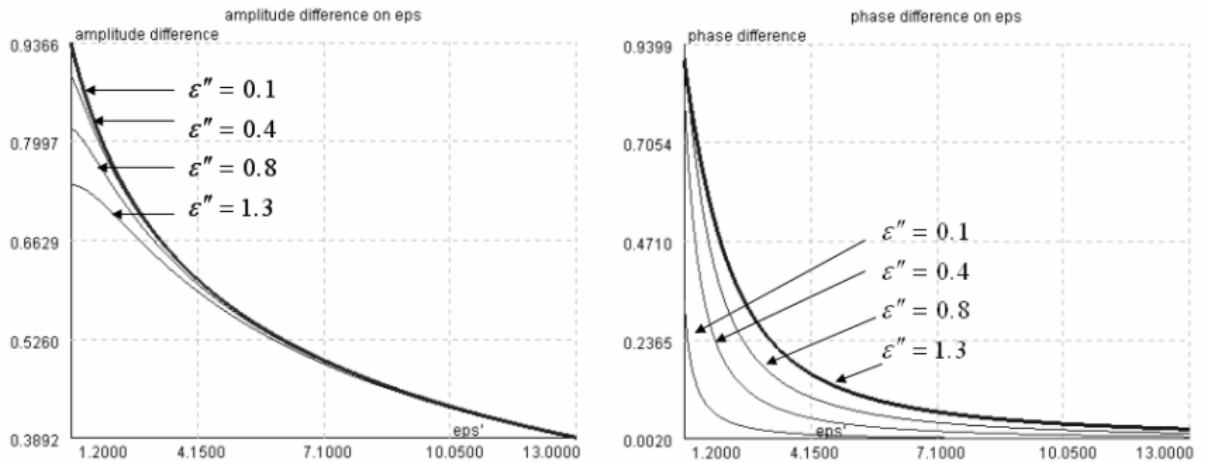
ამ მახასიათებლების მიღებისთვის ჩვენ გამოვიყენეთ ზუსტი ამონახსნის ფორმულა იმ შემთხვევისათვის, როდესაც ორი გარემოს გამყოფ ზედაპირს ეცემა ბრტყელი ელ-მაგ ტალღა. ანალიზური ფორმით არსებობს ეს ამონახსნი (1) და არეკვლის კოეფიციენტის კომპლექსურ გამოსახულებას აქვს შემდეგი სახე (სიმარტივისათვის, დაცემული ტალღის ამლიტუდა მიღებულია ერთის ტოლად):

$$r_{\perp} \equiv \frac{R_{\perp}}{E_{\perp}} = \frac{n_1 \cos \varphi - n_2 \cos \psi}{n_1 \cos \varphi + n_2 \cos \psi} \tag{1}$$

სადაც  $n_1$ - პირველი, ხოლო  $n_2$ - მეორე გარემოს გარდატეხის მაჩვენებელია; ხოლო  $\varphi$  და  $\psi$  შესაბამისად დაცემის და გარდატეხის კუთხე.

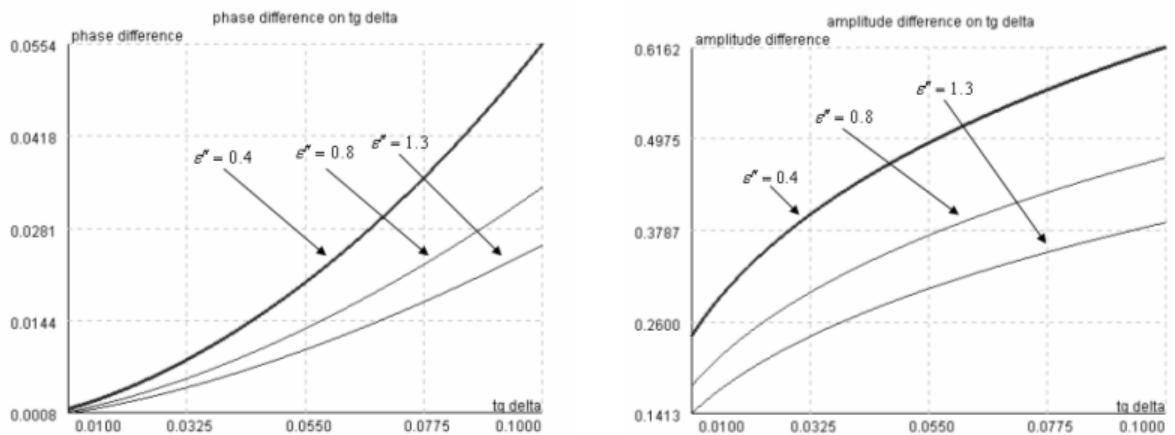
მიწიდან არეკვლილი ველი საშუალებას იძლევა განისაზღვროს არა მარტო მიწის მახასიათებლის ფორმა, არამედ რიცხობრივი მნიშვნელობებიც. განვიხილოთ  $\epsilon'$ -ის მნიშვნელობების ადდგენა, როდესაც ცნობილია  $\epsilon''$ . ამჯერად მიწას ეცემა მონოქრომატული ტალღა. პირველ რიგში ვაგებთ დაცემული და არეკვლილი ველის ფაზათა და ამპლიტუდათა სხვაობის დამოკიდებულებას  $\epsilon'$ -ზე და მიღების ტანგენსზე სხვადასხვა  $\epsilon''$ -ის შემთხვევაში (ნახ. 2.10, 2.11). ექსპერიმენტის დროს, როდესაც მოხდება არეკვლილი ველის ფაზის და ამპლიტუდის გაზომვა, მიღებული გრაფიკების საშუალებით მოხდება  $\epsilon'$ -ის და  $tg\delta$  - მნიშვნელობების განსაზღვრა.





ნახ. 2.10  
ფაზათა და ამპლიტუდათა სხვაობის  
დამოკიდებულება დიელექტრიკულ  
შედწევადობაზე

ნახ. 1.10, და 1.11-ზე წარმოდგენილია საწყისი გრაფიკები, რომელთა საშუალებითაც ხდება დიელექტრიკული შედწევადობისა და მიღევის ტანგენსის მნიშვნელობების აღდგენა, ფაზათა და ამპლიტუდათა სხვაობის გაზომილი მნიშვნელობების საფუძველზე.



ნახ. 2.11  
ფაზათა და ამპლიტუდათა სხვაობის  
დამოკიდებულება მიღევის კუთხის  
ტანგენსზე

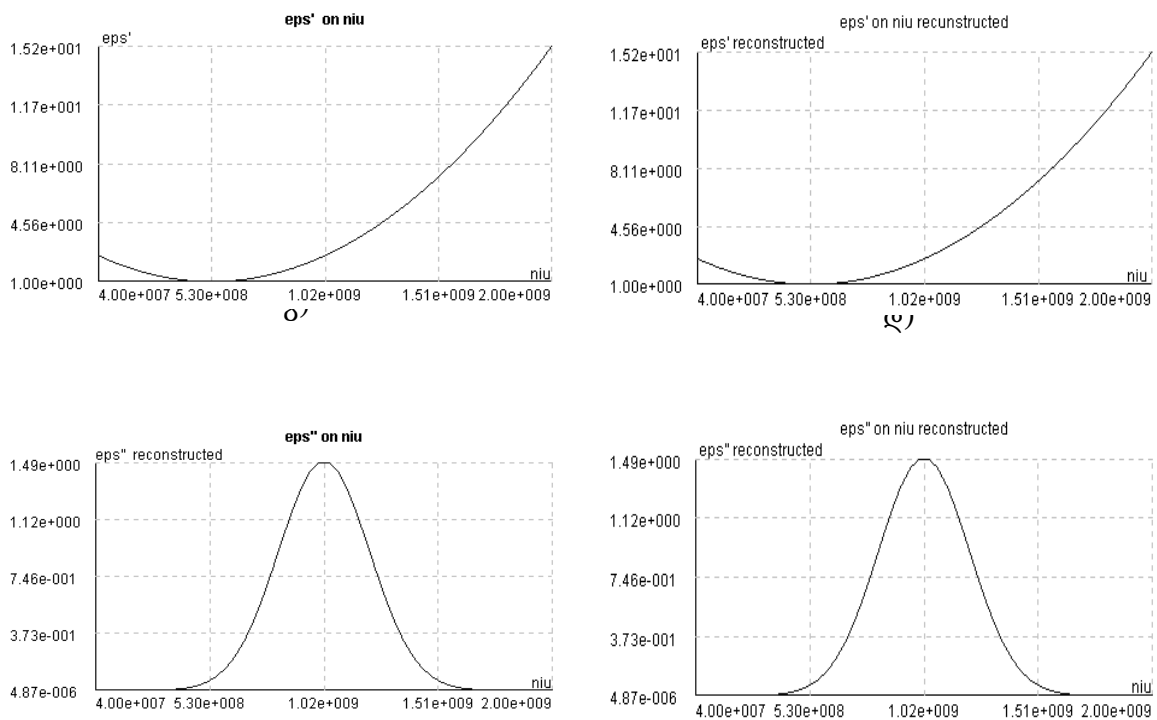
(1) ფორმულა საშუალებას იძლევა განისაზღვროს დიელექტრიკული შედწევადობა ანალიზურად. ამ ფორმულის მარტივი გარდაქმნის შედეგად, თუ გავითვალისწინებთ, რომ  $n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$  და  $n_2 = \sqrt{\epsilon_2}$ , და რადგანაც პირველი გარემო რომლიდანაც სხივი 2 გარემოს გამყოფ ზედაპირს ეცემა ჰაერია, ამიტომ  $\epsilon_1 = 1$ ,

$\varepsilon_1'' = 0$  და:

$$\varepsilon_2 = \left( \frac{\cos \varphi}{\cos \psi} \right)^2 \cdot \left( \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \right)^2 \quad (2)$$

თავიდან უნდა შეირჩეს იმპულსი საკმაოდ ფართო სიხშირული დიაპაზონით, მას ვშლით ფურიე სპექტრად და თითოეული სპექტრალური კომპონენტისთვის ვიყენებთ ფორმულას  $r_{\perp} = \frac{E_r}{E_{inc}}$ .

მიწას წინასწარ ვანიჭებთ სასურველ სიხშირულ მახასიათებელს, სადაც  $\varepsilon'$  და  $\varepsilon''$  დამოკიდებულია სიხშირეზე. და მას შემდეგ, რაც განვსაზღვრავთ არეკვლის კოეფიციენტს, ვიყენებთ (2) გამოსახულებას თითოეული სპექტრალური კომპონენტისთვის.



ნახ. 2..12

დიელექტრიკული შეღწევალობის სიხშირული მახასიათებლის აღდგენა:

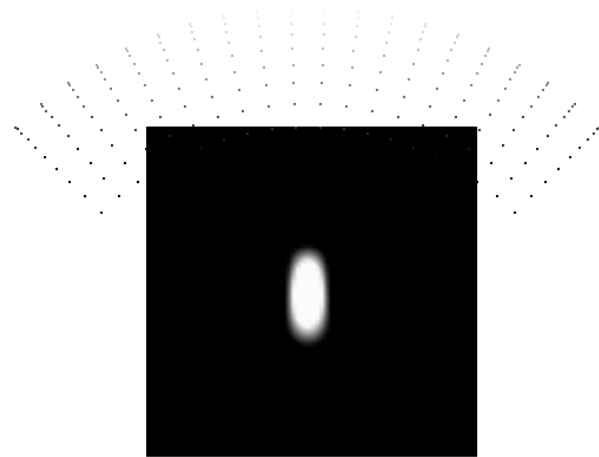
- ა)  $\varepsilon'$  -ის სიხშირული მახასიათებელი ბ) აღდგენილი  $\varepsilon'$  -ის სიხშირული მახასიათებელი
- გ)  $\varepsilon''$  -ის სიხშირული მახასიათებელი დ) აღდგენილი  $\varepsilon''$  -ის სიხშირული მახასიათებელი

დიელექტრიკული შეღწევადობის აღდგენილი მახასიათებელი რიცხვითი მნიშვნელობების მესამე ნიშნამდე სიზუსტით ემთხვევა საწყის მახასიათებელს. ნახ. 2.12-ზე წარმოდგენილია ამ მეთოდით დიელექტრიკული შეღწევადობის სიხშირული მახასიათებლის აღდგენის შემთხვევები.  $\epsilon'$ -ის სიხშირულ მახასიათებელს აქვს პარაბოლის ფორმა, ხოლო  $\epsilon''$ -ს გაუსის. ეს მეთოდი მუშაობს მაშინ, როცა მიწა ერთგვაროვანია და ბრტყელი, რაც საშუალებას იძლევა გამოვიყენოთ (2) ფორმულა.

### შებრუნებული ამოცანების ამოხსნა ჰოლოგრაფიული მეთოდის საშუალებით §2.2 წყაროთა ველის აღდგენა

ზემოთ ჩვენ განვიხილეთ ჰოლოგრაფიული მეთოდის არსი. კერძოდ, თუ რა სახეს იღებს დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი შებრუნებული ამოცანების ამოხსნისას. განვიხილოთ კონკრეტული შემთხვევა, როდესაც გვაქვს ერთი წყარო და მოვახდინოთ მისი ველის აღდგენა.

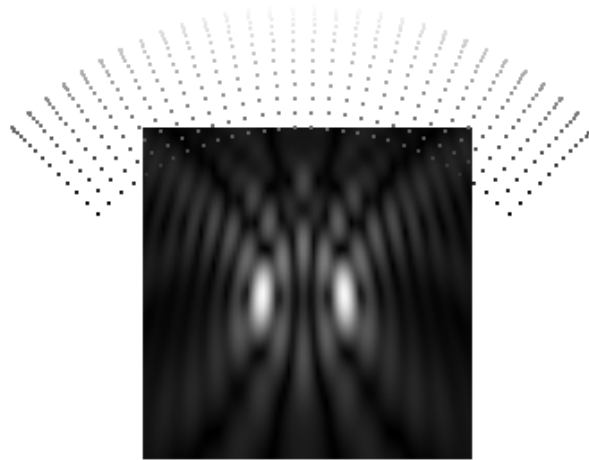
ნახ. 2.13-ზე წარმოდგენილია ელემენტარული დიპოლის ველის აღდგენილი სურათი. ნახ. 2.13-ზე წარმოდგენილია აგრეთვე სეგმენტი, რომელზეც ხდება ველის მნიშვნელობების გაზომვა. აღდგენილი ველის ხარისხი დამოკიდებულია სეგმენტის ზომაზე, მის მდებარეობაზე, ორიენტაციაზე და წყაროს სიხშირეზე.



ნახ. 2.13

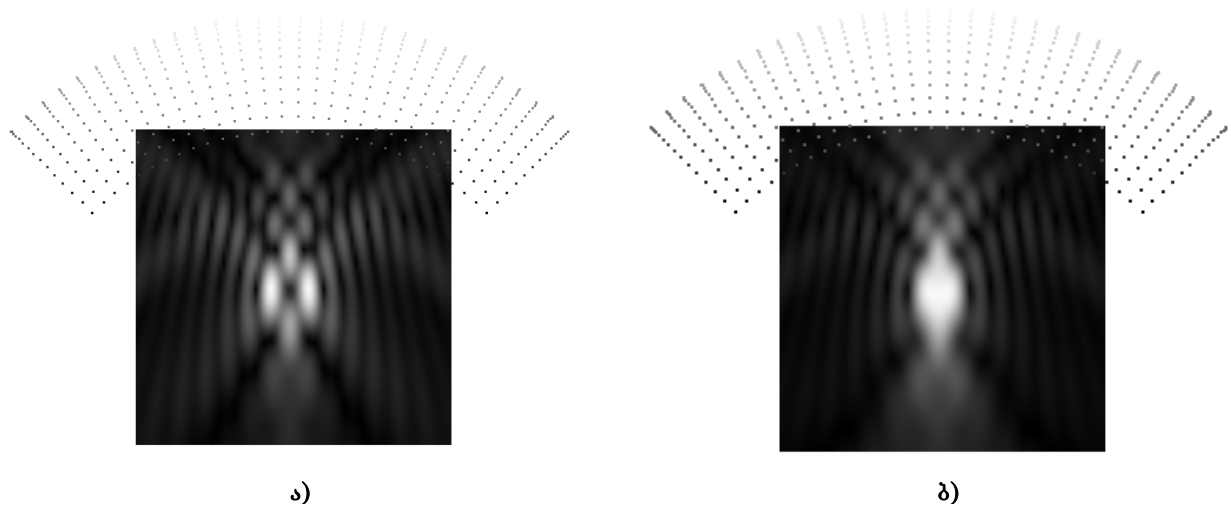
ერთი წყაროს ფოკუსირება  
აღდგენილი E ველის პროექცია

განვიხილოთ ორი წყაროს ველის აღდგენის შემთხვევა. რადგან თითოეული წყაროს აღდგენილი ველი არ არის წერტილი, ამიტომ ამ წყაროთა ველი გადაიფარება და გადაფარვას ადგილი ექნება მანამ, სანამ წყაროები ერთმანეთისგან გარკვეულ მანძილზე არ იქნებიან დაშორებული. ორი წყაროს ველის გარჩევადობა გაუმჯობესდება აგრეთვე სიხშირის გაზრდით.



ნახ. 2.14 ორი წყაროს  
ველის ადღგენა

ნახ. 2.14-ზე წარმოდგენილია ორი ელემენტარული დიპოლის ველის ადღგენილი სურათი. წყაროები განცალკევებულია და ამიტომ შეიძლება თითოეული მათგანის გარჩევა. ამ შემთხვევაში წყაროები ერთმანეთისგან ერთი მეტრით არიან დაშორებული. ახლა განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც წყაროები ერთმანეთთან ახლოს არიან მოთავსებული. ნახ. 2.15-ზე წარმოდგენილია ორი წყაროს ველის ადღგენა წყაროთა შორის სხვადასხვა მანძილის შემთხვევაში



ა)

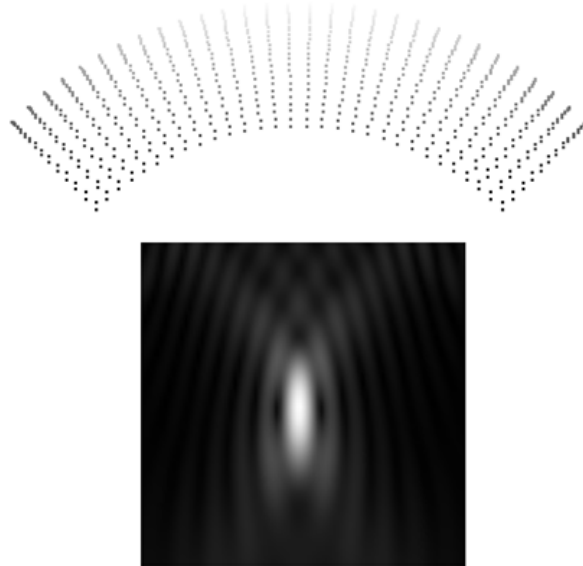
ბ)

ნახ. 2.15 2 წყაროს ველის ადღგენა

ა) წყაროთა შორის მანძილი 0.4 მეტრია

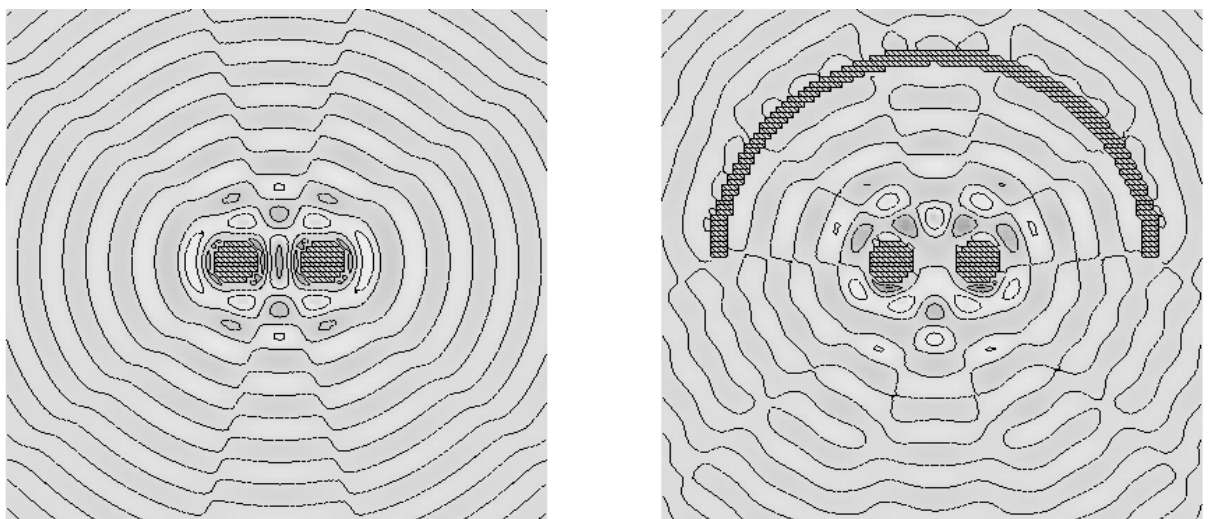
ბ) წყაროთა შორის მანძილი 0.3 მეტრი.

- ა) შემთხვევაში წყაროთა შორის მანძილი 0.4 მეტრია, ხოლო ბ) შემთხვევაში 0.3 მეტრი. როგორც ნახაზებზე ჩანს, წყაროთა დაახლოებით მათი გარჩევადობა უარესდება და ბ) შემთხვევაში ის ერთ წყაროდ აღიქმება. დაუბრუნდეთ ისევ ერთი წყაროს შემთხვევას და ვნახოთ როგორაა დამოკიდებული წყაროს ველის აღდგენა სეგმენტის მდებარეობაზე.



ნახ. 2.16  
ერთი წყაროს ველის აღდგენა, როდესაც  
წყარო სეგმენტიდან მოშორებულია

ჩვენს მიერ განხილულ წინა შემთხვევებში, სეგმენტის ცენტრი წყაროდან დაცილებული იყო 1.5 მეტრით და წყარო მდებარეობდა სეგმენტის მიერ შემოსაზღვრულ სექტორის შიგნით. თუ სეგმენტს გადავაადგილებთ ზევით ისე, რომ სეგმენტის ცენტრი დაემთხვევა წყაროს მდებარეობას, მივიღებთ შემდეგ სურათს ( ნახ. 2.16)



ა)

ბ)

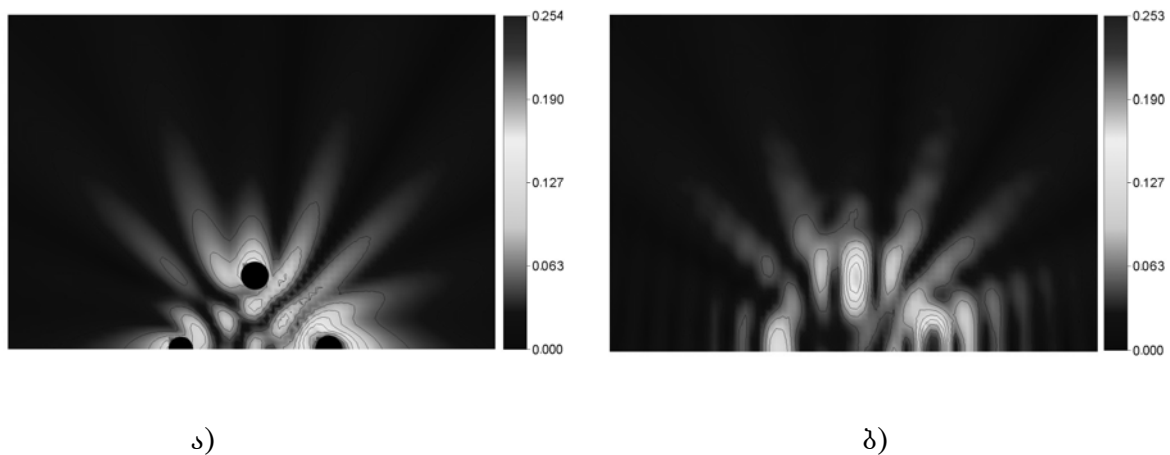
ნახ. 2.17  
2 წყაროს ველი დინამიურ რეჟიმში  
ა) რეალური ველი ბ) აღდგენილი

როგორც ნახაზზე ჩანს, წყაროს ველი უფრო მეტადაა გადღაბნილი მე-2.13 სურათზე წარმოდგენილ შემთხვევასთან შედარებით, ანუ ადღენის ხარისხი გაუარესებულია. აქედან გამომდინარეობს, რომ ადღენილი სურათი უფრო ახლოსაა რეალურთან, თუ წყარო სეგმენტის შემოსაზღვრული სექტორის შიგნით მდებარეობს.

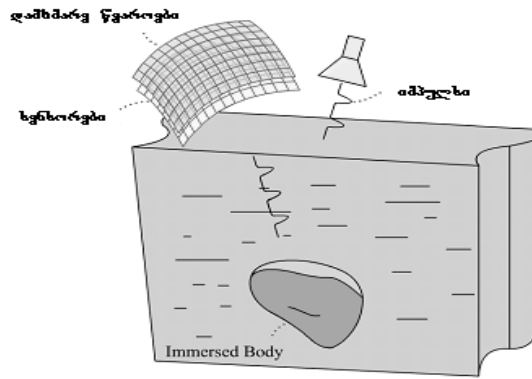
აქამდე ვაკვირდებოდით ველის ამპლიტუდის მნიშვნელობების განაწილებას. ახლა შევადაროთ ველის მნიშვნელობები ფაზების გათვალისწინებით. ნახ. 2.17-ზე წარმოდგენილია ორი წყაროს ველი დინამიურ რეჟიმში: ა) სურათზე შემთხვევა შეესაბამება რეალური ველის სურათს; ხოლო ბ) ადღენილს. სეგმენტის შიგნით ველის მნიშვნელობები ერთმანეთს მეოთხე ნიშნის სიზუსტით ემთხვევა. თუ ველის გავრცელების სურათს დავაკვირდებით, დავრწმუნდებით რომ სეგმენტის შიგნით არა მარტო ველის მნიშვნელობები, არამედ გავრცელების მიმართულებაც ემთხვევა. სურათზე (პროგრამულად) განულებულია (ნულადაა აღებული) ველის მნიშვნელობები უშუალოდ წყაროს მდებარეობის ადგილას, რადგან რეალური ველის შემთხვევაში იქ განსაკუთრებულობები გვაქვს. ჩვენ აქამდე განვიხილავდით განმხოლოებულ წყაროთა ველის ადღენის შემთხვევებს. ესეა განვიხილოთ კიდევ ერთი შემთხვევა, კერძოთ სამი წყაროს ველის ადღენა და შემდეგ გადავიდეთ უშუალოდ სხეულის ზედაპირის ადღენაზე. ნახ. 2.18 გვიჩვენებს სამი წყაროს ველის ადღენას ა) შეესაბამება რეალური ველის სურათს, სადაც უშუალოდ წყაროს მდებარეობის ადგილას ამოჭრილია (განულებულია) ველის მნიშვნელობები; ბ) კი შესაბამისად არის ადღენილი ველის სურათი. სურათებიდან ჩანს, რომ დამთხვევა საკმაოდ კარგია.

**§2.3 სხეულის ზედაპირის ადღენა**

განვიხილოთ სხეულის ზედაპირის ადღენის შემთხვევები. წინა შემთხვევებისგან ეს იმით განსხვავდება, რომ აქ სხეული პასიური გამომსხივებელია ანუ მასზე ეცემა იმპულსი, რომელსაც ასხივებს რეპორული ანტენა. სეგმენტზე ვზომავთ სხეულიდან არეკეტილ ველს (ნახ. 2.19).

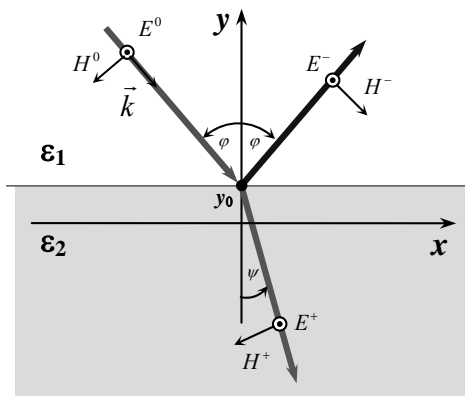


**ნახ. 2.18**  
**სამი წყაროს ველის ადღენა**  
 ა)რეალური ველი წყაროთა ახლო მიდამოში ველი განულებულია ბ)ადღენილი



ნახ. 2.19  
ამოცანის დასმა

ნახ. 2.19-ზე წარმოდგენილია მოდელი იმისა, თუ როგორ ვახდენთ ჩაძირული სხეულის ვიზუალიზაციას. დაცემული იმპულსი უნდა შეიცავდეს ისეთ სიხშირეებს, რომლისთვისაც მიწა მეტ-ნაკლებად გამჭვირვალეა. ასეთი იმპულსის შერჩევის შემთხვევა ზემოთ უკვე განხილული იყო. იმპულსი, რომელსაც ასხივებს რუპორული ანტენა, ნაწილობრივ ირეკვლება დედამიწის ზედაპირიდან, ნაწილი აღწევს მიწის სიღრმეში და ირეკვლება მიწაში არსებული არა-ერთგვაროვნებიდან. შემდეგ არეკვლილ ველს ვზომავთ გასაზომ ზედაპირზე მოთავსებულ სენსორებში. გაზომილ იმპულსებს ვშლით ფურიე სპექტრად და თითოეულ სპექტრალური კომპონენტისთვის ვახდენთ ველის მნიშვნელობების აღგენას სასურველ არეში;



ნახ 2.20

2 გარემოს გამყოფ ზედაპირი  
დაცემული არეკვლილი და გარდატეხილი სხივები

$$E^0 = E_0 \exp(-ik(x \sin \varphi - (y - y_0) \cos \varphi))$$

$$E^- = E_0 \rho_{\perp} \exp(-ik(x \sin \varphi + (y - y_0) \cos \varphi))$$

$$E^+ = E_0 \tau_{\perp} \exp(-ik(x \sin \psi + (y - y_0) \cos \psi))$$

$$P(y) = \int_{k_1}^{k_2} |E^0 + E^-|^2 dk = E_0^2 (k_2 - k_1) \left( 1 + \rho_{\perp}^2 + 2\rho_{\perp} \frac{\sin \alpha}{\alpha} \cos \beta \right) \quad \text{და} \quad \beta = (y - y_0)(k_2 + k_1) \cos \varphi$$

$$\min[P(y)] = E_0^2 (k_2 - k_1) (1 + \rho_{\perp}^2) = P(y_0) \quad \rho_{\perp} < 0 \quad (\epsilon_2 > \epsilon_1) \quad \alpha = (y - y_0)(k_2 - k_1) \cos \varphi$$

$$\max[P(y)] = E_0^2 (k_2 - k_1) (1 + \rho_{\perp}^2) = P(y_0) \quad \rho_{\perp} > 0 \quad (\epsilon_2 < \epsilon_1)$$

შემდეგ აღგენილ ველს ვამატებთ დაცემულ ველს და მის აბსოლუტურ მნიშვნელობებს ვკრიბავთ თითოეული სპექტრალური კომპონენტებისთვის. მათემატიკურად შეგვიძლია დავამტკიცოთ, რომ სრულ ველს მინიმუმი აქვს სხეულის ზედაპირზე. ამის მათემატიკური დასაბუთებას აქვს შემდეგი სახე.



ნახ. 2.21  
სფეროს გეომეტრია  
 $R = 1\text{მ}; \quad \varepsilon = 3.0; \quad \mu = 1.0$

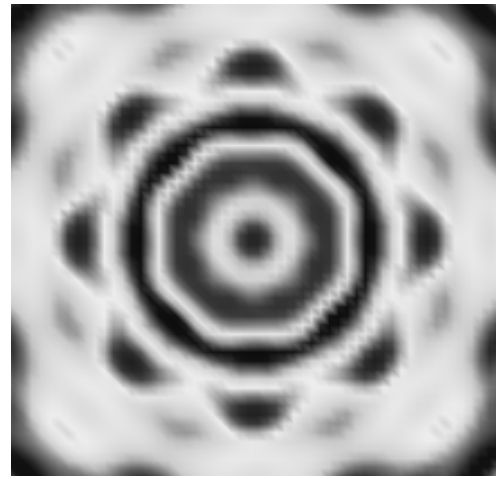


ნახ. 2.22  
სფერული სენსორული სეგმენტი

განვიხილოთ სფეროს ზედაპირის აღდგენის შემთხვევა. ნახ. 2.21-ზე მოცემულია სფეროს გეომეტრია. როგორც ნახაზზე ჩანს, სფერო სამკუთხედებად არის დაყოფილი. ასეთი სახით მოცემული გეომეტრიის დამუშავება გაცილებით მარტივია. მოცემულ სფეროზე ეცემა იმპულსი და შემდეგ ხდება სფეროდან არეკვლილი ველის რეგისტრირება (ნახ. 2.22) სეგმენტზე. ამ შემთხვევაში ჩვენ შეგვიძლია აღვადგინოთ სფეროს ზედაპირის გარკვეული ნაწილი. ნახ. 2.23-ზე წარმოდგენილია სწორედ ამ ნაწილის აღდგენის სურათი. სურათზე არსებული ველის მინიმუმი შეესაბამება სფეროს ზედაპირს.



ნახ. 2.23  
სფეროს ზედაპირის ნაწილობრივი აღდგენა



ნახ. 2.24  
სფეროს ზედაპირის სრული აღდგენა

თუ სფეროს დავასხივებთ რამოდენიმე მხრიდან და შემდეგ თითოეული შემთხვევისთვის აღვადგენთ მის ზედაპირს, ამ აღდგენილ ველთა სუპერპოზიცია მოგვცემს ნახ. 2.24-ზე გამოსახულ სურათს. ეს სურათი წარმოადგენს 8 სხვადასხვა მხრიდან აღდგენილი სფეროს ზედაპირის ზედღებას ისე, რომ



საათის ისრის საწინააღმდეგო მიმართულებით ხდებოდა წყაროს და სეგმენტის შემობრუნება 45 გრადუსით.

განვიხილოთ მეორე სფეროს ზედაპირის აღდგენის შემთხვევა. ეს სფერო წინა შემთხვევისაგან იმით განსხვავდება, რომ მისი დიელექტრიკული შეღწევადობა უფრო ნაკლებია (ნახ. 2.25).



ნახ. 2.25

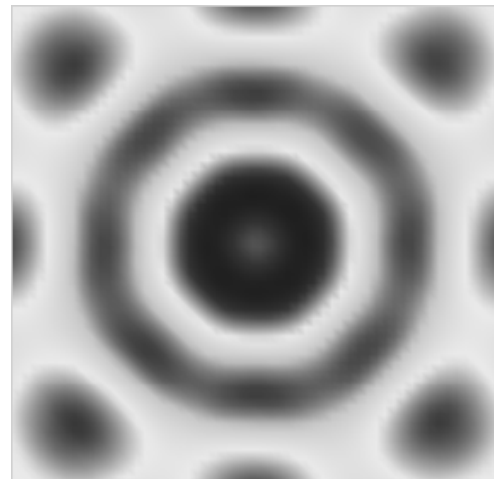
სფეროს გეომეტრია

$$R = 1\mu, \epsilon = 6.0, \mu = 1.0$$

თუ მოცემული სფეროსთვის გავიმეორებთ იგივე პროცედურას, ანუ აღვადგენთ მისი ზედაპირის ნაწილს სხვადასხვა მხრიდან და შემდეგ მოვახდენთ მათ სუპერპოზიციას, მივიღებთ შემდეგ სურათებს (ნახ. 2.26).



ა)

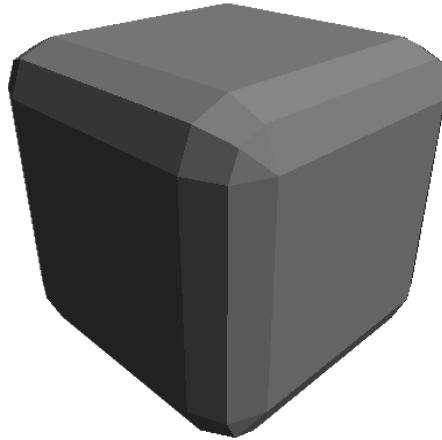


ბ)

ნახ. 2.26

- ა) სფეროს ზედაპირის ნაწილობრივი აღდგენა  
 ბ) სფეროს ზედაპირის სრული აღდგენა

ახლა განვიხილოთ უფრო რთული სხეულის ზედაპირის აღდგენა. კერძოდ კუბი, რომლის წიბოები მომრგვალებულია. (ნახ. 2.27)



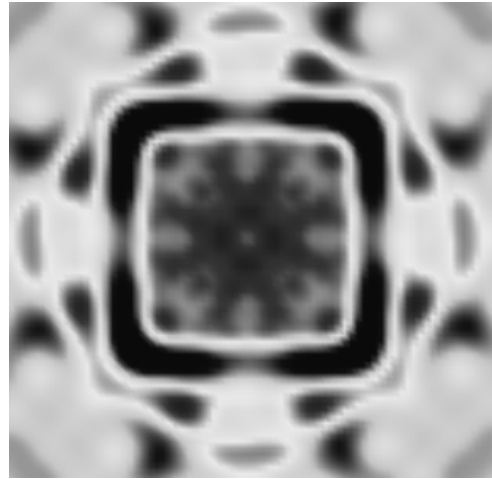
ნახ. 2.27

მომრგვალებულ წიბოებიანი კუბის გეომეტრია  
განზომილება:  $4\mu \times 4\mu \times 4\mu$ ;  $\epsilon=6.0$ ;  $\mu = 1.0$

ჩვეულებისამებრ ვათავსებთ წყაროს შორ მანძილზე. ამით უზრუნველყოფთ იმას, რომ სხეულზე დაცემული ტალღა ბრტყელია. მისგან არეკვილ ველს კი ვზომავთ სეგმენტზე (ნახ. 2.22). ერთჯერადი აღდგენის შედეგად მიიღება შემდეგი სურათი (ნახ. 2.28). აქ ჩანს კუბის სიბრტყით კვეთის მხოლოდ ნაწილის აღდგენა, რომელიც სურათზე მოცემულია შავი ზოლის სახით.



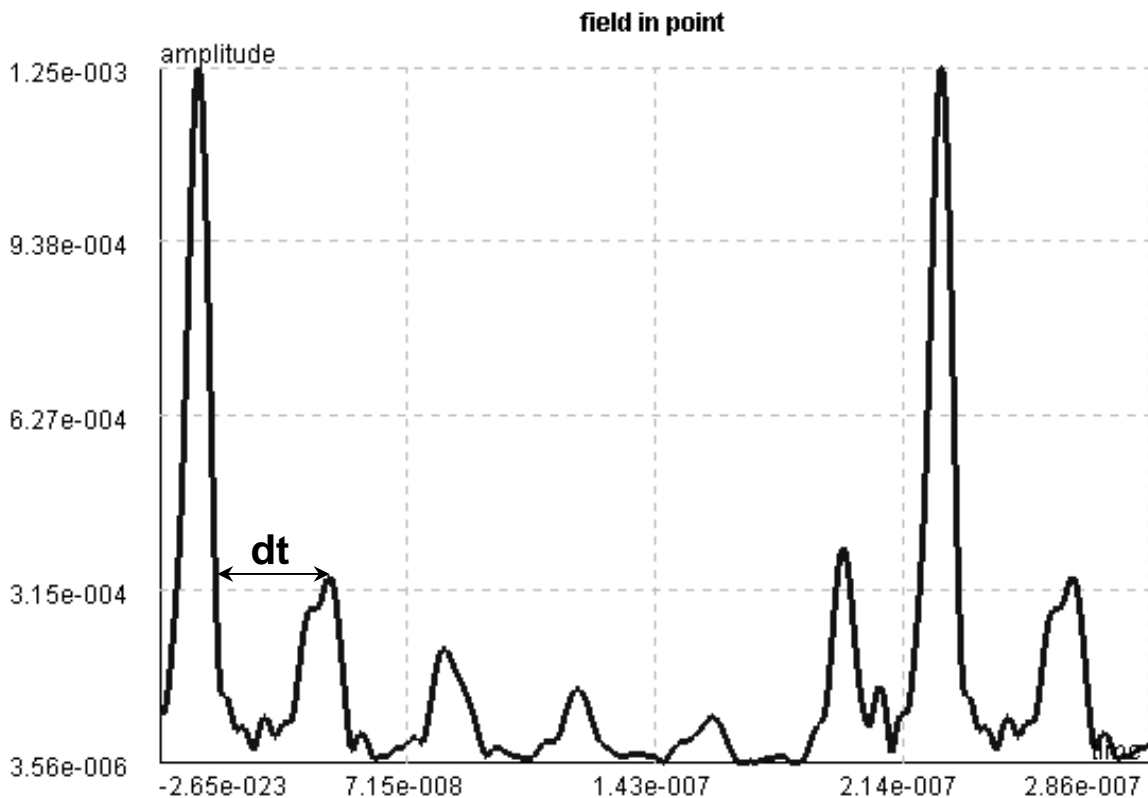
ნახ. 2.28  
კუბის ზედაპირის ნაწილობრივი  
აღდგენა



ნახ. 2.29  
კუბის ზედაპირის სრული აღდგენა

ნახ. 2.29 - კი გვიჩვენებს ამ კვების სრულ აღდგენას. აღდგენა შეიძლება მოვახდინოთ კუბის სხვა სიბრტყით კვებისთვისაც და ამით უზრუნველყოთ მისი ზედაპირის სრული აღდგენა.

დავუბრუნდეთ ისევ სფეროს აღდგენის შემთხვევას. ამჯერად გავზომოთ სფეროდან არეკვლილი ველი ერთ რომელიმე სფეროდან მოშორებულ წერტილში. მივიღებთ პერიოდულ იმპულსს, რომელიც გამოსახულია ნახ. 2.30-ზე. მოცემულ სურათზე ჩანს სფეროდან იმპულსის მრავალჯერადი არეკვლის შედეგი. კერძოდ, პირველადი იმპულსი ირეკვლება სფეროს წინა ზედაპირიდან, შემდეგ იმპულსი შედის შიგნით და ირეკვლება მისი უკანა ზედაპირიდან – მიიღება მეორადი არეკვლა; ნაწილი მეორადი არეკვლილი იმპულსისა ირეკვლება ისევ



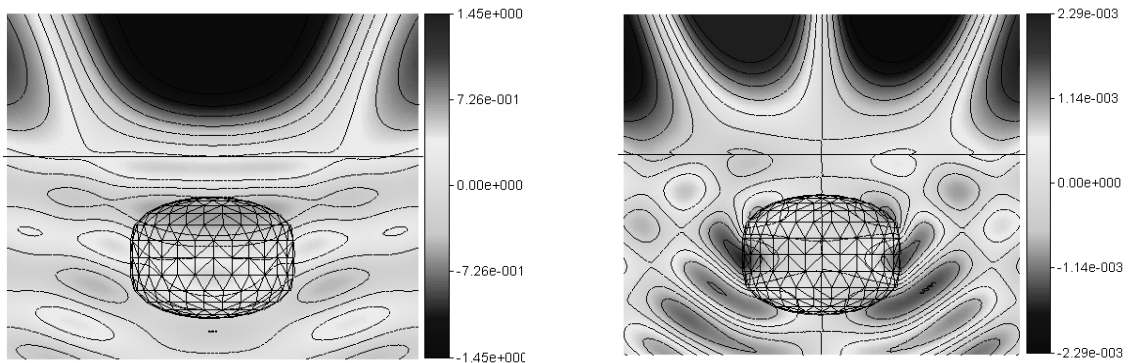
ნახ. 2.30

სფეროდან არეკვლილი იმპულსის დროზე დამოკიდებულება გაზომილი სფეროდან გარკვეულ მანძილზე წერტილში. ნახაზე ჩანს სფეროს ზედაპირიდან მრავალჯერადი არეკვლის შედეგი

წინა ზედაპირიდან და ასე შემდეგ, სანამ არ მიიღება. ნახ. 2.30 მაგალითად ჩანს 5 ჯერადი არეკვლა. დროის ინტერვალი  $dt$  ყოველ ორ მომდევნო არეკვლას შორის გვიჩვენებს თუ რა დროს აყოვნებს ტალღა სფეროს დიამეტრის გასწვრივ მოძრაობას წინ და უკან. თუ ვიცით სფეროს ზომები, მაშინ შევძლებთ დავადგინოთ მისი დიელექტრიკული შეღწევადობა, რადგან სფეროს შიგნით იმპულსის გავრცელების სიჩქარე  $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$  არამაგნიტურ გარემო

## §2.4 ჩაძირული სხეულის ზედაპირის აღდგენა

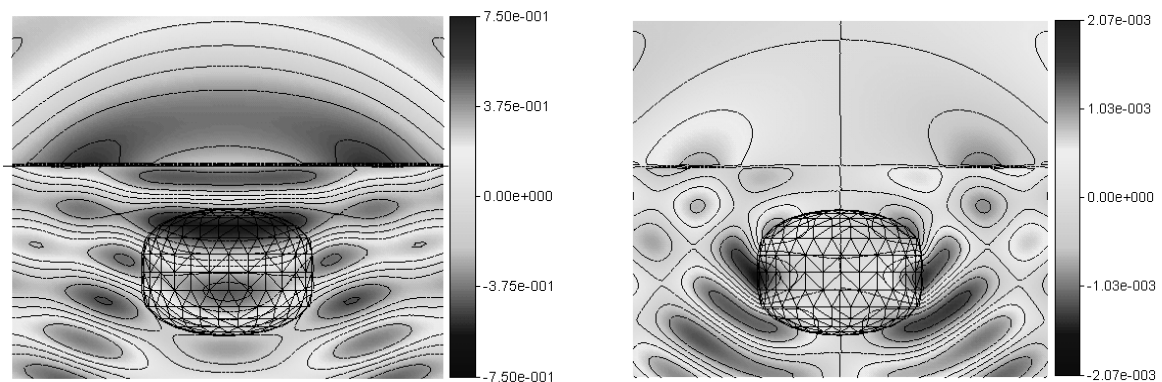
სანამ უშუალოდ ზედაპირის აღდგენის ამოცანაზე გადავიდოდეთ, გავარკვეოთ შესაძლებელია თუ არა ჩაძირული სხეულიდან არეკვლილი ველის გაზომვა და რა რიგისაა იგი.



ნახ. 2.31

$E_y$  და  $H_z$  ველების განაწილება მიწაში ჩაძირული სხეულის ახლო არეში

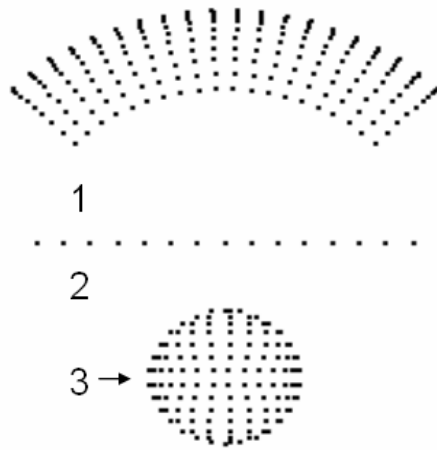
ნახ. 2.31-ზე გამოსახულია ჩაძირულ სხეულზე ელექტრომაგნიტური ტალღის დიფრაქციის შედეგად მიღებული ელექტრული და მაგნიტური დაძაბულობის განაწილებათა სურათები. მიწის ზემოთ მოცემულია სრული ველი, ანუ დაცემული და არეკვლილი ველების ჯამი. თუ ჩვენ მოცემული ველის გავრცელებას დავაკვირდებით დინამიურ რეჟიმში, დაცემული ველი საკმაოდ დიდია არეკვლილთან შედარებით; ამიტომ ფაქტიურად მარტო დაცემული ველი ჩანს. მაგრამ თუ მიწის ზემოთ გამოვსახავთ მხოლოდ არეკვლილ ველს, დავინახავთ რომ არეკვლილი ველი არცთუ ისე მცირეა და შეიძლება მისი გაზომვა. ეს შემთხვევა წარმოდგენილია ნახ. 2.32-ზე.



ნახ.2.32

$E_y$  და  $H_z$  ველების განაწილება მიწაში ჩაძირული სხეულის ახლო არეში

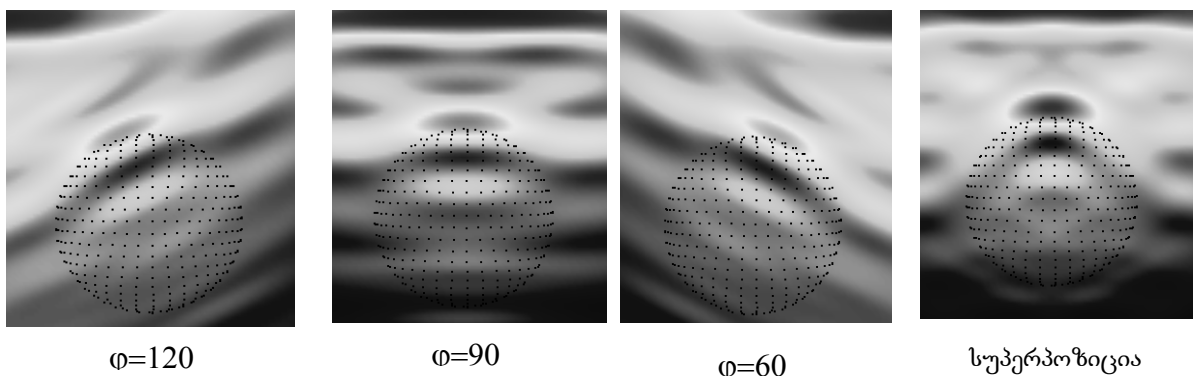
მიწაში ჩაძირული სხეულის მთელი ზედაპირის აღდგენა შეუძლებელია, რადგან ზემოდან ჩანს მხოლოდ წინა ნაწილი. იმის მიხედვით თუ მიწის მიმართ რა კუთხით ვაკვირდებით, დავინახავთ მისი ზედაპირის მხოლოდ ნაწილს. თუ შემდეგ მოვახდენთ სხვადასხვა კუთხიდან გადაღებული სურათების ზედდებას, მივიღებთ ჩაძირული სხეულის ზედაპირის დიდი ნაწილის აღდგენას. ჩვენ განვიხილეთ სხვადასხვა პარამეტრების მქონე მიწაში ჩაძირული სფეროს ზედაპირის აღდგენის მაგალითი. ერთ-ერთი შემთხვევა წარმოდგენილია ქვემოთ.



ნახ. 2.33

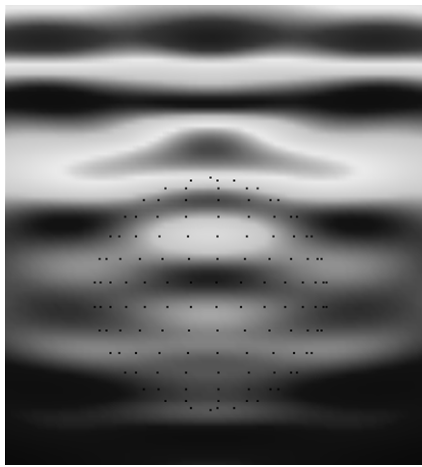
მიწაში ჩაძირული სხეულის და სენსორული სეგმენტის გეომეტრია  $e_1=1.0$  (ჰაერის),  $e_2=1.3$  (მიწის),  $e_3=4.0$  (ჩაძირული სხეულის)

ნახ. 2.33-ზე ნაჩვენებია ჩაძირული სფეროს და სენსორული სეგმენტის გეომეტრია, აგრეთვე მიწისა და სფეროს პარამეტრები. მოცემული პარამეტრების მქონე მიწისა და ჩაძირული სფეროსთვის განვიხილეთ სეგმენტის და ელექტრომაგნიტური იმპულსის წყაროს სხვადასხვა მდებარეობა, თითოეული შემთხვევისთვის აღვადგინეთ სხეულის მდებარეობა და შემდეგ მოვახდინეთ მათი ზედდება (ნახ.2.34).

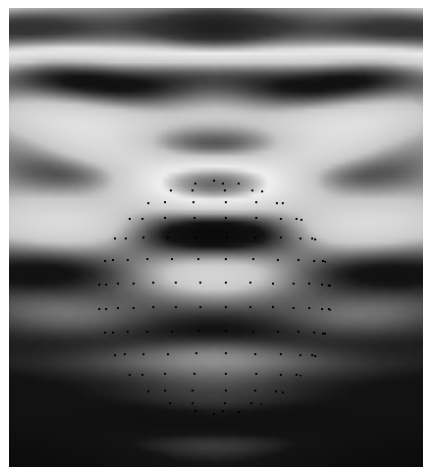


ნახ. 2.34 ჩაძირული სხეულის ზედაპირის აღდგენა სხვადასხვა კუთხით ყურებისას და მათი სუპერპოზიციის შედეგი

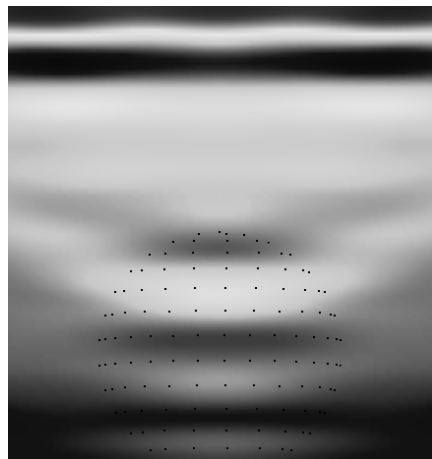
განვიხილოთ როგორ არის დამოკიდებული ჩაძირული სფეროს ზედაპირის აღდგენის ხარისხი მიწის დიელექტრიკულ შეღწევადობაზე. ეს დამოკიდებულება გამოწვეულია იმით, რომ ჩვენ სხეულის ზედაპირის აღდგენისას ვიყენებთ იმ მოვლენას, რომ სრული ველი სხეულის ზედაპირზე გვაძლევს მინიმუმს. ამისთვის სეგმენტზე გაზომილი ველის მნიშვნელობების საშუალებით აღდგენილ ველს უნდა დავადოთ დაცემული ველი, რაც ვაკუუმში მოთავსებული სხეულისთვის ცნობილია. მაგრამ მიწაში მოთავსებული სხეულისთვის ზოგადად უცნობია. ამიტომ ჩაძირული სხეულის შემთხვევაშიც აღდგენილ ველს ვამატებთ დაცემულ ველს ვაკუუმში. ამიტომ მიწის დიელექტრიკული შეღწევადობის ზრდასთან ერთად ცდომილება მოიმატებს. ამ შემთხვევას გამოსახავს ნახ. 2.35-ზე გამოსახული სურათები.



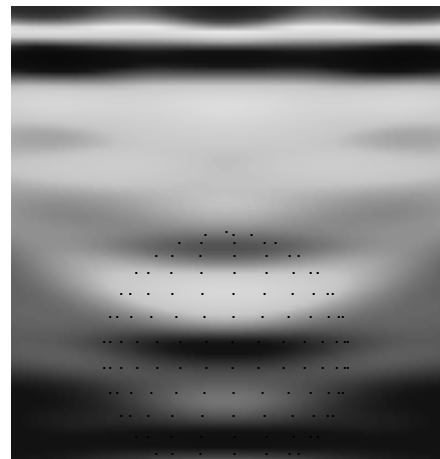
ა)  $\epsilon_1=1, \epsilon_2=1.1, \epsilon_3=4$



ბ)  $\epsilon_1=1, \epsilon_2=1.5, \epsilon_3=4$



გ)  $\epsilon_1=1, \epsilon_2=2, \epsilon_3=5$

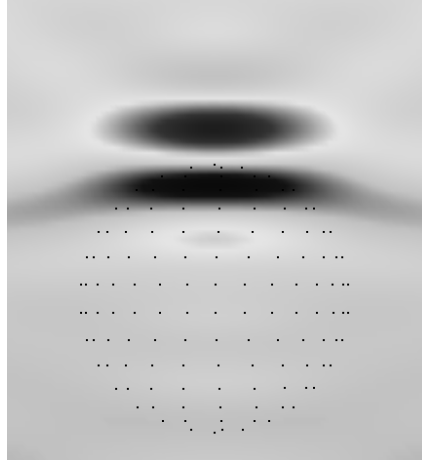


დ)  $\epsilon_1=1, \epsilon_2=2, \epsilon_3=6$

ნახ. 2.35 ჩაძირული სფეროს ზედაპირის აღდგენა  $\epsilon_1$ - ჰაერის დიელექ. შეღწ.,  $\epsilon_2$ - მიწის  $\epsilon_3$ - ჩაძირული სხეულის.

სურათებზე ზედა მინიმუმი შეესაბამება მიწის ზედაპირს, ქვედა კი სფეროს ზემოთა ნაწილს. დიელექტრიკული შეღწევადობის ზრდასთან ერთად აღდგენის სიზუსტე მცირდება, მაგრამ მიწის დიელექტრიკული შეღწევადობა, განსაკუთრებით თუ ის მშრალია, არ არის დიდი და ეს ამოცანა ამ მეთოდის საშუალებით მესამე მიშნის კარგი სიზუსტით იხსნება.

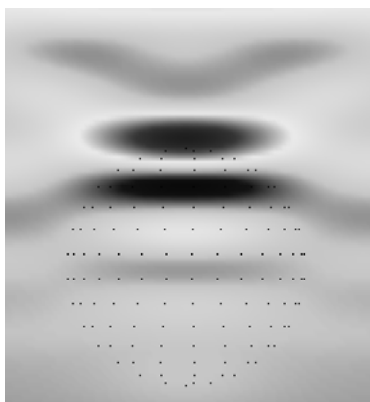
აქამდე განვიხილავდით ჩაძირულ დიელექტრიკულ სფეროს. მოცემული მეთოდი საშუალებას ვაძლევს აღვადგინოთ ჩაძირული მეტალური სფეროს ზედაპირიც; თანაც აღდგენის ხარისხი გაცილებით უკეთესია, რადგან არეკვლილი ველი გაცილებით მეტია.



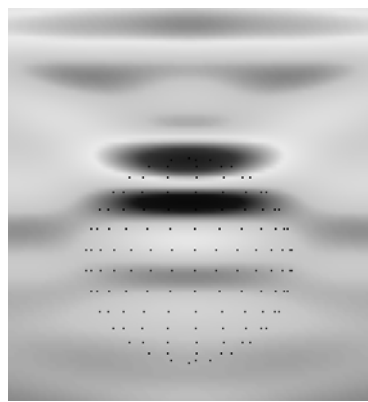
ნახ. 2.36

თავისუფალ სივრცეში მოთავსებული  
მეტალური სფეროს ზედაპირის აღდგენა

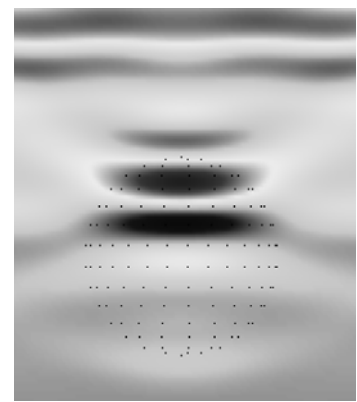
ნახ. 2.36 წარმოადგენს მეტალურ სფეროს ზედაპირის აღდგენას ვაკუუმში. ვიზუალური დაკვირვების თვალსაზრისით საკმაოდ კარგი მინიმუმი მიიღება სფეროს ზედაპირზე. თუ მოცემულ სფეროს მოვითავსებთ დიელექტრიკში, ანუ ჩვენ შემთხვევაში ჩავიძირავთ მიწაში, დავინახავთ რომ დიელექტრიკული შეღწევადობის ზრდასთან ერთად ველის მინიმუმი, რომელიც სფეროს მდებარეობას გვიჩვენებს, ქვევით ინაცვლებს (ნახ. 2.37). თუმცა ეს წანაცვლება სფეროს ფარგლებს არ ცილდება.



ა)  $\epsilon_1 = 1, \epsilon_2 = 1.3$



ბ)  $\epsilon_1 = 1, \epsilon_2 = 1.5$



გ)  $\epsilon_1 = 1, \epsilon_2 = 2$

ნახ. 2.37

ჩაძირული მეტალის ზედაპირის  
აღდგენა

## §2.5 სეგმენტზე ველის ინტერპოლაცია

როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, ჩაძირული სხეულის ვიზუალიზაციისათვის საჭიროა სფერულ სეგმენტზე, რომელიც მოთავსებულია მიწის ზემოთ, გაიზომოს ველის მნიშვნელობები და შემდეგ მოხდეს ველის აღდგენა გაზომილი ველის მნიშვნელობების საფუძველზე. აღდგენის წინასწარ არჩეული მაღალი სიზუსტის სიზუსტის მისაღებად საჭიროა ველი გაიზომოს საკმაოდ ბევრ წერტილში. ჩვენს ამოცანაში ეს რიცხვი უდრის 121-ს; მაგრამ რეალურად ამის განხორციელება მეტად მოუხერხებელია, რადგან თითოეულ წერტილში ველის გაზომვისთვის გვჭირდება თითო ხელსაწყო – სულ დაგვჭირდება 121. ასეთი გამზომი ხელსაწყოები საკმაოდ ძვირია, და ეს პრობლემაც რომ არ არსებობდეს, 121 ხელსაწყოს ტრანსპორტირება იმისათვის, რომ გამოკვლეულ იქნას მიწის სხვადასხვა უბანი, მეტად მოუხერხებელია. მეტად მნიშვნელოვანი და აუცილებელია, რომ მოხდეს ამ რაოდენობის მინიმიზაცია. ამ პრობლემის გადასაჭრელად მივმართავთ ველის ინტერპოლაციის მეთოდს, ანუ ხდება ველის მნიშვნელობების გაზომვა სეგმენტზე მცირე რაოდენობის წერტილებში, და შემდეგ იმ დაშვებით, რომ ველი იმ სეგმენტის



აღდგენილი ველი ინტერპოლაციის გარეშე  
წერტილების რაოდენობა: 11x11



აღდგენილი ველი ინტერპოლაციით  
წერტილების რაოდენობა: 6x6

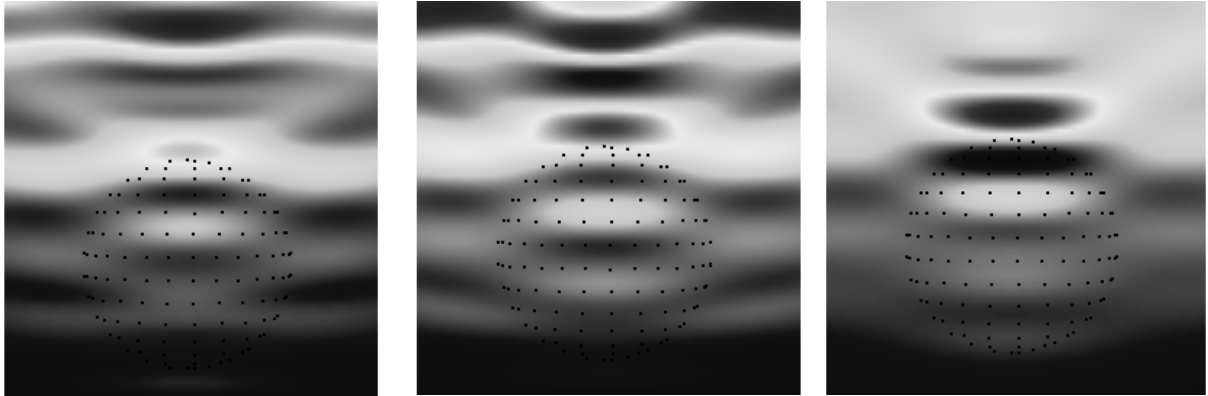
ნახ. 2.38

სეგმენტზე ველის ინტერპოლაცია

გასწვრივ რომელზეც გაზომვა ხდება, მცირედ იცვლება, ვახდენთ მის ინტერპოლაციას – იგივე აპროქსიმაციას. ნახ. 2.38-ზე წარმოდგენილია 121 სენსორის საშუალებით ველის აღდგენა და შემთხვევა, როცა გვაქვს მხოლოდ 36 წყარო; ოღონდ შემდეგ მოვახდინეთ ველის ინტერპოლაცია. როგორც სურათებიდან ჩანს დამთხვევა საკმაოდ კარგია. ჩვენ არ შევჩერდით წერტილების აღნიშნულ რაოდენობაზე და შევამცირეთ: კერძოდ, გავიხილეთ 25, 9 წერტილის შემთხვევები; და ბოლოს ვაჩვენეთ, 4 წერტილისთვისაც კიდევ სრულიად



დამაკმაყოფილებლად შეიძლება ველის აღგენა. ეს შემთხვევები წარმოდგენილია ნახ. 2.39-ზე.



წერტილების რაოდენობა 5X5

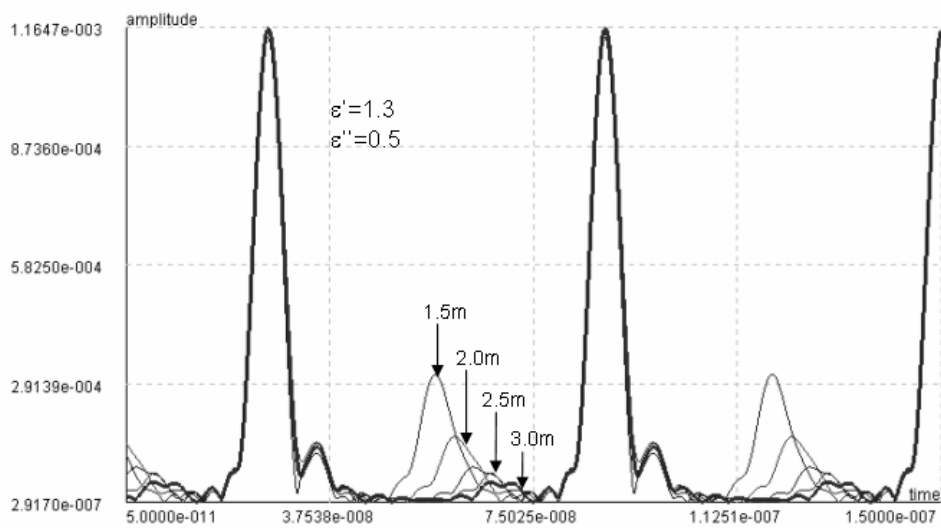
წერტილების რაოდენობა 3X3

წერტილების რაოდენობა 2X2

ნახ. 2.39  
ველის აღგენა ინტერპოლაციით

**§2.6 მიწის შთანთქმის უნარიანობის დამოკიდებულება სხეულის ჩაძირვის სიღრმეზე**

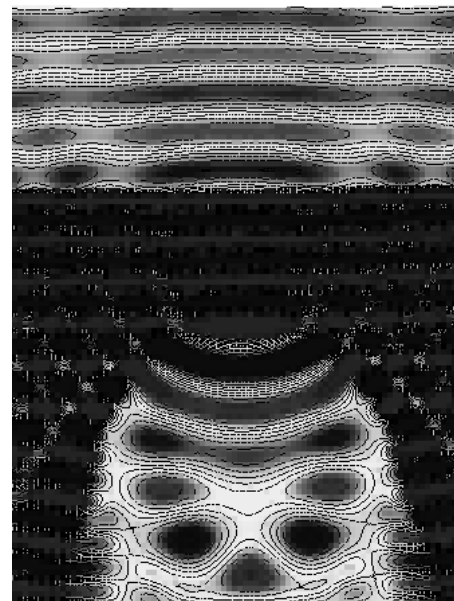
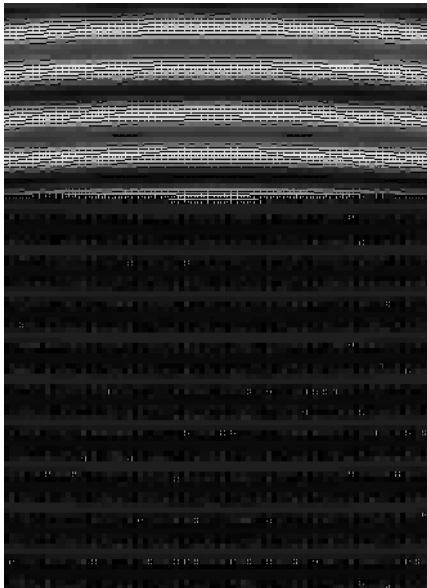
როგორც ზემოთ აღვნიშნეთ, მიწას ვასხივებთ იმპულსით, რომლის სპექტრიც მდებარეობს იმ უბანში, რომლისთვისაც მიწა მეტ-ნაკლებად გამჭვირვალეა. ამ დიაპაზონშიც კი მიწას გარკვეული შთანთქმა მაინც გააჩნია. ამიტომ რაც უფრო ღრმად არის სხეული, მით მეტი მანძილის გავლა უხდება იმპულსს და მით მეტად მიიღევა.



ნახ. 2.40  
არეკვლილი იმპულსის დამოკიდებულება სხეულის მიწაში ჩაძირვის სიღრმეზე

ნახ. 2.40-ზე წარმოდგენილია მიწის ზემოთ მოთავსებულ სენსორში გაზომილი მიწიდან არეკვლილი იმპულსის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკა ოჯახი, მიწაში სხეულის სხვადასხვა სიღრმეზე ჩაძირვის შემთხვევისათვის. სურათზე პირველი პიკი შეესაბამება მიწიდან არეკვლილ იმპულსს, ხოლო მეორე კი სხეულიდან არეკვლილს. როგორც სურათზე ჩანს, მეორე პიკის სიმაღლე მცირდება ჩაძირვის სიღრმის მატებასთან ერთად და 3 მეტრის შემდეგ, ფაქტიურად ხმაურის დონეზეა. გრაფიკები აგებულია  $\varepsilon'' = 0.5$ -ის შემთხვევისთვის. ეს არცთუ ისე მცირე შთანქმეა, რაც იძლევა შესაძლებლობას, რომ რეალურ შემთხვევაში უფრო ღრმად არსებულ ობიექტებსაც დავაკვირდებით.

როდესაც ელექტრომაგნიტური ტალღა ეცემა მიწას, ნაწილი ენერჯისა აირეკლება მისგან, ნაწილი კი აღწევს მიწის შიგნით და ირეკლება მიწაში არსებული არაერთგვაროვნებებიდან. ჩაძირული სხეულის ზედაპირის აღდგენისათვის, ცხადია რომ არეკვლილ იმპულსში, მიწის წიაღის არაერთგვაროვნებებიდან არეკვლილი წვლილი არ უნდა იყოს ძალიან მცირე მიწის ზედაპირიდან არეკვლილთან შედარებით, რათა მოხერხდეს მისი გაზომვა.



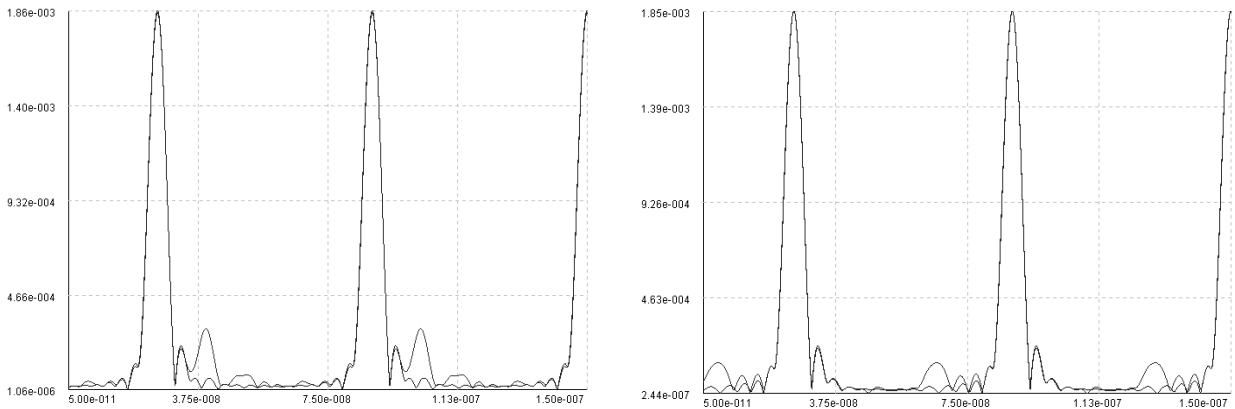
ნახ. 2.41

არეკვლილი ველის სურათი ერთგვაროვანი მიწიდან (მარცხნივ) და მიწაში მოთავსებული სფერული სიღრუიდან

ნახ. 2.41-ზე წარმოდგენილია მარცხნივ ერთგვაროვანი მიწიდან არეკვლილი ველის სურათი; ხოლო მარჯვნივ იგივე სურათი, როდესაც მიწაში გვაქვს სფერული სიღრუე. სურათზე ნათლად ჩანს, რომ სფერული სიღრუის შემთხვევაში მიწიდან არეკვლილ ველი განსხვავდება შემთხვევისგან, როცა მიწა არაერთგვაროვანია (ნახაზზე არეკვლილი ველი მოცემულია სურათის ზემო ნაწილში, მიწის გამყოფი ზედაპირის ზემოთ).

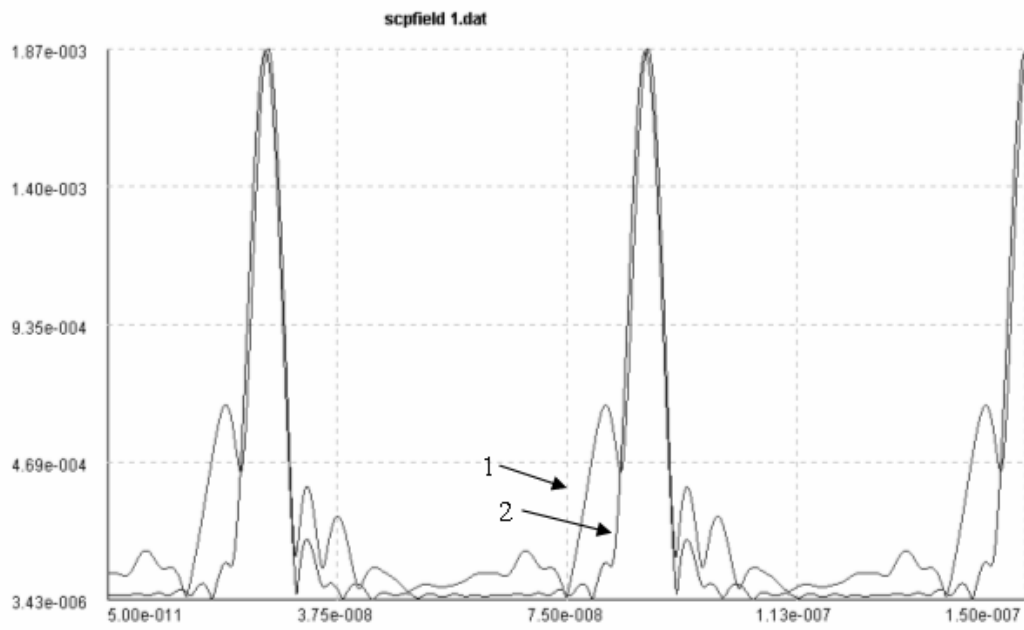
იგივე შედეგი ნათლად ჩანს იმპულსის არეკვლის დროს: თუ მიწის ზემოთ რომელიმე წერტილში გაგზომავთ არეკვლილ ველს, ზემოთ აღიშნული ორი შემთხვევისთვის განსხვავება აშკარა შეიქმნება. ეს კარგად ჩანს ნახ. 2. 42-ზე: მარცხნივ წარმოდგენილია 2 გრაფიკი – პირველი შეესაბამება ერთგვაროვანი მიწიდან იმპულსის არეკვლას; მეორე კი იმპულსის არეკვლას, როდესაც მიწაში მოთავსებულია სფერული სიღრუე – ამ შემთხვევისთვის გრაფიკზე ჩნდება

მეორე პიკი, რომელიც შეესაბამება სფერული სიღრუიდან არეკვლას, მიწიდან არეკვლის შესაბამისი პირველი პიკი კი ამ ორივე შემთხვევაში ერთმანეთს ემთხვევა. თუ სფერულ სიღრუეს მოვათავსებთ უფრო ღრმად, მაშინ გრაფიკზე მეორე პიკი წაინაცვლებს მარჯვნივ (ნახ. 2.42 მარჯვნივ).



**ნახ. 2.42**  
**მიწიდან არეკვლილი იმპულსის დროზე**  
**დამოკიდებულება**

თუ სფერულ სიღრუეს შევცვლით სფერული დიელექტრიკით, მაშინ არეკვლილი ველი ასევე შეიცვლება. ეს მოსალოდნელიცაა, რადგან წინააღმდეგ შემთხვევაში ვერ განვასხვავებდით რა ობიექტია მიწის შიგნით, ანუ აქედან გამომდინარე – სხვადასხვა ფორმის, ზომის, მდებარეობისა და დიელექტრიკული შეღწევადობის მქონე ჩაძირულ ობიექტს განსაზღვრული არეკვლილი იმპულსი შეესაბამება; მაშასადამე თუ შევადგენთ გარკვეულ ბიბლიოთეკას სხვადასხვა შემთხვევისთვის, რეალურ ექსპერიმენტზე ერთ წერტილში გაზომილი არეკვლილი იმპულსის საშუალებით განვსაზღვრავთ რა არაერთგვაროვნებაა მიწაში. ნახ. 2.43-ზე წარმოდგენილია ზემოთ აღნიშნული ორი შემთხვევისთვის არეკვლილი იმპულსების შედარება.



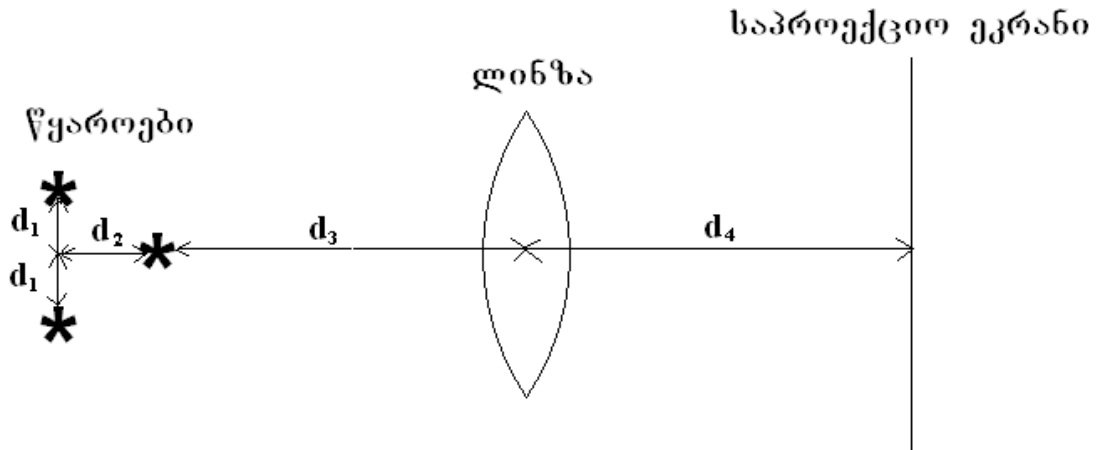
ნახ. 2.43

მიწიდან არეკევილი იმპულსების შედარება  
 1. მიწაში არსებული სფერული სიღრუიდან  
 2. მიწაში არსებული დიელექტრიკიდან

თავი III შებრუნებული ამოცანების ამოხსნა ფოტოგრაფიული მეთოდის საშუალებით

§2.7 ლინზის თვისებების გამოკვლევა

ზემოთ ჩვენ განვიხილეთ ფოტოგრაფიული მეთოდი, როგორც დამხმარე გამომსახვებლის მეთოდის კერძო შემთხვევა. როგორც უკვე აღვნიშნეთ, გვაქვს ლინზა, რომლის საშუალებითაც ხდება მიწიდან ან სხეულიდან არეკვლილი ველის ფოკუსირება. გამოვიკვლიოთ მისი თვისებები.



ნახ. 2.44 რამოდენიმე წყაროს ფოკუსირება

ვთქვათ გვაქვს სამი წყარო, რომლებიც განლაგებული არიან ნახ. 2.44-ზე ნაჩვენები სახით.

გამოვიკვლიოთ როგორ არის დამოკიდებული გამოსახულება წყაროთა მდებარეობაზე და ურთიერთგანლაგებაზე. ჯერ განვიხილოთ შემთხვევა, როდესაც წყაროები განლაგებულია ლინზის სიახლოვეში. ეს შემთხვევა გამოსახულია ნახ. 2.45-ზე. საკმარისია წყაროები ლინზას დავაშოროთ, რომ გამოსახულებაში წყაროთა შორის მანძილი შემცირდება. ეს კარგად ჩანს ნახ. 2.46-ზე

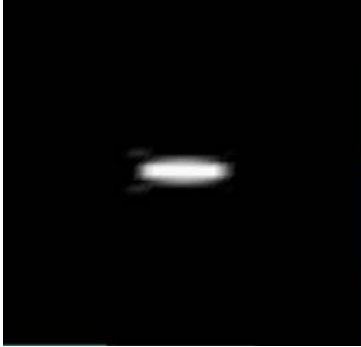


ნახ. 2.45  
რამოდენიმე წყაროს ფოკუსირება  
 $d_1=1, d_2 = 0.5, d_3 = 4, d_4 = 5$

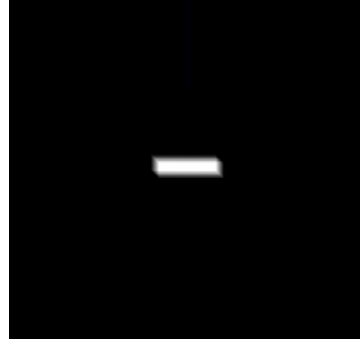


ნახ. 2.46  
რამოდენიმე წყაროს ფოკუსირება  
 $d_1=1, d_2 = 0.5, d_3 = 15, d_4 = 5$

ამ შემთხვევაში ფოკუსური მანძილის ცვლილება აღარ არის საჭირო, რათა სამივე წყარო დაეინახოთ მოცემული ნახაზის



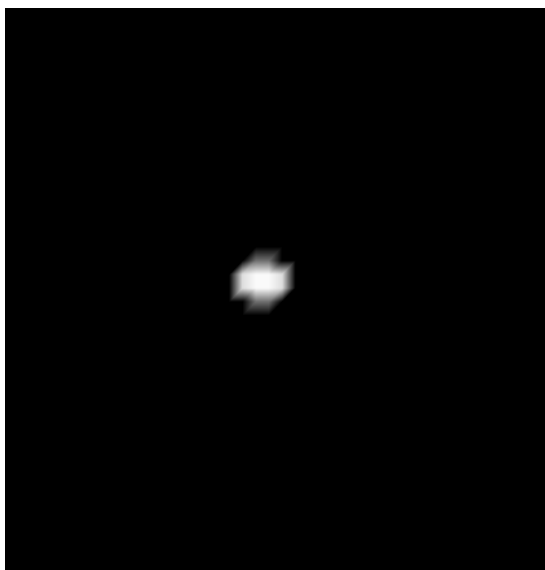
ა)



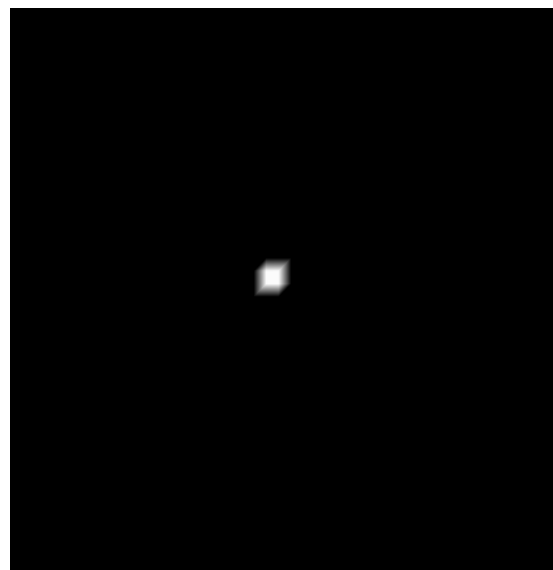
ბ)

ნახ. 2.47 ერთი წყაროს ფოკუსირება  
ა)  $d_3 = 6, d_4 = 6$  ბ)  $d_3 = 6, d_4 = 3$

მართობულ სიბრტყეში; მაშინ როცა წინა შემთხვევაში წყაროთა გამოსახულებები ერთმანეთს დაცილებულია და მიიღება სამივე წყაროს გამოსახულება სხვადასხვა სიბრტყეში. ნახ. 2.47-ზე ნაჩვენებია ერთი წყაროს ფოკუსირების შემთხვევა: ა) შემთხვევაში საპროექციო ეკრანი მოთავსებულია ლინზიდან 6 მეტრის; ხოლო ბ) შემთხვევაში 3 მეტრის მანძილზე. როგორც ნახაზიდან ჩანს, ფოკუსირების ხარისხი (გამოსახულების სიმკვეთრე) მეორე შემთხვევაში უფრო კარგია. ნახ. 2.47-ზე ნაჩვენები სიბრტყის მართობულ სიბრტყეში ველის ფოკუსირების სურათი მოცემულია ნახ. 2.48-ზე ორივე ა) და ბ) შემთხვევისთვის:



ა)



ბ)

ნახ. 2.48 ერთი წყაროს ფოკუსირება  
ა)  $d_3 = 6, d_4 = 6$  ბ)  $d_3 = 6, d_4 = 3$

როგორც ნახაზიდან ჩანს, წყაროს კარგი ფოკუსირებისთვის დიდი მნიშვნელობა აქვს პარამეტრების სწორად შერჩევას. ფოკუსირების ხარისხზე გავლენას ახდენს აგრეთვე ლინზის ზომა (ნახ. 2.49):



ლინზის რადიუსი=7მ,  $\lambda = 0.31$



ლინზის რადიუსი=6მ,  $\lambda = 0.31$



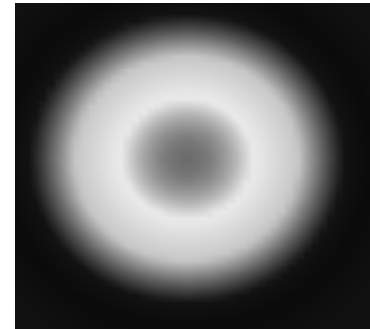
ლინზის რადიუსი=5მ,  $\lambda = 0.31$



ლინზის რადიუსი=3მ,  $\lambda = 0.31$



ლინზის რადიუსი=2მ,  $\lambda = 0.31$

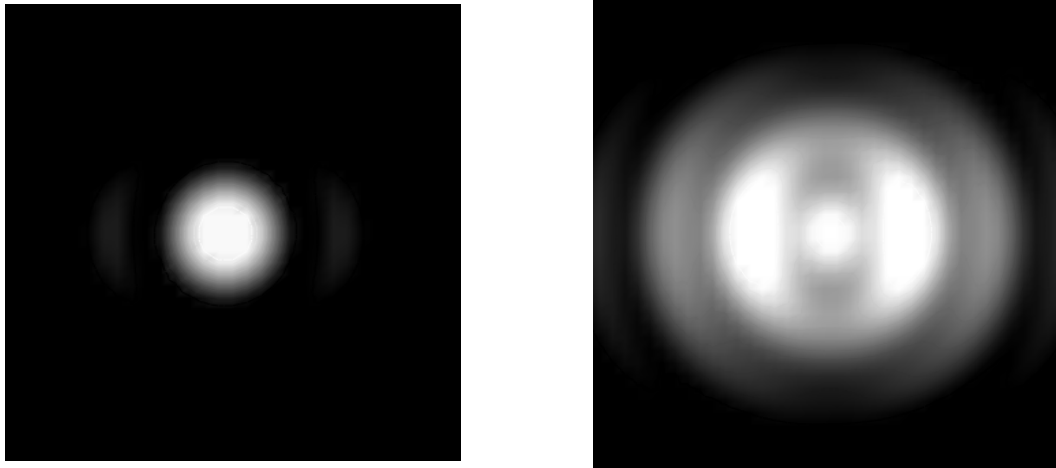


ლინზის რადიუსი=1მ,  $\lambda = 0.31$  მ

ნახ. 2.49 ფოკუსირების ხარისხის ლინზის ზომაზე დამოკიდებულება

## §2.8 სხეულის მდებარეობისა და ზედაპირის განსაზღვრა

განვიხილოთ ბირთვის ზედაპირის აღდგენის მაგალითი ფოტოგრაფიული მეთოდის საშუალებით. ბირთვი მოთავსებულია ლინზიდან 6 მეტრის მანძილზე. მის აღმოსაჩენად ლინზის პარამეტრებს ვარჩევთ ისე, რომ მან მოახდინოს სკანირება 5-დან 7- მეტრამდე დიაპაზონში; და თითოეული შემთვევისთვის მოხდეს ველის აღდგენა. საუკეთესო გარჩევადობის, კერძოთ მაღალი გრადიენტის მქონე სურათი შეესაბამება იმ სიბრტყეს, რომელიც კვეთს ბირთვს. დანარჩენ შემთხვევებში სურათი გადღაბნილია.



ა)

ნახ. 2.50

ბ)

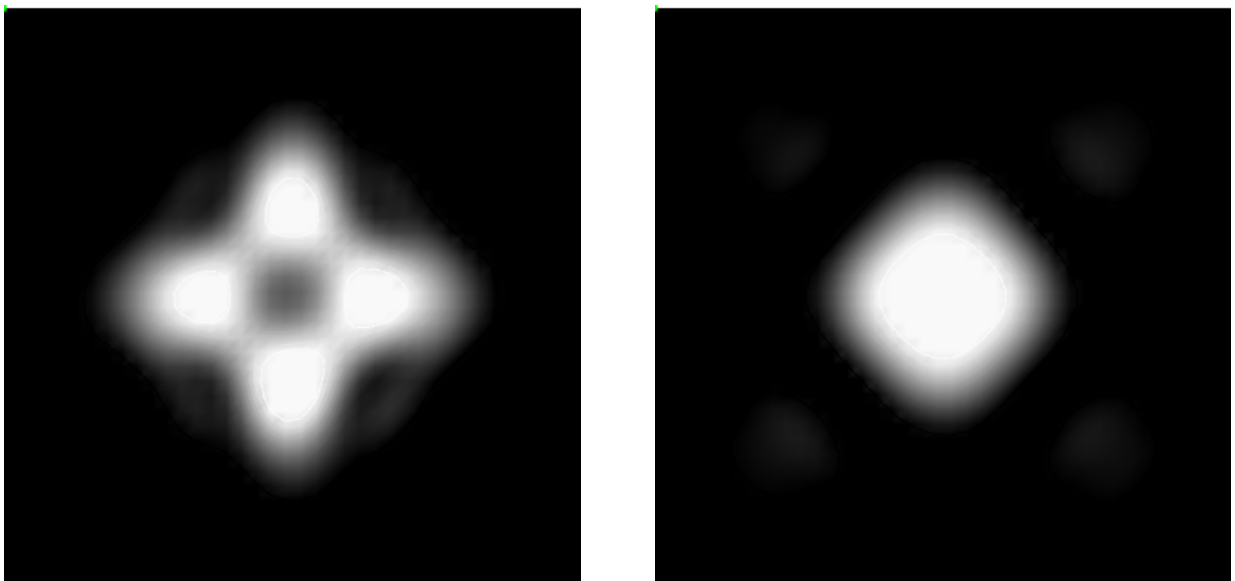
ა) ბირთვი ფოკუსშია ბ) ბირთვი არ არის ფოკუსში

ნახ. 2.50-ზე წარმოდგენილია ლინზის ზედაპირზე გაზომილი ველის საშუალებით ველის ადღგენის სურათის ორი სხვადასხვა შემთხვევა, როდესაც ადვადგენთ ლინზიდან სხვადასხვა მანძილით დაშორებული სიბრტყის ველებს: ა) შემთხვევა შეესაბამება სიბრტყეს, რომელიც კვეთს ბირთვს; ხოლო ბ) შემთხვევაში სიბრტყე ბირთვიდან დაშორებულია 0.5 მეტრით. ნახ. 2.50-ბ) შემთხვევაში გამოსახულება გადღაბნილია და განფენილია საკმაოდ დიდ არეზე – ბირთვის რეალური რადიუსი 0.8 მეტრია, სურათის მასშტაბიდან კი გამომდინარე ბირთვი გაცილებით დიდი ჩანს. ა) შემთხვევაში გამოსახულებაზე კარგად ჩანს ბირთვის კვეთის ფორმაც ანუ წრე და მისი ზომაც – სურათის მასშტაბიდან გამომდინარე ემთხვევა ბირთვის ზომას. რეალურ ექსპერიმენტზე, როდესაც არ ვიცით სხეულის მდებარეობა, მოვახდენთ სკანირებას საკმაოდ დიდ დიაპაზონში მცირე ბიჯით და კომპიუტერი ავტომატურად ამოიჩვენებს იმ სურათს, სადაც ველის გრადიენტი საკმაოდ მაღალია. ამ უკანასკნელის გამოსათვლელად კი ვპოულობთ ველის მინიმუმსა და მაქსიმუმს შორის სხვაობას. რიცხვითი ექსპერიმენტის საშუალებით ხდება სხვადასხვა სირთულის ფორმის მქონე სხეულის ზედაპირის ადღგენა და შემდეგ გადავდივართ ჩაძირული სხეულის მდებარეობის და ფორმის დადგენაზე. მოცემული ალგორითმი წარმატებით მუშაობს ორივე შემთხვევაში. ქვემოთ წარმოდგენილი იქნება ეს შემთხვევები.



## §2.9 კუბის ზედაპირის აღდგენა

განვიხილოთ კუბის ზედაპირის აღდგენის შემთხვევა. ის რომ ამ მეთოდით შესაძლებელია სხეულის მდებარეობის დადგენა, არ არის საკმარისი. სასურველია მოხდეს სხეულის ამოცნობა. ჩვენ ავირჩიეთ კუბი, რომელიც სფეროსთან შედარებით უფრო რთული ფიგურაა – მას აქვს დერძული სიმეტრია. უნდა აღინიშნოს ის ფაქტი, რომ ფოტოგრაფიული მეთოდის შემთხვევაში განვიხილავთ მონოქრომატული ტალღის დაცემას სხეულზე; თუ ჰოლოგრაფიული მეთოდის შემთხვევაში შეუძლებელი იყო სხეულის მდებარეობის და ფორმის აღდგენა ერთი სიხშირით, აქ ამ შემთხვევაში – ფოტოგრაფიული მეთოდით ერთი სიხშირე საკმარისია. მაგრამ რადგან საბოლოოდ მაინც იმპულსს გამოვიყენებთ და იმპულსი კი რამოდენიმე სიხშირეს შეიცავს, ფოტოგრაფიული მეთოდის გამოყენება უფრო ზუსტ ინფორმაციას მოგვცემს სხეულის შესახებ. კუბს ვათავსებთ 6 მეტრის მანძილზე მიწის სიღრმეში როგორც ეს სფეროს შემთხვევაში იყო. კუბი შემოვატრიალეთ 45 გრადუსით, რადგან რეალურ შემთხვევაში მისი ორიენტაცია შეიძლება ნებისმიერი იყოს. კუბი დიექტრიკულია და მისი შეღწევადობა  $\epsilon=3$ . კუბის კუთხეები მომრგვალებულია რადგან პირდაპირი ამოცანის ამოხსნა უფრო მარტივია. რეალურად კი შესაძლებელია სხეულის ზედაპირი არ იყოს გლუვი. მოცემული მეთოდი, თუ არეკვლილი ველის მნიშვნელობები ცნობილია, შეძლებს აღადგინოს არაგლუვი ზედაპირის მქონე სხეულებიც. ნახ. 2.51-ზე



ა)

ბ)

ნახ. 2.51

კუბის ზედაპირის აღდგენა

ა) კუბი არ არის ფოკუსში      ბ) კუბი ფოკუსშია

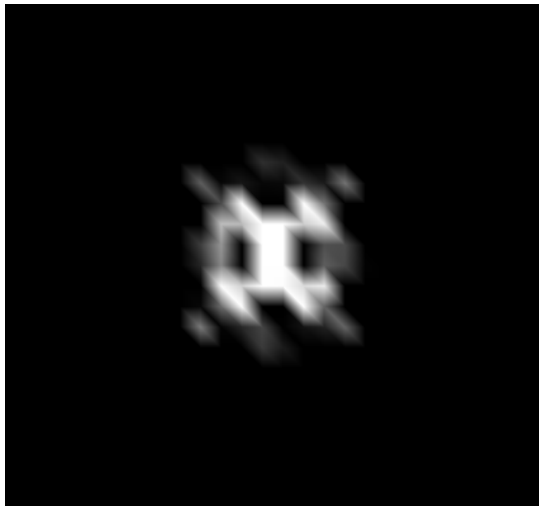
წარმოდგენილია კუბის ზედაპირის აღდგენის შემთხვევა: ა) სურათზე, რომელიც შეესაბამება ლინზიდან 5 მეტრს ანუ კუბიდან მოშორებით, მიიღება გამოსახულება, რომელიც კუბს არ გაავს; თუ განვიხილავთ სიბრტყეს ლინზიდან

6 მეტრის მანძილზე, ანუ ეს შეესაბამება სიბრტყეს რომელიც გადის კუბის ცენტრზე, მივიღებთ ბ) სურათს. ეს უკანასკნელი გამოსახულება იძლევა საშუალებას განვსაზღვროთ რომ სხეული კუბია მომრგვალებული კუთხეებით.

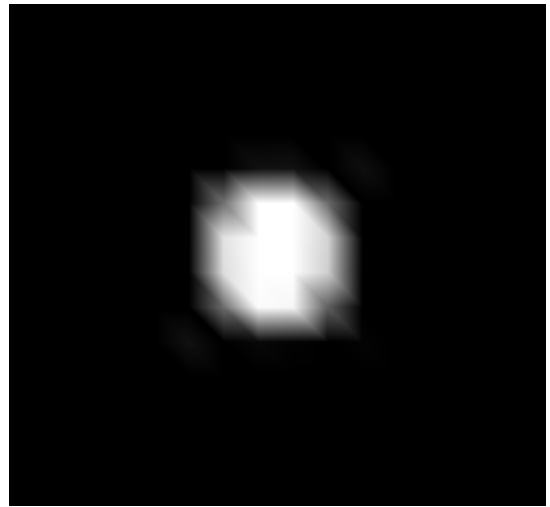
## §2.10 საგნის გარჩევისუნარიანობის დამოკიდებულება ლინზიდან მანძილზე

გამივიკვლიოთ როგორ არის დამოკიდებული საგნის გარჩევისუნარიანობა ლინზიდან მანძილზე. მოვათავსოთ სხეული საგნიდან სხვადასხვა მანძილზე 1 დან 11 მეტრამდე დიაპაზონში და ვნახოთ როგორია გარჩევისუნარიანობა.

1. ლინზიდან საპროექციო ეკრანამდე მანძილი 3მ. ლინზის სიმრუდის რადიუსი 4მ.



ა)ლინზიდან საგნის ცენტრამდე მანძილი 1მ



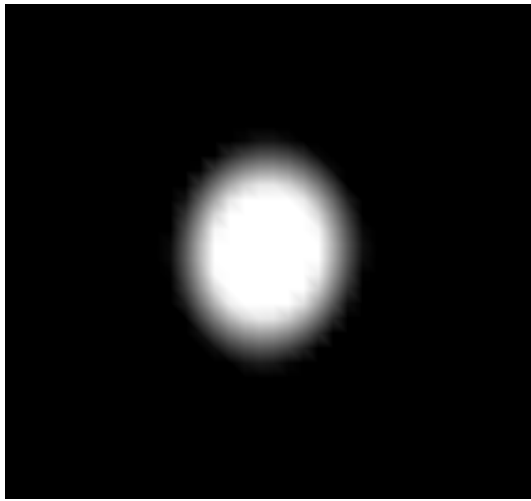
ბ)ლინზიდან საგნის ცენტრამდე მანძილი 3მ



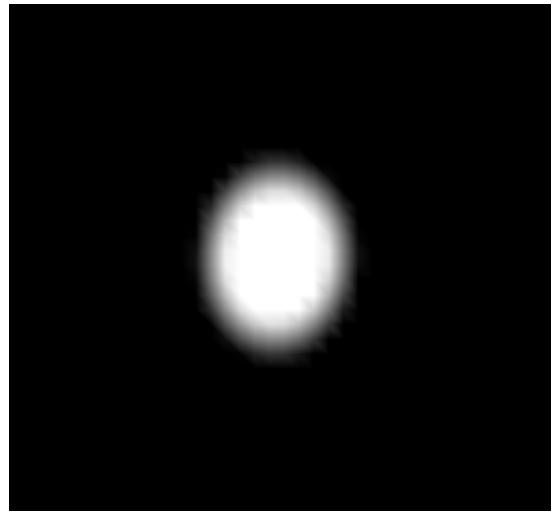
გ)ლინზიდან საგნის ცენტრამდე მანძილი 5მ



დ)ლინზიდან საგნის ცენტრამდე მანძილი 7მ



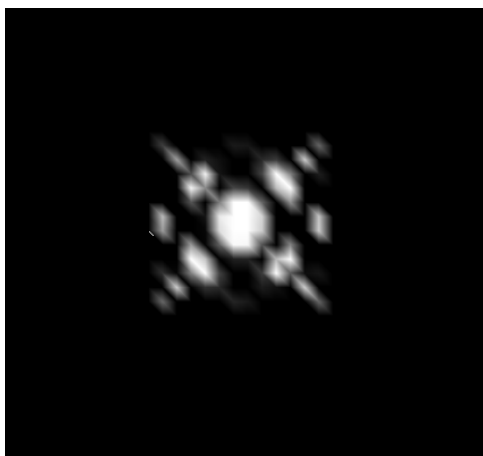
ე)ლინზიდან საგნის ცენტრამდე მანძილი 9მ



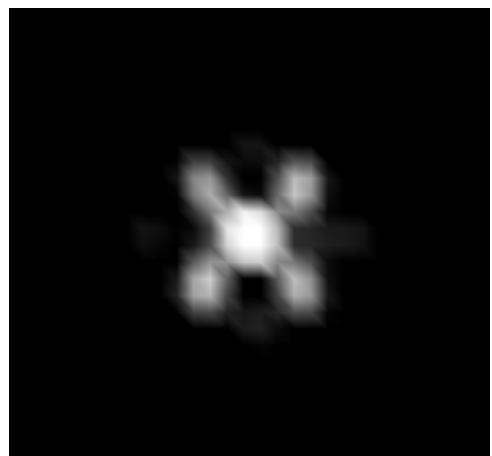
ვ)ლინზიდან საგნის ცენტრამდე მანძილი 11მ

**ნახ. 2.52**  
კუბის ზედაპირის აღღგენა

როგორც ნახ. 2.52-ზე ჩანს, ყველაზე საუკეთესო ვარიანტი არის გ) ანუ როდესაც მანძილი ლინზიდან 5მ-ია. თუმცა რამდენადმე დამახინჯებულია – მასში შეგვიძლია ამოვიცნოთ კუბი და ის ფაქტი, რომ კუბი 45 გრადუსით არის შემობრუნებული.



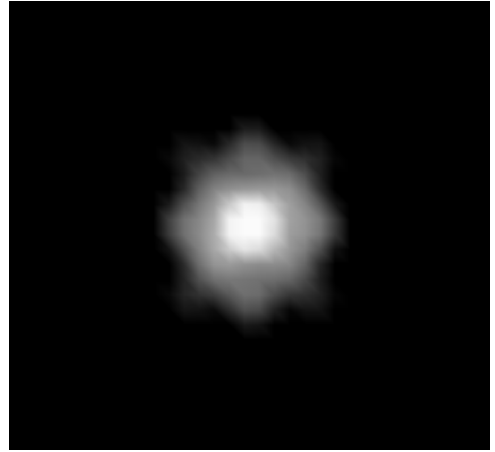
ა)ლინზიდან საგნის ცენტრამდე მანძილი 1მ



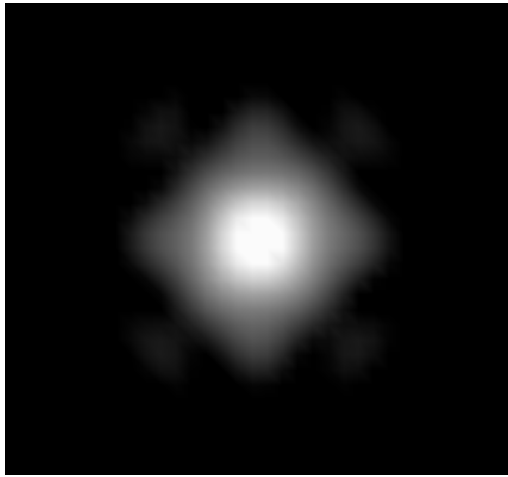
ბ)ლინზიდან საგნის ცენტრამდე მანძილი 3მ



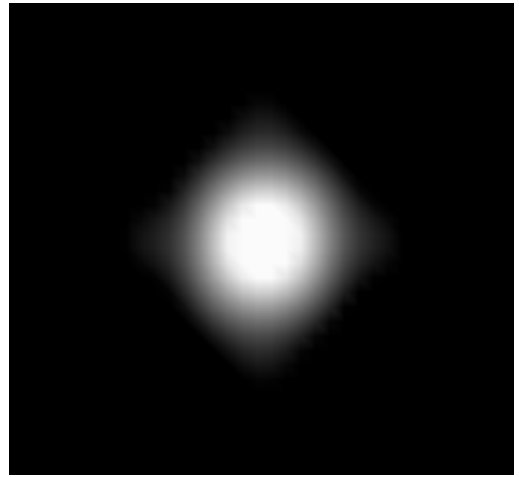
გ) ლინზიდან საგნის ცენტრამდე მანძილი 5მ



დ) ლინზიდან საგნის ცენტრამდე მანძილი 6მ



ე) ლინზიდან საგნის ცენტრამდე მანძილი 8მ



ვ) ლინზიდან საგნის ცენტრამდე მანძილი 10მ

## ნახ. 2.53

## საგნის გარჩევისუნარიანობის დამოკიდებულება ლინზიდან მანძილზე

7მ-ის ზემოთ ის უკვე მრგვალ ლაქად იქცევა და ვეღარ გავარჩევთ მის ფორმას. ეს შედეგი არ ნიშნავს იმას, რომ საუკეთესო ხედვის მანძილი 5 მ-ია. ამისთვის კიდევ ჩავატაროთ ერთი გამოკვლევა. ამჯერად ლინზიდან საპროექციო სიბრტყემდე მანძილი ავიღოთ 6მ და გავიმეოროთ იგივე:

2. ლინზიდან საპროექციო ეკრანამდე მანძილი 6მ. ლინზის სიძრუდის რადიუსი 4მ.

ნახ. 2.53 სურათებიდან ყველაზე კარგი აღდგენა გვაქვს როდესაც საგანი ლინზიდან 8 მეტრის მანძილზეა. აქედან გამომდინარე, იმის მიხედვით თუ როგორ არის განლაგებული საპროექციო ეკრანი, ლინზა და საგანი, საუკეთესო ხედვის მანძილი არის სხვადასხვა. ჩვენი გამოკვლევებიდან გამომდინარე, თუ გვინდა რომ საუკეთესო ხედვის მანძილი წავანაცვლოთ, საპროექციო ეკრანიც იგივე მიმართულებით უნდა წავანაცვლოთ – ანუ თუ შორს არის საგანი, ეკრანს გავწევთ უფრო შორს; თუ საგანი ახლოსაა მაშინ საუკეთესო გარჩევადობას რომ მივაღწიოთ, ეკრანის ლინზას უნდა მივუახლოვოთ. მარტო ამ პარამეტრის ცვლილება არ არის საკმარისი რადგან ამ დროს ხედვის

სიღრმეც იცვლება. ამიტომ ფოკუსური მანძილი უნდა შევცვალოთ ისე, რომ საგანი ისევ ფოკუსში მოხდეს. ასევე მნიშვნელოვანია საპროექციო ეკრანის ზომის შერჩევა, რადგან ძალიან დიდი ზომის ადების შემთხვევაში საგანს გამოსახულება მრგვალ ლაქად გადაიქცევა. სასურველია ეკრანის ზომა საგნის გამოსახულების ზომას მაქსიმუმ 2-3 ჯერ აღემატებოდეს.

ჰოლოგრაფული მეთოდისგან განსხვავებით, ფოტოგრაფიული მეთოდით შესაძლებელია დავაკვირდეთ საგანს სხვადასხვა მანძილზე და მივიღოთ კარგი გარჩევადობის სურათი, გავზარდოთ ხედვის სიღრმე. ოღონდ ამისათვის საჭიროა პარამეტრების ზუსტად შერჩევა. გამოკვლევები აგრეთვე აჩვენებს, რომ მოცემულ სიხშირეზე, როცა ტალღური რიცხვი  $k = 20$  სმ, ხაზოვანი ზომების მქონე სხეულის ფორმის გარჩევა შესაძლებელია მაქსიმუმ 10 მეტრზე, რაც შეესაბამება ხედვის კუთხის დაახლოებით  $5.7^\circ$ -ს.

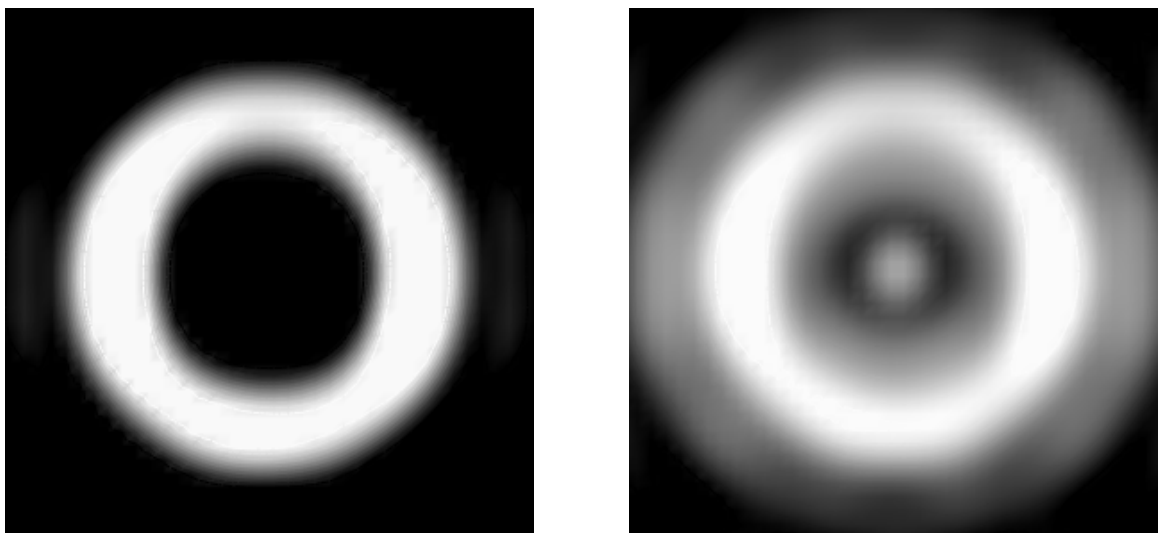
### §2.11 ტოროიდის ზედაპირის აღგენა

გადავიდეთ უფრო რთული ფორმის მქონე სხეულის, კერძოდ ტოროიდის (ნახ.2.54) ზედაპირის აღგენაზე.



ნახ. 2.54  
ტოროიდი

წინა შემთხვევებში სხეული მოთავსებული იყო ლინზიდან 5 მეტრზე. ამჯერად ტორს ვათავსებთ 5 მეტრის მანძილზე, ვხსნით პირდაპირ ამოცანას – ანუ ტორზე დიფრაქციის ამოცანას, შემდეგ ვპოულობთ ტორიდან არეკვლილ ველს ლინზის ზედაპირზე და აღვადგენთ ველის სურათს ლინზიდან სხვადასხვა მანძილზე ისე, როგორც ამას ვაკეთებდით სხვა სხეულების შემთხვევაში. ნახ. 2.55-ზე წარმოდგენილია ველის აღგენის 2 შემთხვევა: მარცხენა



ნახ. 2.55

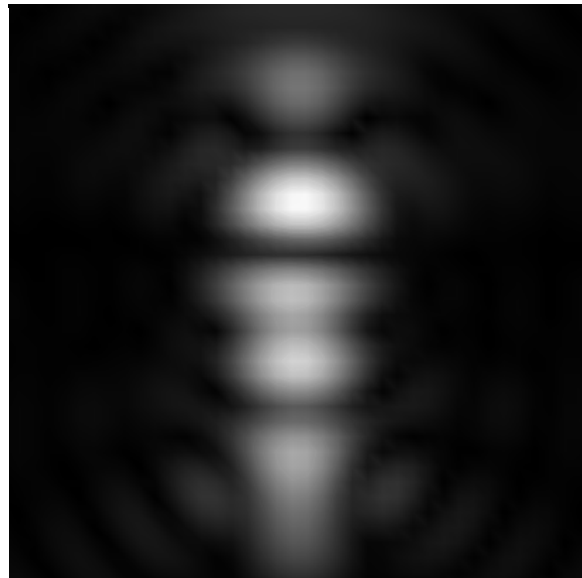
ტორის ზედაპირის აღგენა  
ტოროიდი ფოკუსშია(მარცხნივ) ტოროიდი არ არის ფოკუსში (მარჯვნივ)

შეესაბამება ლინზიდან 5 მეტრის მანძილს; მარცხენა კი ლინზიდან 5 მეტრის მანძილს. როგორც ვხედავთ მარცხენა სურათი იმეორებს ტოროიდის ფორმას, რადგან ის შეესაბამება ტორის მდებარეობას. მარჯვენა სურათი კი გადღაბნილია.

ლინზის რადიუსი ამ შემთხვევაში 3 მეტრია, რაც შედარებით პატარაა წინა შემთხვევებისგან. უფრო პატარა ლინზის აღება არ იძლევა კარგ შედეგს. ლინზაზე წერტილების რაოდენობა არის 15 X 15 და ველის აღდგენას კომპიუტერი (P4, 2.4 GHZ) უნდება 10 წამი ფიქსირებული პარამეტრებისთვის.

### §2.12 ადამიანის ზედაპირის აღდგენა

განვიხილოთ ერთგვაროვანი ადამიანის ზედაპირის აღდგენა. ნახ. 2.56-ზე მარცხნივ წამოდგენილია ადამიანის გეომეტრია მოცემული წერტილებით; ხოლო მარჯვნივ კი აღდგენილი ველის სურათი, რომელზეც გამოსახულება იმეორებს ადამიანის გეომეტრიას.



ნახ. 2.56  
ადამიანი გეომეტრია(მარცხნივ) და ადამიანის  
ზედაპირის აღდგენა (მარჯვნივ)



### §2.13 ჩაძირული სხეულის ზედაპირის აღდგენა

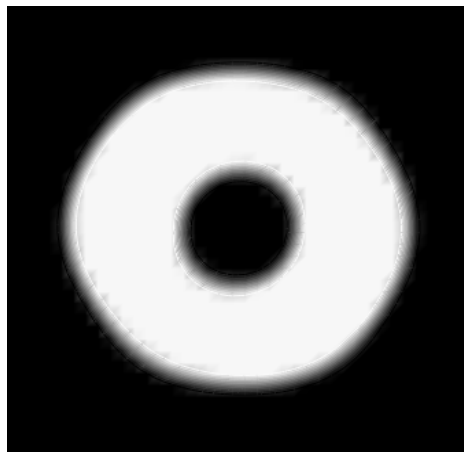
აქამდე ჩვენ ვიხილავდით თავისუფალ სივრცეში არსებულ სხეულის ზედაპირის აღდგენის ამოცანას. მაგრამ ჩვენი ამოცანაა მიწაში ჩაძირული სხეულის პოვნა. ამიტომ განვიხილოთ ზოგადად დიფრაქციულ გარემოში ჩაძირული სხეულის აღდგენა. კერძოდ ჩაძირული ტორის აღდგენის ამოცანა. მიწის დიფრაქციული შეღწევაობა  $\varepsilon_1 = 2$ . ხოლო ტორის  $\varepsilon_2 = 3$  ტალღური რიცხვი  $k=20$ .



ნახ. 2.57

ტორის და მიწის ზედაპირის გეომეტრია

მანძილი ლინზიდან ტორამდე 6.7მ (ნახ. 2.57). მაგრამ რადგან სხეული მიწაშია ჩაძირული, გამოსახულება მიიღება უფრო ახლოს. კერძოდ 4.95 მეტრის მანძილზე. აღდგენილი ველის სურათი მოცემულია ნახ. 2.58-ზე:



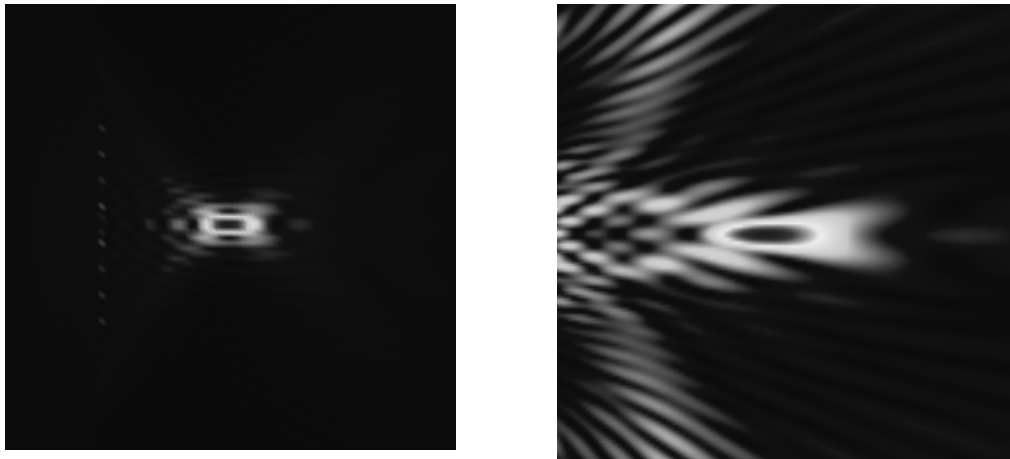
ნახ. 2.58

ჩაძირული ტორის ზედაპირის აღდგენა

## §2.14 ფოტოგრაფიული და ჰოლოგრაფიული მეთოდების შედარება

ფოტოგრაფიული მეთოდის საშუალებით ჩვენ აღვადგენდით სხეულის ფორმას და მდებარეობას. იმისათვის რომ ფოტოგრაფიული და ჰოლოგრაფიული მეთოდი შევადაროთ, განვიხილოთ განმხილველი წყაროების ველის აღდგენა ფოტოგრაფიული მეთოდით ისევე, როგორც ეს გავაკეთეთ ჰოლოგრაფიული მეთოდის შემთხვევაში და მიღებული შედეგები შევადაროთ ჰოლოგრაფიული მეთოდით მიღებულ შედეგებს. ნახ. 2.59-ზე წარმოდგენილია ერთი წყაროს ველის აღდგენის შემთხვევა ფოტოგრაფიული და ჰოლოგრაფიული მეთოდის საშუალებით წყაროს სიხშირის ერთი და იგივე მნიშვნელობებისთვის:

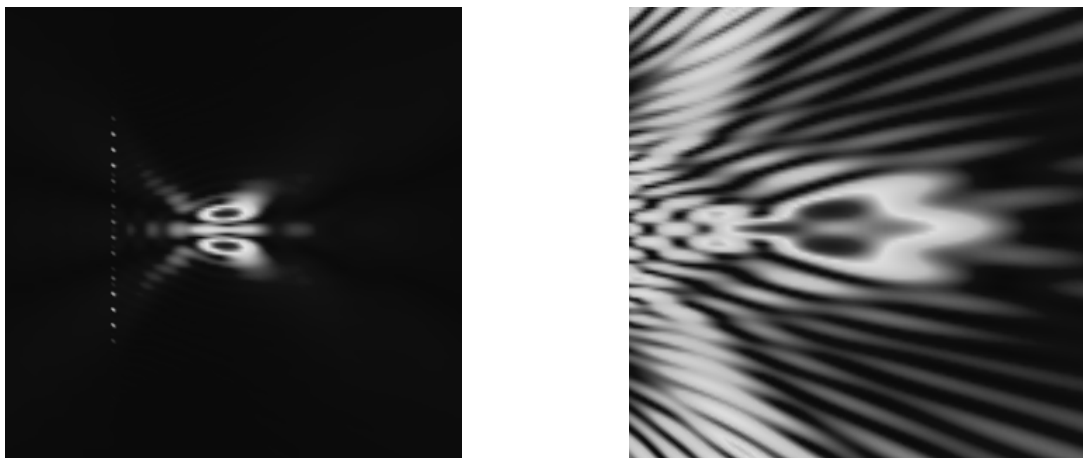
როგორც ნახაზზე ჩანს ფოტოგრაფიული მეთოდის შემთხვევაში წყაროს ველი ლოკალიზებულია უფრო მცირე არეში და ამრიგად უფრო ახლოა რეალურ შემთხვევასთან. ახლა განვიხილოთ შემთხვევა როდესაც გვაქვს ორი წყარო ერთმანეთისგან მცირე



ნახ. 2.59

ერთი წყაროს აღდგენილი ველის შედარება ფოტოგრაფიული (მარცხნივ) და ჰოლოგრაფიული (მარჯვნივ) მეთოდების საშუალებით

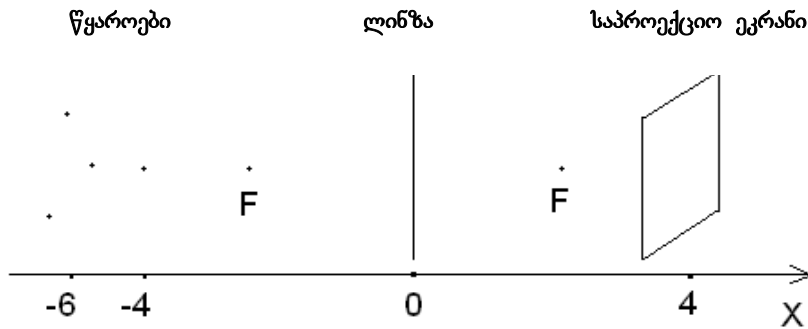
მანძილით დაშორებული. მათი შესაბამისი აღდგენილი ველის სურათები მოცემულია ნახ. 2.60-ზე.



ნახ. 2.60

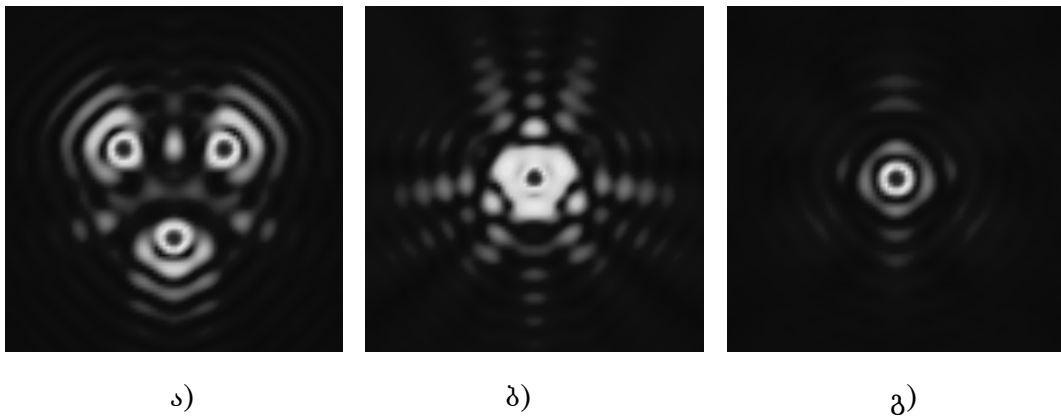
ერთი წყაროს აღდგენილი ველის შედარება ფოტოგრაფიული (მარცხნივ) და ჰოლოგრაფიული (მარჯვნივ) მეთოდების საშუალებით

როგორც ნახაზზე ჩანს. ფოტოგრაფიული მეთოდით აღგენილ ველის სურათში ორივე წყარო ერთმანეთისგან განცალკევებულია, ხოლო კოლოგრაფიულის შემთხვევაში წყაროთა ველები ერთმანეთს გადაფარავს.



ნახ. 2.61  
სამი წყაროს ფოკუსირება

გავზარდოთ წყაროთა რაოდენობა და ამჯერად განვიხილოთ 4 წყარო და განვაღებოთ სივრცეში ისე როგორც ეს ნახ. 2.61-ზეა ნაჩვენები.



ნახ. 2.62  
4 წყაროს ფოკუსირება  
ა)  $F=5m$ , ბ)  $F=4m$ , გ)  $F=3m$

წინა შემთხვევებში აღგენილ ველს ვაკვირდებით ლინზის მართობულ სიბრტყეში, ახლა დავაკვირდეთ ლინზის სიბრტყეში. მივანიჭოთ ფოკუსურ მანძილს სხვადასხვა მნიშვნელობა და ვნახოთ რას მივიღებთ ეკრანზე. ჩვენი მიზანია სხვადასხვა ფოკუსური მანძილისთვის მოვახდინოთ ეკრანზე ჯერ სამი

წყაროს ფოკუსირება, რომელიც ერთ სიბრტყეში მდებარეობს ლინზიდან 6 მ-ის მანძილზე;

შემდეგ კი მეოთხე წყაროს ფოკუსირება რომელიც ლინზიდან 4 მეტრის მანძილზე მდებარეობს. ნახ. 2.62-ზე წარმოდგენილია სამი სხვადასხვა შემთხვევა:

ა) შემთხვევაში ფოკუსური მანძილი უდრის 5 მეტრს და საპროექციო ეკრანზე მიიღება სამი წყაროს ველი.

ბ) შემთხვევაში გვაქვს გარდამავალი შემთხვევა. ფოკუსური მანძილი უდრის 4 მეტრს.

გ) შემთხვევაში ფოკუსური მანძილი უდრის 3 მეტრს და მიიღება მეოთხე წყაროს გამოსახულება რომელიც პირველი სამი წყაროსგან განსხვავებით ლინზასთან უფრო ახლოა.

სწორედ ამით განსხვავდება ფოტოგრაფიული მეთოდი ჰოლოგრაფიულიდან: ის იძლევა ერთხელ გაზომილი ველის მნიშვნელობებით მოვახდინოთ გარემოს სკანირება და ვიპოვოთ სხეულის მდებარეობა.

**დასკვნა.** დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი საშუალებას იძლევა ამოიხსნას შებრუნებული ამოცანა მე-5 ნიშნამდე სიზუსტით. ჩვენს მიერ განხილულ იქნა შებრუნებული ამოცანის ამოხსნის კერძო შემთხვევა, კერძოთ მიწაში ჩაძირული სხეულის ვიზუალიზაციის ამოცანა. ამოცანის ამოხსნა შეიცავს შემდეგ ეტაპებს:

– პირველად ხდება მიწის მახასიათებლის დადგენა – დგინდება რა სიხშირულ დიაპაზონშია მიწა გამჭვირვალე.

– შემდეგ ხდება დაცემული იმპულსის პარამეტრების შერჩევა ისე, რომ მოცემული იმპულსის სპექტრი შეიცავდეს სიხშირეებს, რომლის მიმართაც მიწა მეტ-ნაკლებად გამჭვირვალეა.

– ამის შემდეგ ხდება პირდაპირი ამოცანის ამოხსნა, რაც საშუალებას იძლევა გაიზომოს მიწიდან და მისი სიღრმეებიდან არეკვლილი იმპულსი გარკვეულ ზედაპირზე.

– გაზომილი მონაცემების საფუძველზე ანალიზური გაგრძელებით ხდება ველის აღდგენა სასურველ არეში ფოტოგრაფიული და ჰოლოგრაფიული მეთოდების დახმარებით. ეს იძლევა საშუალებას აღმოვაჩინოთ მიწაში მოთავსებული სხეული, დავადგინოთ მისი მდებარეობა, ფორმა და ზომები.

– შექმნილია პროგრამული პაკეტი, რომელიც იძლევა საშუალებას დავამოძღვროთ მიწაში ჩაძირული სხვადასხვა ფორმის, ზომის და ელექტროდინამიკური პარამეტრების სხეული; ამოიხსნას პირდაპირი ამოცანა და შემდეგ შებრუნებული ამოცანის ამოხსნის შედეგად მოხდეს ჩაძირული სხეულის ვიზუალიზაცია რეალურ დროში.

### თავი III

ფოტონური კრისტალების კომპიუტერული მოდელირება

## ზოგადი მიმოხილვა

როგორც წესი, არსებითი წინსვლა ტექნოლოგიის განვითარების ისტორიაში შესაძლებელი ხდება მასალათა თვისებების უფრო ღრმა აღქმის და მათი გამოყენების წყალობით. ისტორიამდელი ხალხი ქმნიდნენ იარაღებს იმ ცოდნაზე დაყრდნობით, რომ ქვა მტკიცეა და რკინა კი მყარი. თითოეულ შემთხვევაში, კაცობრიობა სწავლობდა ამოელო მიწიდან მასალები, რომელთაც ჰქონდათ სასარგებლო თვისებები კონკრეტული გამოყენებისთვის. ამის შემდგომ ინჟინრებმა ისწავლეს იმაზე უფრო მეტი, ვიდრე უბრალოდ გამოეყენებინათ ის, რასაც მიწა იძლეოდა – კერძოდ ცნობილი მასალების საშუალებით ისინი ქმნიდნენ სუბსტანციებს უფრო სასარგებლო თვისებებით – ადრეული ბრინჯაოდან დღევანდელ ბეტონამდე და ფოლადამდე. მეტალურგიის მიღწევების, კერამიკისა და პლასტიკის წყალობით დღევანდელ დღეს ჩვენთვის მისაწვდომია მრავალი სრულიად ხელოვნური მასალა მექანიკური თვისებების ფართო დიაპაზონით.

ბოლო ათწლეულში მიკროტალღური და ოპტიკური ელექტრონიკის სწრაფ განვითარებასთან დაკავშირებით, წარმოიშვა აუცილებლობა შეიქმნას სპეციალური მასალა მათი ელექტრული და ოპტიკური თვისებების მართვის შესაძლებლობით. მას შემდეგ რაც უკვე შესაძლებელი გახდა მასალების დამუშავება, რომლებიც ეწინააღმდეგებოდნენ სინათლის გავრცელებას, ატარებდნენ მას მხოლოდ გარკვეულ სიხშირეებზე, ან ახდენდნენ მის ლოკალიზებას გარკვეულ არეში – ეს მაშინვე გამოყენებულ იქნა მრავალ თანამედროვე ტექნოლოგიურ ოპტოელექტრონულ მოწყობილობაში მათი პრაქტიკული რეალიზების მიზნით.

თავის დროზე თვით ოპტიკურბოჭკოვანმა კაბელებმა, რომლებიც უბრალოდ ატარებდნენ სინათლეს, მოახდინეს ნამდვილი რევოლუცია ტელეკომუნიკაციის ინდუსტრიაში.

როგორი მასალები მოგვცემენ მასში გამავალი სინათლის საკმარისი კონტროლის საშუალებას? რომ ვუპასუხოთ ამ კითხვას, გავავლოთ ანალოგია ნახევარგამტარული მიკროელექტრონიკის მიღწევებთან; კონკრეტულად განვიხილოთ ელექტრონის ყოფაქცევა ნახევარგამტარში. კრისტალი წარმოადგენს პერიოდულად განლაგებული ატომების და მოლეკულების წყებას, ე.ი. კრისტალური მესერი იქმნება სივრცეში ელემენტარული მოწესრიგებული საშენი აგურების – ატომების და მოლეკულების გამეორებით. ამრიგად მასში მოძრავი ელექტრონისათვის, როგორც დამუხტული ნაწილაკისათვის, კრისტალი წარმოადგენს გარემოს პერიოდული ელექტრული პოტენციალით და კრისტალის გეომეტრია განაპირობებს მისი გამტარობის მრავალ თვისებას. კერძოდ, მესერმა შეიძლება შექმნას აკრძალული არეები კრისტალის ენერგეტიკულ მახასიათებელში ისე, რომ გარკვეული ენერჯის მქონე ელექტრონების გავრცელება რაიმე მიმართულებით იქნება უბრალოდ აკრძალული. თუ მესრის პოტენციალი საკმაოდ მაღალია, მაშინ აკრძალული ზონა შეიძლება წარმოიქმნას ყველა შესაძლო მიმართულებისთვის, და შექმნას ამრიგად სრული აკრძალული ზონა (complete band gap). მაგალითად, ნახევარგამტარს აქვს სრული აკრძალული ზონა სავალენტო ზონის და გამტარობის ზონის ენერგეტიკულ დონეებს შორის.

ნახევარგამტარის ოპტიკური ანალოგი არის ფოტონური კრისტალი, რომელშიც პერიოდული პოტენციალი ფოტონებისთვის წარმოიქმნება (ატომების ნაცვლად) მაკროსკოპული დიელექტრიკული ელემენტების პერიოდული მესრის არსებობის წყალობით. თუ მესრის მასალების დიელექტრიკული თვისებები საკმაოდ განსხვავდება, ხოლო სინათლის შთანთქმა კრისტალის მიერ მინიმალურია, მაშინ გარემოთა შორის საზღვარზე ფოტონებისთვის (სინათლის მოდებისთვის)

შეიძლება განვაპირობოთ ანალოგიური მოვლენების სიმრავლე, რომელიც დაიკვირვება ელექტრონების გავრცელების შემთხვევაში ნახევარგამტარების ატომურ მესერში. ამრიგად, ერთ-ერთ საშუალებას სინათლის მართვისთვის წარმოადგენს ფოტონური კრისტალების ანუ დაბალი შთანთქმის მქონე პერიოდული გარემოს გამოყენება. კერძოდ, ჩვენ შეგვიძლია დავამუშაოთ ფოტონური კრისტალი ფოტონური აკრძალული ზონებით, რომელიც ეწინააღმდეგება მოცემული სიხშირის სინათლის გავრცელებას გარკვეული მიმართულებით და აქვს მოცემული მიმართულების პოლარიზაცია. შემდეგ, შევიტანთ რა მესერში სპეციალურ დეფექტებს, ან შევცლით რა რომელიმე უჯრის თვისებებს მოცემული ხაზის გასწვრივ, შესაძლებელია შეიქმნას ტალღამტარი მოცემულ სიხშირულ დიაპაზონში. ეს სპეციალური დეფექტები, არხები და უჯრები, სადაც აღწევს ფოტონი, წარმოადგენს რეზონანსულ არეებს მოცემული სიხშირის სინათლისთვის. დეფექტების სხვადასხვა ტიპი განაპირობებს არხის სხვადასხვა ყოფაქცევას დაცემული ტალღის მიმართ. ეს მნიშვნელოვნად აიოლებს ზემოაღნიშნული სიხშირის ხელსაწყოების ანალოგების შექმნას ოპტიკურ დიაპაზონში. ზმს ტექნიკაში ფართოდაა გავრცელებული მოწობილობები ტალღის გავრცელების მართვისთვის, ისეთები როგორცაა მეტალური ტალღამტარი და სილრუე. მეტალური სილრუე კრძალავს ტალღების გავრცელებას გარკვეული ზღვრული სიხშირეების ქვემოთ, ამავე დროს მეტალური ტალღამტარი უშვებს გავრცელებას მხოლოდ გარკვეული მიმართულებით. ორივე ეს თვისება უკიდურესად სასარგებლოა ზმს მოწყობილობების შექმნისათვის, და ამიტომ სასურველია უზრუნველყოთ ისინი უფრო მაღალ სიხშირეებზეც, რომელიც გადიან ზმს-ის გარეთ. კერძოდ, ოპტიკურ დიაპაზონში ოპტიკური ინტეგრალური სქემების შემადგენელი კვანძების რანგში გამოყენებისათვის. მაგრამ ელექტრომაგნიტური ტალღები მაღალ სიხშირეებზე (მაგალითად ხილული სინათლე) სწრაფად შთანთქმდება მეტალური ელემენტებით. ამას გარდა, ანალოგიური მოწყობილობების დასამზადებლად ამ დიაპაზონში მოითხოვება უფრო მაღალი ტექნოლოგიური სიზუსტე, რაც შეუძლებელს ხდის ამ მოწყობილობების კონსტრუქციის პირდაპირ გადატანას ოპტიკურ დიაპაზონში. ამის საწინააღმდეგოდ ფოტონურ კრისტალებს შეუძლიათ არა მარტო გაიმეორონ ღრუთა და ტალღამტართა თვისებები ოპტიკურ დიაპაზონში, არამედ ისინი არიან მასშტაბირებადი და გამოყენებადი უფრო ფართო სიხშირულ დიაპაზონშიც. თანამედროვე ტექნოლოგია საშუალებას იძლევა შეიქმნას ფოტონური კრისტალების ანალოგები მოცემული კონფიგურაციის და სასურველი მილიმეტრული ზომების დეფექტებით ზმს დიაპაზონისთვის, ასევე მიკრონული ინფრაწითელი სინათლის სამართავადაც.

## პროგრამული პაკეტი

ნაშრომის შესავალ ნაწილში წარმოდგენილი იყო მოდელი შემუშავებული დამხმარე გამომსახვებლების მეთოდის ბაზაზე და ალგორითმი ფოტონური კრისტალების კომპიუტერული მოდელირებისათვის. წარმოდგენილ ალგორითმზე შექმნილია პროგრამული პაკეტი, რომელიც საშუალებას გვაძლევს მივიღოთ ელექტრომაგნიტური ველის ამპლიტუდის და ფაზის განაწილების სურათი ახლო არეში და გადასხივებული ველის დიაგრამა შორ ზონაში. პროგრამული პაკეტი განკუთვნილია ინჟინერული მოხმარებისათვის და არ საჭიროებს ალგორითმში გამოყენებული მეთოდის საფუძვლიან ცოდნას. მასში ადვილად არის შესაძლებელი კრისტალის ფორმის, ზომის და დიელექტრიკული შეღწევადობის შერჩევა. შესაძლებელია არჩეულ იქნას დეფექტების ნებისმიერი განლაგება. ასევე შეგვიძლია ვცვალოთ ელექტრომაგნიტური ველის წყაროს აგილმდებარეობა და მისი პარამეტრები: ამპლიტუდა, ფაზა და სიხშირე, მათი რაოდენობა და განლაგება. პროგრამული პაკეტი საშუალებას იძლევა დინამიურ რეჟიმში ვცვალოთ აღნიშნული პარამეტრები და ამავე დროს თვალი ვადევნოთ სისტემაში მიმდინარე ტალღურ პროცესებს. ფიქსირებული მესრისათვის შესაძლებელია ვიპოვოთ მისი რეზონანსული სიხშირე. იგი განისაზღვრება შორ ზონაში გადასხივებული ველის მაქსიმუმის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკიდან, რომელიც ავტომატურად იგება პროგრამის დინამიურ რეჟიმში გაშვების დროს.

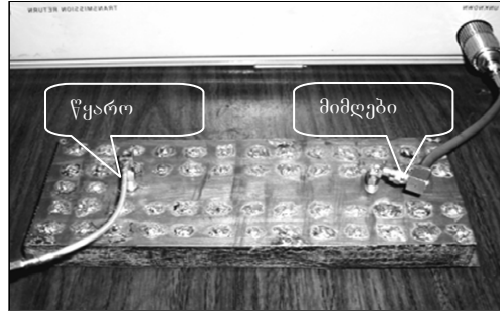
ჩატარებული იქნა რიცხვითი ექსპერიმენტები სხვადასხვა სახის კრისტალური მესრისთვის და ქვემოთ მოყვანილია მიღებული შედეგები.

## ელექტრონული მოწყობილობები

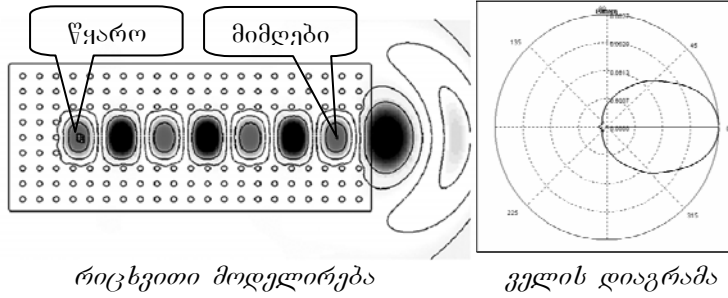
### §3.1 წრფივი ტალღამტარი

ფოტონური კრისტალების ბაზაზე შეიძლება დამზადდეს ტალღამტარი. ამისათვის კრისტალში უნდა ამოვიღოთ რამდენიმე პერიოდული წყება ნახ. 3.1-ზე წარმოდგენილია ტალღამტარის რიცხვითი და ექსპერიმენტული მოდელი. რიცხვითი მოდელი იქმნება იმ მეთოდის საფუძველზე, რომელიც ზემოთ იყო აღნიშნული. ექსპერიმენტული მოდელის დასამზადებლად აღებულია დიელექტრიკული ფენა, რომელზეც ორივე მხრიდან დაფენილია მეტალის თხელი ფენა; ხოლო შიგნით კრისტალურ მესერს ქმნის ლითონის ღეროები. ტალღამტარის დასაწყისში მოთავსებულია ელექტრომაგნიტური ველის წყარო, გამოსასვლელში კი მიმღები. ხდება ელექტრული ველის ამპლიტუდის გაზომვა სხვადასხვა სიხშირეზე. მოცემულ სტრუქტურას აქვს გამოსხივების საკმაოდ მიმართული დიაგრამა (ნახ. 3.1).





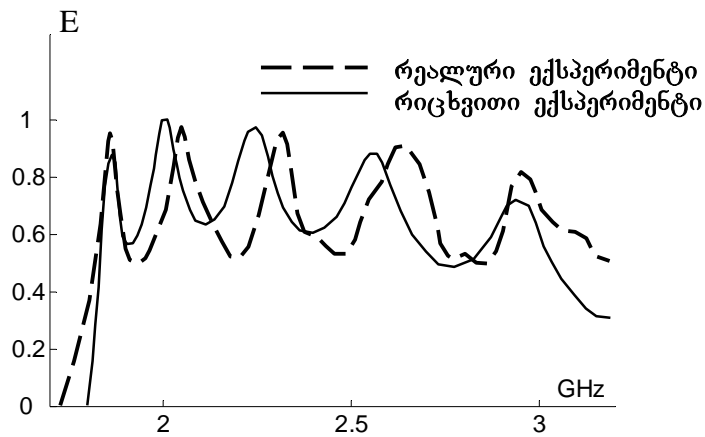
ექსპერიმენტული მოდელი



რიცხვითი მოდელირება

ველის დიაგრამა

ნახ. 3.1: ფოტონურ კრისტალებზე დაფუძნებული ტალღამტარის კვეთა

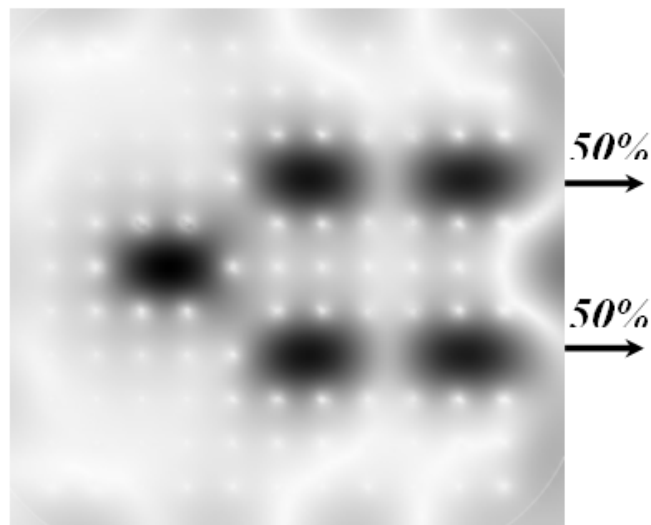


ნახ. 3.2: რიცხვით და რეალური ექსპერიმენტის შედარება ღია ბოლოს მქონე ტალღამტარისთვის. ნახაზზე მოცემულია ტალღამტარის კვეთისთვის ელექტრული ველის სიხშირეზე დამოკიდებულება დიაპაზონში 1.95 GHz - დან 3.0 GHz - მდე

ნახ. 3.2-ზე წარმოდგენილია რეალური და რიცხვითი ექსპერიმენტის შედარება სიხშირულ დიაპაზონში: 1.95 GHz-დან 3.0 GHz-მდე. მოყვანილია მოცემულ დიაპაზონში რეალურ ექსპერიმენტზე გაზომილი ელექტრული ველის ამპლიტუდების მნიშვნელობები და მოდელირების შედეგად მიღებული მნიშვნელობების მათთან შედარება. როგორც ნახაზიდან ჩანს, დამთხვევა საკმაოდ კარგია. ცდომილება, რაც ნახაზზე ჩანს, გამოწვეულია კრისტალის დამზადებისას დაშვეული ტექნოლოგიური ცდომილებით, და აგრეთვე კრისტალის დიელექტრიკის შეღწევადობის მნიშვნელობების შერჩევის სიზუსტით, რომელიც აღებული იყო ცხრილიდან გეტინაქსისათვის.

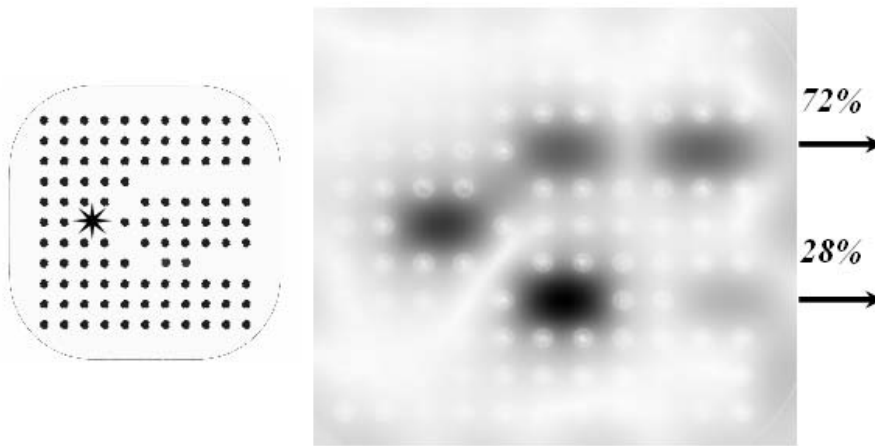
### §3.2 სიმძლავრის გამყოფი

სიმძლავრის გამყოფი წარმოადგენს ელექტრონულ მოწყობილობას, რომელიც ახდენს მასში მოთავსებული ელექტრომაგნიტური წყაროს სიმძლავრის რამდენიმე ნაწილად გაყოფას სასურველი პროპორციით.



ნახ. 3.3  
ახლო ველის განაწილება  $k=2.3$  ტალღური  
რიცხვისთვის

განვიხილოთ რამდენიმე შემთხვევა, როდესაც ველის სიმძლავრეს ვყოფდით 2 ნაწილად სასურველი პროპორციით. სიმძლავრის გამყოფის მოდელად ავიღეთ დიელექტრიკი მასში

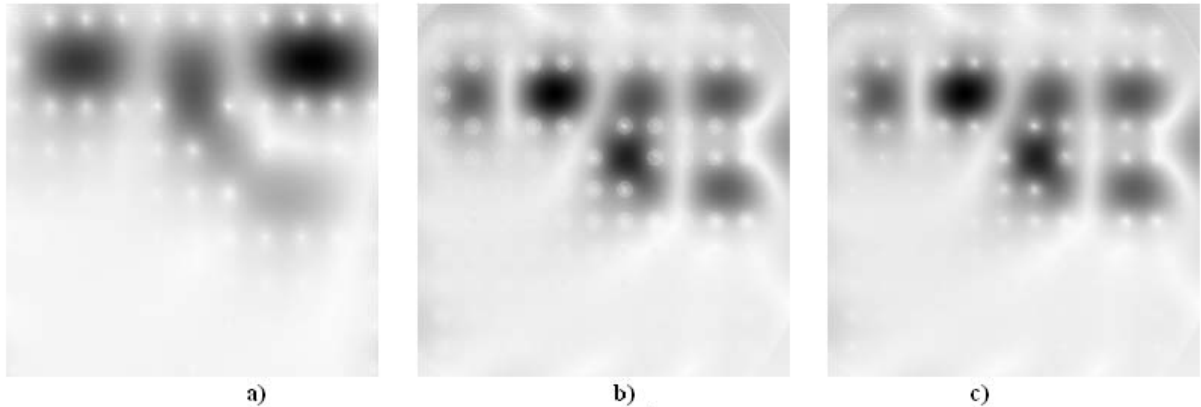


ნახ. 3.4  
ახლო ველის განაწილება  $k=2.3$  ტალღური  
რიცხვისთვის

შეტანილი მეტალური ღეროების პერიოდული სტრუქტურით, რომლის პერიოდულობა დარღვეულია ისე, რომ კრისტალში გვაქვს ერთი შემაგალი და ორი გამომავალი არხი (ნახ. 3.3) [10].

ერთ-ერთ რეზონანსულ სიხშირეზე ( $k=2.3$ ) გამოვითვალეთ ახლო ველის განაწილება, რომელიც წარმოდგენილია ნახ. 2.1 -ზე. როგორც ნახაზიდან ჩანს, არხში გამავალი ველის ამპლიტუდებს შორის თანაფარდობა 1-ის ტოლია. ეს იმის მანიშნებელია, რომ აღნიშნული კრისტალი მასში მოთავსებული წყაროს ველის ენერჯიას არხებში ყოფს თანაბარ ნაწილებად. თანაბარი გაყოფა მივიღეთ იმის გამო, რომ კრისტალი  $X$  ღერძის მიმართ სიმეტრიულია. იმისათვის რომ მივიღოთ ველის სიმძლავრის სხვა პროპორციით გაყოფა, კრისტალის სტრუქტურა უნდა შეიცვალოს. სიმძლავრის გამყოფი ეფექტურად მუშაობს კრისტალის რეზონანსულ სიხშირეზე, ამიტომ ყოველი ახალი სტრუქტურისთვის საჭიროა შორ ზონაში გადასხივებული ველის ენერჯიის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკის აგება, რომელიც რეზონანსული სიხშირის გამოვლენის საშუალებას მოგვცემს. როდესაც ნახ. 3.3 -ზე წარმოდგენილ კრისტალში შევიტანეთ დამატებით 2 ელემენტი, როგორც ეს ნახ. 3.4-ზეა ნაჩვენები, კრისტალის თვისება შეიცვალა, რაც გამოიხატა იმაში, რომ მიღებულმა კრისტალმა მოგვცა მასში მოთავსებული წყაროს ენერჯიის განსხვავებული თანაფარდობით გაყოფა (ნახ. 3.4) [10]. ელექტრომაგნიტური ველის წყაროს მოდელად აღებული გვაქვს წერტილოვანი წყარო, რომელიც შეგვიძლია მოვათავსოთ კრისტალში ნებისმიერ ადგილას. განხილული შედეგებიდან ნათლად ჩანს, რომ კრისტალის სტრუქტურის შეცვლით შეგვიძლია მივიღოთ გაყოფის ნებისმიერი, სასურველ თანაფარდობა. მოცემულ თანაფარდობაზე გავლენას ახდენს დიფრაქციულ სტრუქტურაში შეტანილი მეტალის ღეროების რადიუსის ცვლილებაც. რეზონანსული სიხშირე ნახ. 3.3-ზე მოცემული შემთხვევისთვის იგივეა რაც წინა შემთხვევაში, რაც იმას ნიშნავს, რომ კრისტალში 2 ელემენტის ჩამატებამ მნიშვნელოვნად არ შეცვალა კრისტალის რეზონანსული მახასიათებელი, რომელიც შორ ზონაში გადასხივებული ველის მნიშვნელობისთვისაა აღებული. თუმცა ახლო ზონაში მან მოგვცა სასურველი შედეგი, ანუ ველის სიმძლავრის სასურველი თანაფარდობით გაყოფა.

სიმძლავრის სხვადასხვა თანაფარდობით გაყოფა მიიღწევა ელექტრომაგნიტური ველის წყაროს სიხშირის ცვლილებითაც, ამ შემთხვევაში კრისტალის გეომეტრიას არ ვცვლით. გამყოფისათვის შევარჩიეთ ნახ. 3.5-ზე მოცემული კრისტალი. მასში არხები არასიმეტრიულადაა განლაგებული, რაც განაპირობებს წყაროს ენერგიის არათანაბარ გადანაწილებას. ავავთ ორივე არხის გამოსასვლელზე



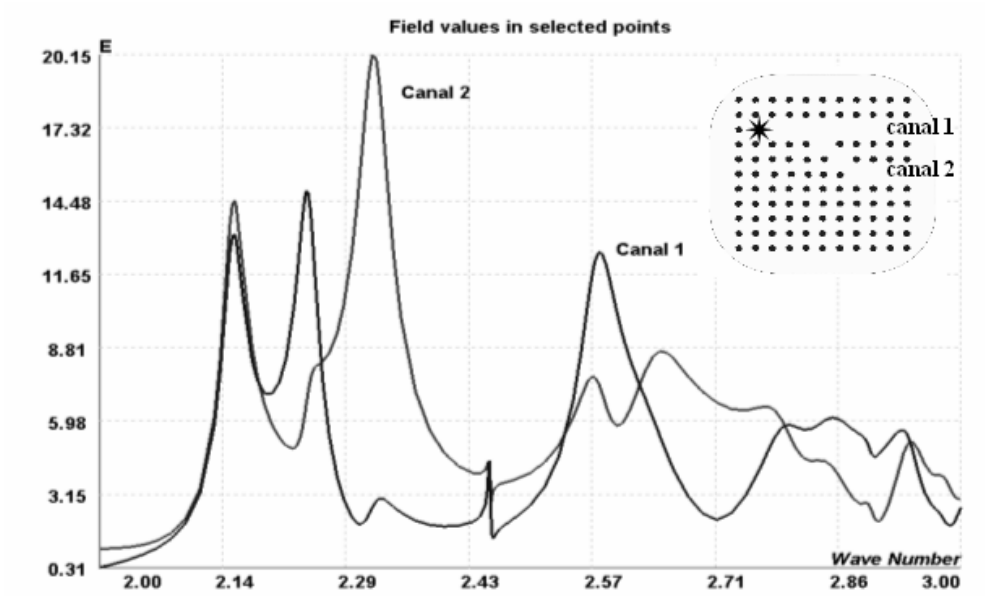
ნახ. 3.5

ახლო ველის განაწილება კრისტალში  
 a)  $k=2.6$  64% 36% b)  $k=2.54$  50% 50% c)  $k=2.32$  30% 70%

კონკრეტულ წერტილებში ველის მნიშვნელობების სიხშირული მახასიათებელი, რამაც საშუალება მოგვცა მიგველო ველის ენერგიის გაყოფის სასურველი თანაფარდობა, რაც ნათლად ჩანს სურ. 3.5-ზე გრაფიკიდან. ავირჩიეთ 3 განსხვავებული სიხშირე, რომლებზედაც არხებში გვაქვს ველის სურათზე მოყვანილი თანაფარდობით გაყოფა (სურ. 3.5). [10]

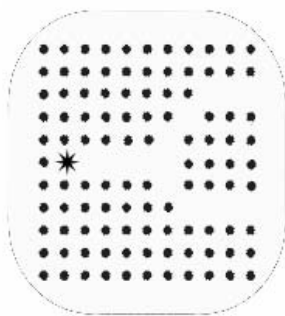
### §3.3 სიხშირული ფილტრი

სიხშირული ფილტრი წარმოადგენს მოწყობილობას, რომელიც განასხვავებს გარკვეულ სიხშირეებს და მათ მიმართავს განსაზღვრული მიმართულებით. წინა შემთხვევის მსგავსად, ავიღეთ კრისტალი 1 შესავალი და 2 გამოსავალი არხით. საჭიროა შეირჩეს ისეთი სტრუქტურა, რომელიც ერთი გარკვეული სიხშირის წყაროს ენერგიას მიმართავს პირველ გამოსავალ არხში, ხოლო სხვას მეორეში. ფილტრაციის დროს, რა თქმა უნდა გარკვეული ენერგია მეორე არასასურველ არხშიც ვრცელდება, მაგრამ მან არ უნდა გადააჭარბოს განსაზღვრულ მნიშვნელობას.

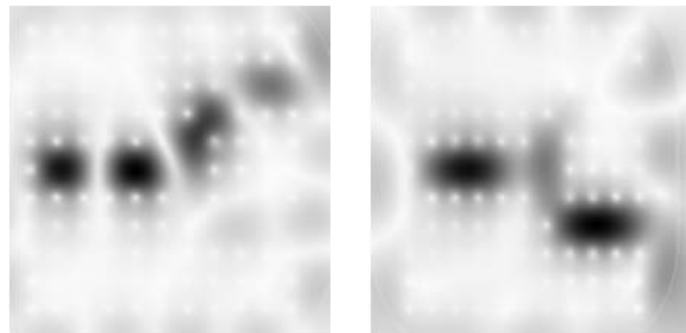


ნახ. 3.6  
ფიქსირებულ წერტილებში ველის ამპლიტუდების  
სიხშირეზე დამოკიდებულება

ნახ. 3.7-ზე წარმოდგენილია კრისტალის გეომეტრია. მოცემული კრისტალისთვის თითოეულ გამომავალ არხში ველის ამპლიტუდის სიხშირეზე დამოკიდებულებას აქვს ნახ. 3.6 სახე. მოცემული გრაფიკებიდან ავარჩიეთ სიხშირეები, რომლებზედაც არხის გამოსასვლელებს შორის ველის ამპლიტუდის მაქსიმალური განსხვავება გვაქვს (არჩეული სიხსირეები შეესაბამება ფილტრაციის სიხშირეებს). ამ სიხშირეთა შესაბამისი  $k=2.6$  და  $k=2.2$  ტალღური რიცხვებისთვის ველის განაწილებას კრისტალში აქვს (ნახ. 3.8 ა,ბ) სახე, რაც იმის მანიშნებელია, რომ ამ სიხშირეებისთვის ხდება ტალღის ფილტრაცია. ნახაზზე ნათლად ჩანს, რომ  $k=2.6$



ნახ. 3.7  
კრისტალის ფორმა



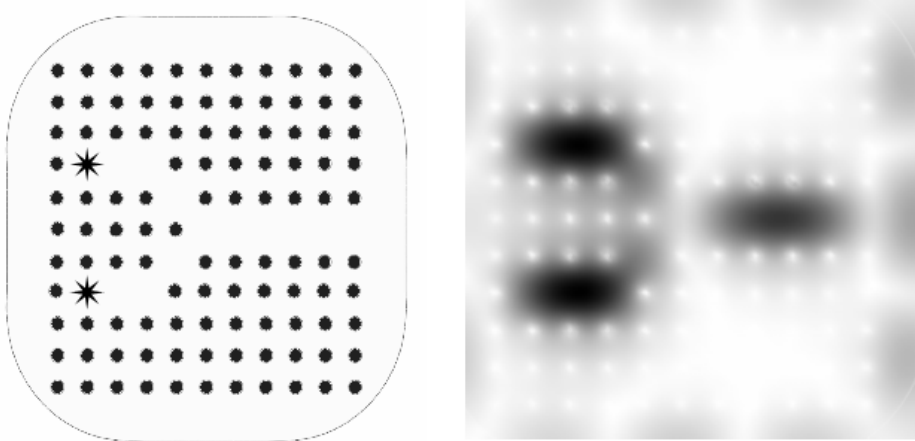
ნახ. 3.8  
ახლო ველის განაწილება კრისტალში  
ა)  $k=2.6$  ბ)  $k=2.2$

შემთხვევაში ენერჯის მნიშვნელოვანი ნაწილი ვრცელდება პირველ არხში, ხოლო  $k=2.2$  შემთხვევაში მეორე არხში. შესაძლებელია შეირჩეს სხვა სტრუქტურებიც ფილტრისათვის, რომელიც სხვა სიხშირეებზე იმუშავებს. ასევე შესაძლებელია კრისტალში გაკეთდეს 3 გამოსავალი არხი, რაც საშუალებას მოგვცემს სამი სხვადასხვა სიხშირის სასურველ არხში გადაცემას.

### §3.4 სიმძლავრეთა შემრევი

ფოტონური კრისტალების ბაზაზე შეიძლება შემუშავებულ იქნას აგრეთვე სიმძლავრეთა შემრევი. შემრევი წარმოადგენს მოწყობილობას, რომელიც ახდენს 2 ან რამდენიმე წყაროს ენერჯის შერევას.

ჩვენ განვიხილეთ შემრევის ნახ. 3.9-ზე წარმოდგენილი ვარიანტი, როდესაც კრისტალში გაკეთებულია 2 შესასვლელი და ერთი გამოსასვლელი არხი. პირველ 2 არხში ვათავსებთ 2 სხვადასხვა ენერჯის წყაროს და კრისტალი უზრუნველყოფს მათ შერევას, ანუ დეფექტები ისეა განლაგებული, რომ გამოსავალზე მიიღება ამ ორი წყაროს ჯამური ველი.



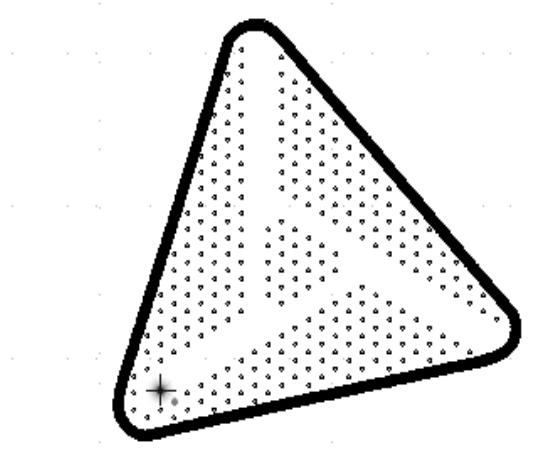
ნახ. 3.9

კრისტალის გეომეტრია და ახლო ველის განაწილება  
კრისტალში  $k=2.2$  ტალღური რიცხვისთვის

თუ ავიღებთ სხვა სიხშირის წყაროებს, მაშინ საჭირო გახდება დეფექტების განლაგების სხვა კონსტრუქციის შერჩევა. შესაძლებელია აგრეთვე სამი და მეტი წყაროს ენერჯის შერევა. ამისათვის უნდა შეირჩეს შესაბამისი კრისტალი მასში დეფექტების საჭირო კონფიგურაციით.

### §3.5 ცირკულატორი

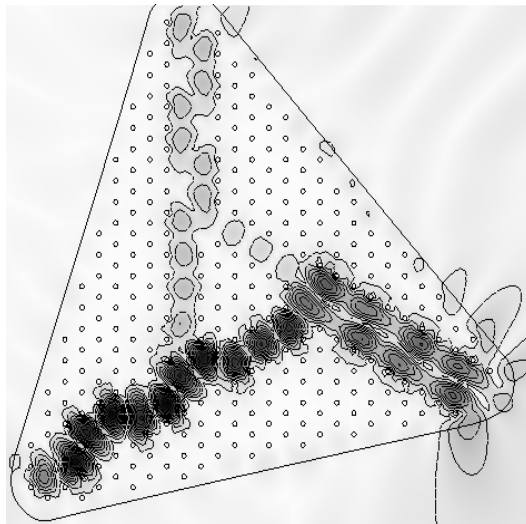
ცირკულატორი წარმოადგენს მოწყობილობას, რომელიც მიმართულებას უცვლის ელექტრომაგნიტური ველის წყაროს ენერჯიას. თავდაპირველად განვიხილეთ კრისტალის ოთხკუთხა ფორმა, მასში გაკეთებით სამ არხს. ცირკულატორის



**ნახ. 3.10**  
კრისტალის გეომეტრია

ბუნებიდან გამომდინარე პირველ არხში მოთავსებული წყაროს ენერგია უნდა გადაეცეს მეორე არხს, მეორე არხში მოთავსებული წყაროს ენერგია მესამეს, ხოლო თუ წყაროს მესამე არხში მოვითავსებთ, მაშინ ველი პირველ არხში უნდა გაგრძელდეს. კრისტალს მივეციოთ სამკუთხა ფორმა, როგორც ეს ნახ. 3.10-ზეა ნაჩვენები და მასში მეტალური ღეროები განვალაგეთ ჰექსაგონალურად.

მოცემული კრისტალი იმითაც არის საინტერესო, რომ ის მისი

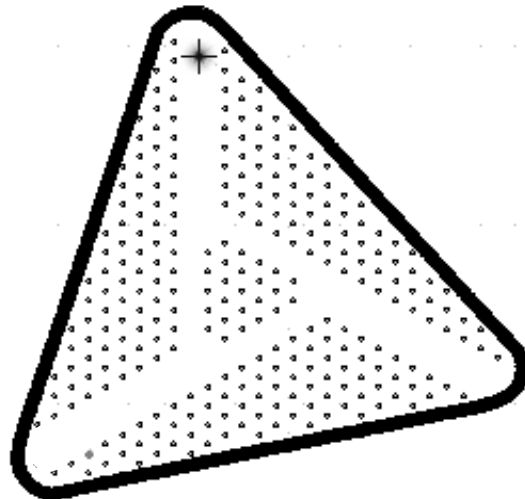


**ნახ. 3.11**  
ახლო E ველის განაწილება  
ცირკულატორში

ცენტრის მიმართ სიმეტრიულია და ამიტომ მან უნდა იმუშაოს როგორც ცირკულატორმა: კრისტალმა უნდა გადაეცეს პირველი არხიდან ველის მეორე არხში ენერგია, მაშინ ავტომატურად შესრულდება დანარჩენი პირობებიც მისი სიმეტრიულობის გამო. მოყვანილი მოსაზრების დასადასტურებლად დავიწყოთ

მოცემულ კრისტალის გამოკვლევა. მოვათავსეთ პირველ არხში წყარო და სხვადასხვა სიხშირეზე ვაკვირდებით ახლო ველის სურათს. გარკვეულ სიხშირიდან, პირველი არხიდან მეორესა და მესამეში გადაცემული ველის ენერჯიის თანაფარდობა იწყებს ზრდას და რეზონანსულ სიხშირეზე თითქმის მთელი ენერჯია მეორე არხს გადაეცემა. მოცემული შემთხვევისთვის ახლო ველის განაწილება მოცემულია ნახ. 3.11-ზე. ნახაზზე ჩანს მესამე არხში ველის გარკვეული რაოდენობა, მაგრამ ის მღვარი ტალღის სახით არის და ამიტომ ამ მიმართულებით ველის ენერჯიის გავრცელება არ ხდება.

შემდეგ წყარო მოვათავსეთ III არხში ( ნახ. 3.12 ). როგორც მოსალოდნელი იყო ველის ენერჯია გადაეცა I არხს. ნახ. 3.13-ზე მოცემულია ახლო ველის სურათი და მასზე ნათლად ჩანს, რომ ველის განაწილება ნახ. 3.11-ზე განხილული შემთხვევის სიმეტრიულია. დადებითი შედეგი მივიღეთ მესამე შემთხვევაში, როცა წყარო მოთავსებულია მეორე არხში.

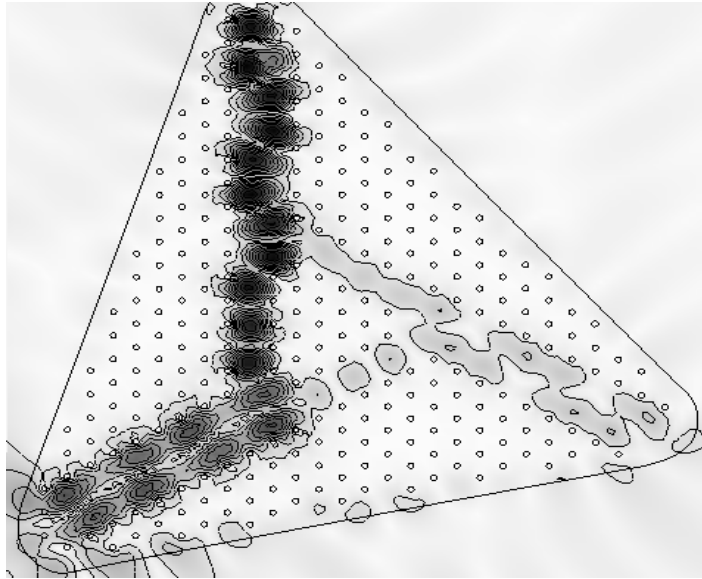


ნახ. 3.12

კრისტალის გეომეტრია

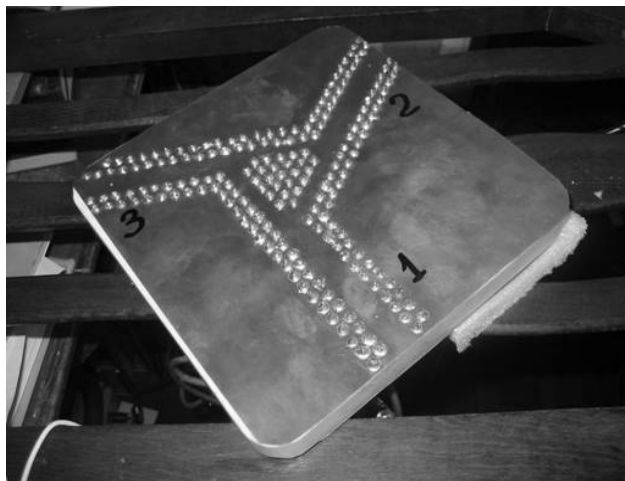
იმ ფაქტს რომ ველი ვრცელდება ძირითადად ერთ არხში, განაპირობებს ის, რომ ცირკულატორის ცენტრში მოთავსებულია სამკუთხა ობიექტი. როდესაც ტალღა მას 2 სხვადასხვა მიმართულებიდან უვლის, ტალღები ხვდებიან სრულ საწინააღმდეგო ფაზაში და ერთმანეთს აქრობენ. ფოტონური კრისტალის ბაზაზე სავარაუდოა აგრეთვე სხვა კონფიგურაციის ცირკულატორის დამზადება. მასში მეტალური ღეროები შეიძლება განლაგდეს სხვა ფორმითაც. მიღებულ შედეგზე გავლენას მოახდენს მათი რადიუსის რეგულირებაც.





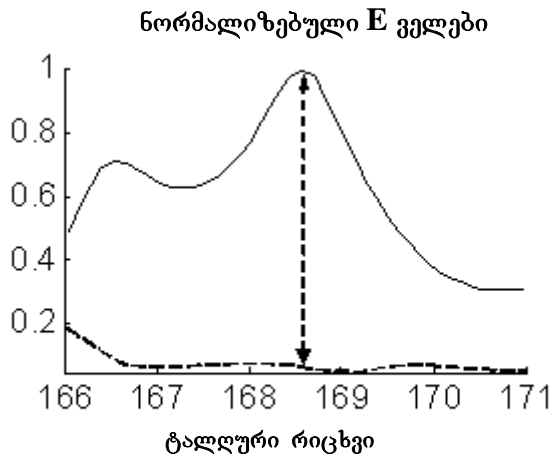
ნახ. 3.13  
ახლო E ველის განაწილება

მოცემული კრისტალის ბაზაზე დამზადებულ იქნა ცირკულატორის პროტოტიპი. ის წარმოადგენს დიელექტრიკს, რომელზეც 2-ივე მხრიდან დაფენილია მეტალური ფენა და მასში მესერს ქმნის ლითონის წვრილი ღეროები. ლითონის ფენები, რომელიც მეტალზე 2-ივე მხრიდან არის დაფენილი, უზრუნველყოფს ველის სარკისებურ არეკვლას, და ამით ის თავისი თვისებებით ემსგავსება 2 განზომილებიან ფოტონურ კრისტალს. მას აქვს ნახ. 3.14-ზე ნაჩვენები სახე:

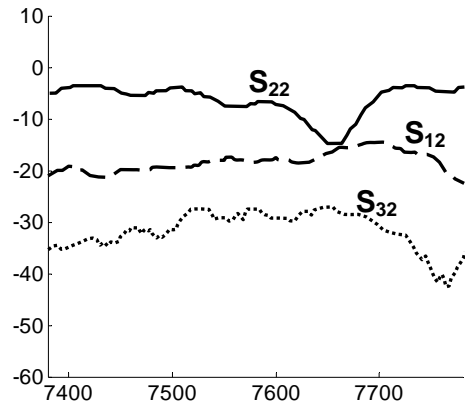


ნახ. 3.14  
ცირკულატორის პროტოტიპი

ჩატარდა რეალური ექსპერიმენტი ცირკულატორის მოცემულ პროტოტიპზე; შემოწმდა თუ რამდენად განსხვავდება ცირკულატორის მეორე და მესამე გამოსასვლელზე ველის ამპლიტუდა, როდესაც კვება მიეწოდება პირველ შესასვლელს. აიგო სიხშირული მახასიათებელი, რომელსაც აქვს შემდეგი სახე (ნახ. 3.15). ნახ. 3.16-ზე წარმოდგენილია ცირკულატორის გამოსასვლელზე არეკვლის კოეფიციენტის სიხშირული მახასიათებელი.

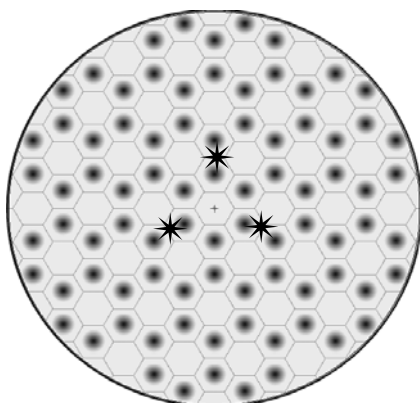


ნახ. 3.15. ცირკულატორის მეორე და მესამე არხის გამოსასვლელზე ველის ამპლიტუდის სიხშირული მახასიათებელი, როცა კვება მიეწოდება I არხს



ნახ. 3.16 ცირკულატორის გამოსასვლელზე არეკვლის კოეფიციენტის სიხშირეზე დამოკიდებულება  
 $S_{12}$  -შეესაბამება პირველ არხს  
 $S_{22}$  -შეესაბამება პირველ არხს  
 $S_{32}$  -შეესაბამება პირველ არხს

### §3.6 ანტენური სტრუქტურები

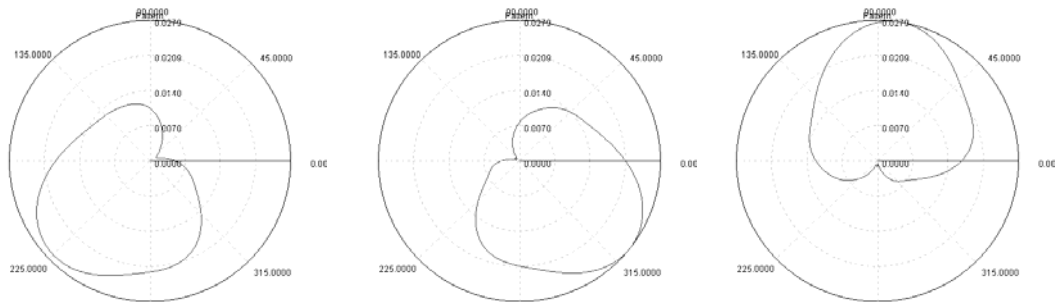


ნახ. 3.17 ფოტონური კრისტალი, როგორც ანტენა

ფოტონური კრისტალი შეიძლება გამოყენებულ იქნას როგორც მიმართული გამოსხივების მქონე ანტენა. ავირჩიეთ წრიული ფორმის კრისტალი (ნახ. 3.17), რომელშიც კრისტალის ცენტრის მიმართ სიმეტრიულად მოთავსებულია სამი გამომსხივებელი. სამივე გამომსხივებელს აქვს ერთნაირი სიხშირე. როდესაც მათი ფაზები ერთნაირია, ანტენა ასხივებს ყველა მიმართულებით კრისტალის სიმეტრიულობის გამო. საკმარისია ვცვალოთ მათი ფაზების თანაფარდობა, რომ გარკვეულ კონკრეტულ შემთხვევაში მივიღოთ მიმართული გამოსხივება როგორც ეს ნახ. 3.18

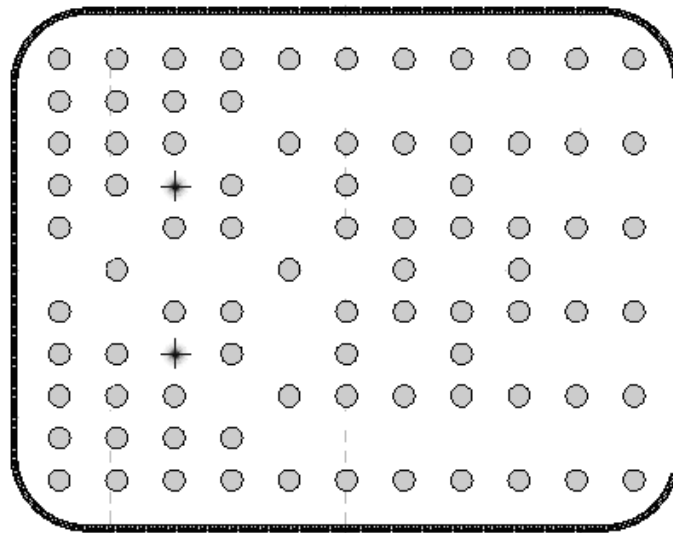
ზეა მოცემული. მოცემული ანტენა ხასიათდება იმ თვისებითაც, რომ მასში

მოთავსებული წყაროების ფაზათა გარკვეული კანონზომიერებით ცვლილებისას შეიძლება მისი გამოსხივების მიმართულების შემოტრიალება 360 გრადუსით. ნახ. 3.18-ზე ნაჩვენებია ანტენის გამოსხივების დიაგრამა სამ სხვადასხვა შემთხვევაში.



**ნახ. 3.18**  
გამოსხივებული ველის დიაგრამა ფოტონური კრისტალისთვის (როგორც ანტენა)

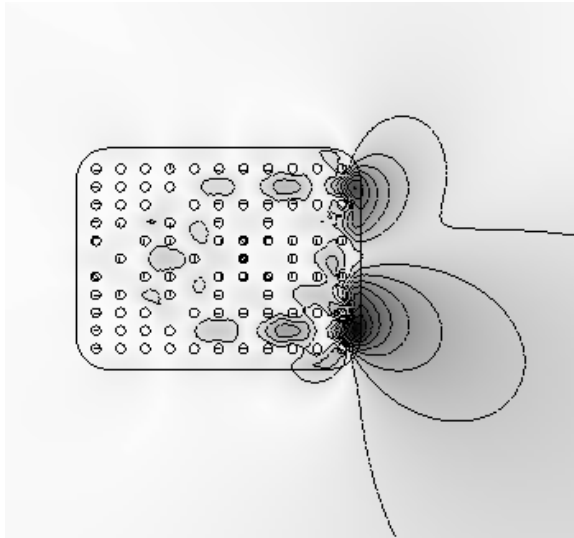
ასეთი ტიპის ანტენები გამოიყენება გარემოს სკანირებისათვის.



**ნახ. 3.19**  
კრისტალის გეომეტრია მასში მოთავსებული 2 წყაროთი

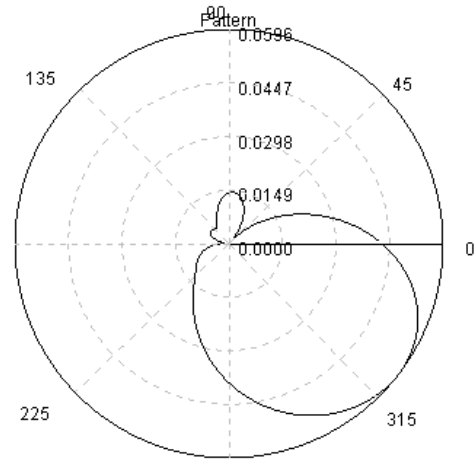
მისი დამზადება საკმაოდ ძარტივია და აღარ არის საჭირო უზარმაზარი ანტენების გამოყენება იგივე მიზნებისთვის. ასეთი ანტენა აღარ საჭიროებს შემოტრიალებას, რადგან მათი გამოსხივების მიმართულების ცვლა ხდება ელექტრონულად. ასეთი ტიპის ანტენას შეიძლება ჰქონდეს მართკუთხა ფორმაც. ნახ. 3.19-ზე გამოსახულია ერთ-ერთი ასეთი შემთხვევა. როგორც ნახაზზე ჩანს, მასში მოთავსებულია 2 წყარო. ანტენა იძლევა მიმართულ გამოსხივებას და საჭიროა ამ მიმართულების მართვა წყაროთა ფაზების ცვლილების საშუალებით. ჩვენ გამოვიკვლიეთ მოცემული კრისტალი და გარკვეულ (კრისტალის პარამეტრების მიხედვით) სიხშირეზე მივიღეთ სასურველი სურათი. ნახ. 3.20-ზე გამოსახულია ახლო ველის განაწილება, როდესაც წყაროების ფაზათა თანაფარდობაა 0:80 ამ

დროს ანტენის გამოსხივების მიმართულება შემოტრიალებულია 45 გრადუსით X ღერძის მიმართ მარჯვნივ. ნახ. 3.21-ზე მოცემულია შესაბამისი გადასხივებული ველის დიაგრამა. [12]



ნახ. 3.20

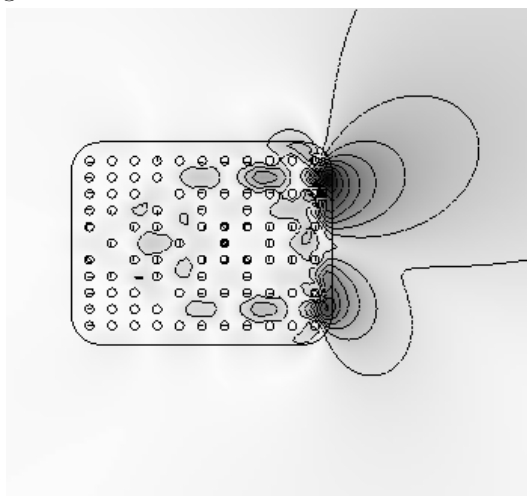
ახლო ველის განაწილება კრისტალში წყაროთა ფაზების თანაფარდობისას 0 : 80



ნახ. 3.21

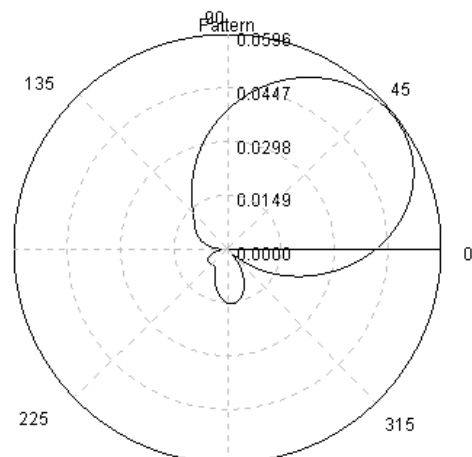
გადასხივებული ველის დიაგრამა

თუ დავიწყებთ ფაზათა თანაფარდობის ცვლილებას, ანტენის გამოსხივების მიმართულება დაიწყებს შემოტრიალებას და ფაზათა თანაფარდობის 80 : 0 შემთხვევაში ახლო ველის განაწილებას ექნება ნახ. 3.22-ზე მოცემული სახე; ხოლო გადასხივებული ველის დიაგრამა კი წარმოდგინდება ნახ. 3.23 სახით. როგორც ნახ. 3.23-ზე ჩანს ველი შემოტრიალდა 90 გრადუსით მარცხნივ. ნახ. 3.24-ზე მოცემულია ახლო ველის განაწილება ანტენური სტრუქტურისთვის, რომელსაც როგორც



ნახ. 3.22

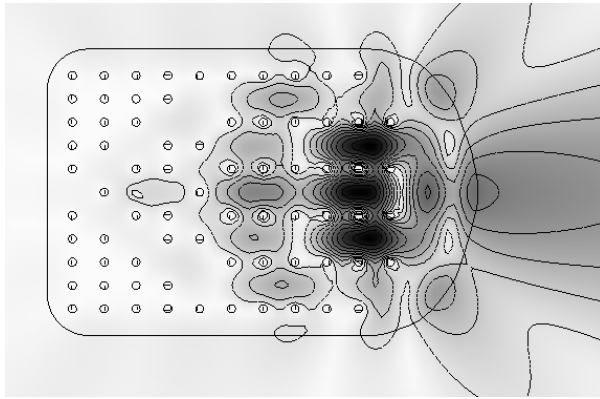
ახლო ველის განაწილება კრისტალში წყაროთა ფაზების თანაფარდობისას 80 : 0



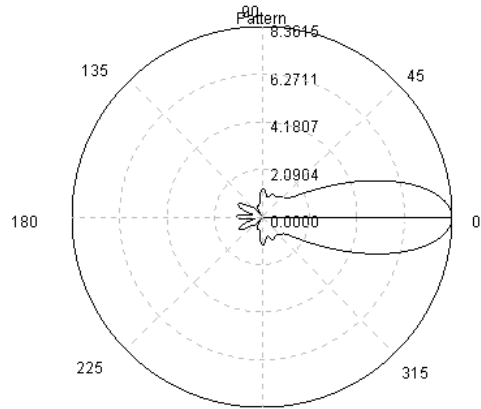
ნახ. 3.23

გადასხივებული ველის დიაგრამა

ნახაზზე ჩანს, გამოსასვლელზე აქვს შემკრები ღინზის ფორმა, რაც უზრუნველყოფს მის მიმართულ გამოსხივებას. მოცემული ანტენისათვის გადასხივებული ველის დიაგრამა მის რეზონანსულ სიხშირეზე მოცემულია სურ. 3.25-ზე. ასეთი ტიპის სტრუქტურა აღსანიშნავია იმით, რომ ღინზის რადიუსის ცვლილებით



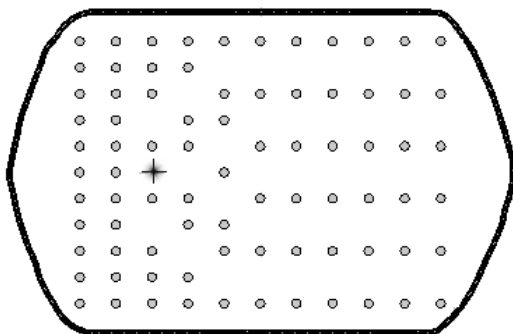
ნახ. 3.24  
ახლო ველის განაწილება



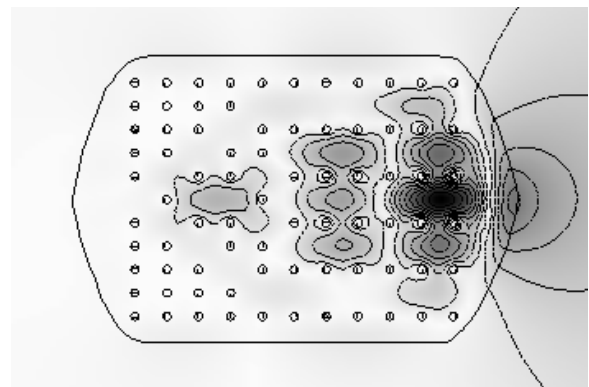
ნახ. 3.25  
გადასხივებული ველის

შეიძლება ანტენის გამოსხივება გავხადოთ უფრო მიმართული.

განვიხილოთ კიდევ ერთი ანტენური სტრუქტურა, როდესაც კრისტალის ორივე გვერდს აქვს ღინზის ფორმა. მისი გეომეტრია მოცემულია ნახ. 3.26-ზე. მოსალოდნელია, რომ მოცემულმა სტრუქტურამ

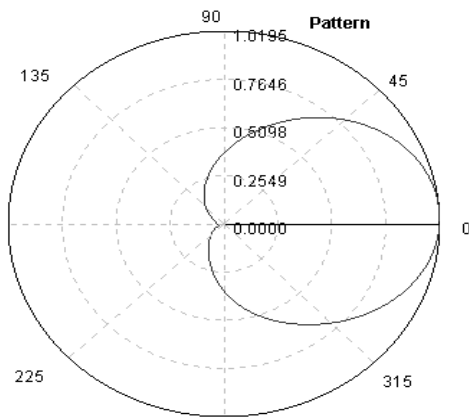


ნახ. 3.26  
კრისტალის გეომეტრია

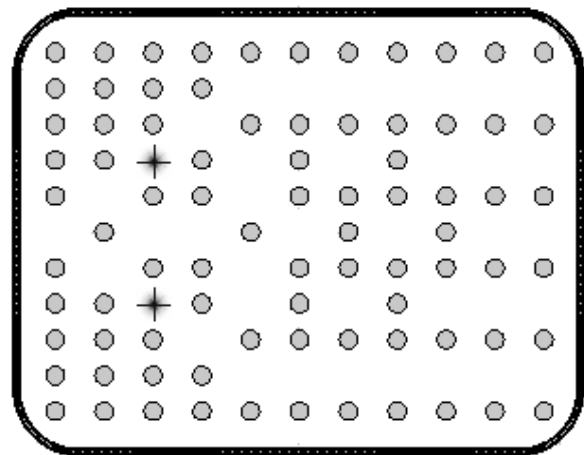


ნახ. 3.27  
ახლო ველის განაწილება

უნდა მოგვცეს მიმართული გამოსხივება, რასაც ადასტურებს ნახ. 3.27, რომელზეც მოცემულია ახლო ველის განაწილება ერთ-ერთ რეზონანსულ სიხშირეზე. შორ ზონაში გადასხივებული ველის დიაგრამა გამოსახულია ნახ. 3.28-ზე. [14]

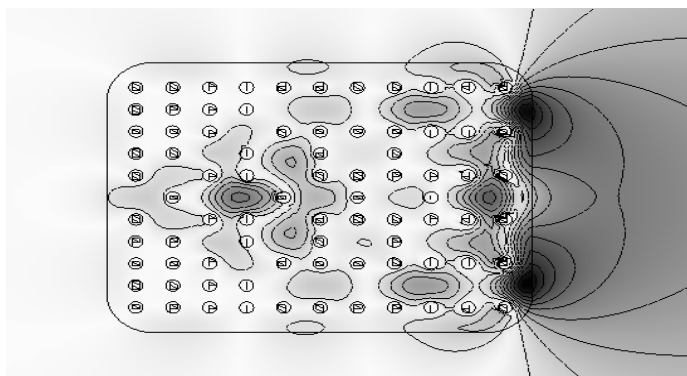


ნახ. 3.28  
გადასხივებული ველის დიაგრამა

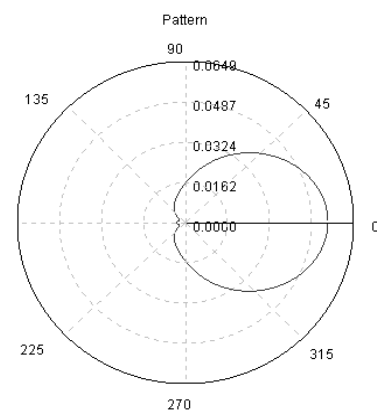


ნახ. 3.29  
კრისტალის გეომეტრია

ჩვენს მიერ განხილულ წინა შემთხვევებში კრისტალის დიელექტრიკული შეღწევადობა მერყეობდა 4 – 9 შუალედში. ახლა განვიხილოთ შემთხვევა, როცა  $\epsilon = 100$ . კრისტალის გეომეტრიას აქვს ნახ. 3.29 სახე. გამოვიკვლიეთ მოცემული სტრუქტურის კრისტალი, სხვადასხვა სიხშირეზე ვაკვირდებოდით ველის ეოფაქცევას ახლო ზონაში და ვიპოვეთ სიხშირე, რომელზეც ანტენას ჰქონდა მიმართული გამოსხივება. ახლო ველის განაწილება მოცემული შემთხვევისთვის ნაჩვენებია ნახ. 3.30-ზე, ხოლო გადასხივებული ველის დიაგრამა ნახ. 3.31-ზე. როგორც ამ ნახაზებიდან ჩანს ანტენის გამოსხივება საკმაოდ მიმართულია და X ღერძის მიმართ სიმეტრიულია, რადგან კრისტალში მოთავსებული ორივე წყაროს ფაზები ერთმანეთს ემთხვევა. თუ მათი ფაზების თანაფარდობას შევცვლით, მაშინ გამოსხივების მიმართულება დაიწყებს შემოტრიალებას როგორც ერთი ისე მეორე მიმართულებით, როგორც ეს წინა შემთხვევებში იყო განხილული.



სურ. 3.30  
ახლო ველის განაწილება

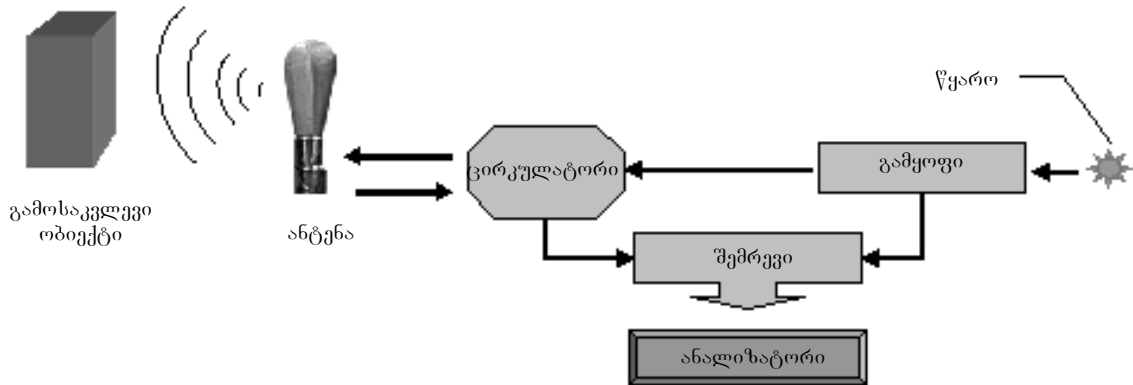


სურ. 3.31  
გადასხივებული ველის დიაგრამა

ჩვენ განვიხილავით 2 განზომილებიან შემთხვევას. დიელექტრიკში შეტანილი იყო უსასრულო სიგრძის გამტარები. რა თქმა უნდა ტექნიკურად ამის უზრუნველყოფა შეუძლებელია. ასეთი სახის მოწყობილობების დასამზადებლად იღებენ დიელექტრიკს, რომელშიც შეტანილია მეტალის გარკვეული სიგრძის ღეროები და დიელექტრიკი ორივე მხრიდან იფარება მეტალური ფირფიტებით, რომლის მათკრანირებელი ხასიათი ქმნის კრისტალში უსასრულო მეტალური გამტარების ეფექტს. მისი კვება შესაძლებელია მასში შეყვანილი კაბელით, რომელიც შეერთებულია ელექტრომაგნიტურ ტალღების გენერატორთან. ფოტონური კრისტალების ბაზაზე ასეთი სახის მოწყობილობების დამზადება საკმაოდ მარტივია.

### 3.7 ინტეგრალური სქემა ფოტონური კრისტალის ბაზაზე

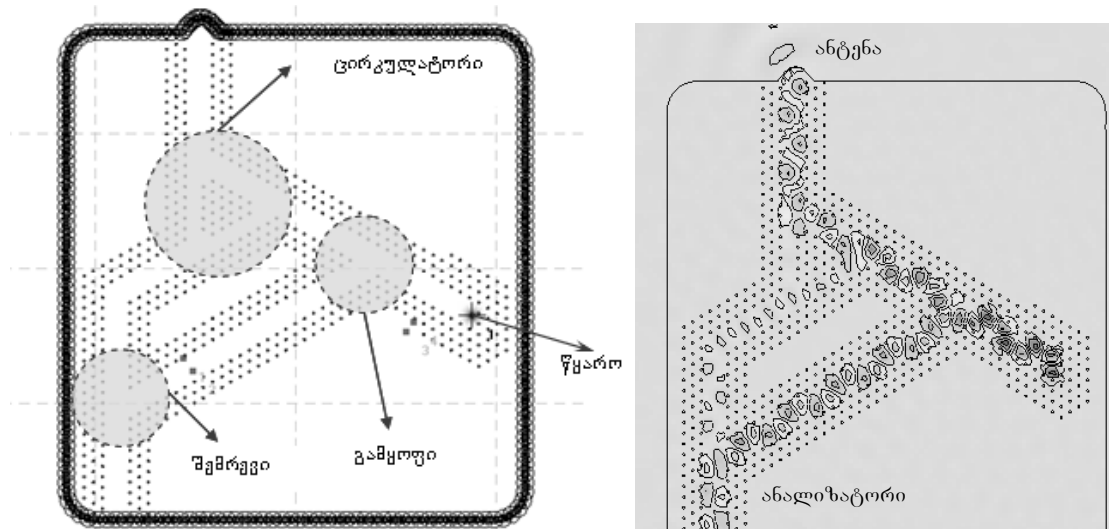
მოცემულ პარაგრაფში განვიხილავთ ფოტონური კრისტალის ბაზაზე დამზადებულ ინტეგრალურ სქემას, რომელიც წარმოადგენს ხელსაწყოს დიელექტრიკის ზედაპირის დისტანციური გამოკვლევისთვის. მის ბლოკ სქემას აქვს შემდეგი სახე ნახ.3.32:



ნახ. 3.32  
ინტეგრალური სქემის  
ბლოკსქემა

ელექტრომაგნიტური ველის წყაროდან ენერგია მიეწოდება სიმძლავრეთა გამყოფს; ნაწილი ენერგიისა მიდის ანალიზატორში და ასრულებს საყრდენი სიგნალის როლს; ნაწილი კი შედის ცირკულატორში და მისი გავლის შემდეგ მიეწოდება წვეთის ფორმის ანტენას, საიდანაც ეს ენერგია გამოსხივდება თავისუფალ სივრცეში. თუ მოცემულ მოწყობილობას მიუვახლოვებთ რაიმე

ობიექტს, რომლის გამოკვლევაც გვინდა, ნაწილი ანტენის მიერ გამოსხივებული ენერჯიისა აირეკლება მოცემული ობიექტდან და დაბრუნდება ისევ მოცემულ მოწყობილობაში ანტენის გავლით, რომელიც მუშაობს აგრეთვე როგორც მიმღები. შემდეგ ეს ენერჯია შვეა ცირკულატორში და იქიდან შემრევში, რომელშიც საყრდენ სიგანაღს შეერევა და მიეწოდება ანალიზატორს, რომელიც მოახდენს მის ანალიზს. ჩვენ მოვახდინეთ მოცემული ხელსაწყოს მოდელირება ფოტონური კრისტალის ბაზაზე და მას აქვს ნახ. 3.33-ზე წარმოდგენილი სახე:



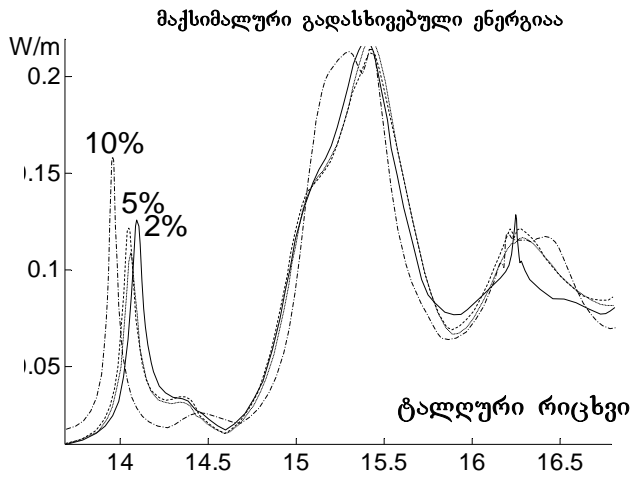
ნახ. 3.33  
ინტეგრალური სქემის გეომეტრია (მარცხნივ) და მასში ველის  
განაწილების სურათი (მარჯვნივ)

### §3.8 ქარხნული დამზადების სიზუსტის მოდელირება

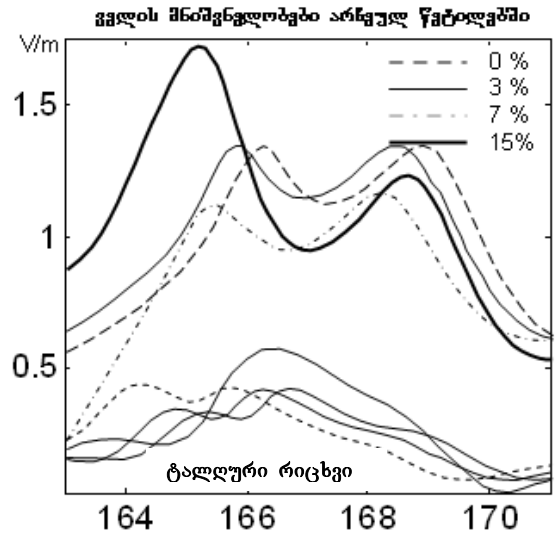
როგორც ცნობილია, შეუძლებელია ქარხანამ სრული სიზუსტით დაამზადოს ესა თუ ის მოწყობილობა. ამასთანავე მეტად მნიშვნელოვანია გამოკვლევულ იქნას თუ როგორ აისახება ქარხნული უზუსტობა ხელსაწყოს მუშაობაზე. ამ მიზნით ჩვენ დავამოდელოეთ ეს უზუსტობები. კერძოდ, მესრის ელემენტების ზომას და მდებარეობას მივეცით შემთხვევითი წანაცვლებები და ვნახეთ წონასწორობის მდებარეობიდან გადახრის რა პროცენტული რაოდენობისთვის არის მდგრადი ესა თუ ის მოწყობილობა. გამოვიკვლიეთ 2 შემთხვევა: ფაზირებული ანტენისა და ცირკულატორის სხვადასხვა პროცენტული უზუსტობებისთვის. ნახ. 3.34-ზე წარმოდგენილია მაქსიმალური გადასხივებული ენერჯიის სიხშირული მახასიათებელი დამზადების სხვადასხვა სიზუსტისთვის ფაზირებული ანტენის



დროს; ნახ. 3.35-ზე კი ველის მნიშვნელობების სიხშირული მახასიათებლები ცირკულატორის გამოსასვლელი არხის 2 სხვადასხვა წერტილში დამზადების სიზუსტის სხვადასხვა შემთხვევებისთვის.



ნახ. 3.34 გადასხივებული ენერგის ტალღურ რიცხვზე დამოკიდებულება ფაზირებული ანტენისქარხნული დამზადების სხვადასხვა სიზუსტისთვის.



ნახ.3.35 ცირკულატორის 2 სხვადასხვა წერტილში  $E_z$  ველის მნიშვნელობების სიხშირეზე დამოკიდებულება ქარხნული დამზადების სხვადასხვა სიზუსტისთვის.

როგორც ნახაზები გვიჩვენებს მოცემული მოწყობილობები მდგრადობას ინარჩუნებენ მანამ, სანამ დამზადების უზუსტობა არ გადააჭარბებს 10%-ს.

**დასკვნა.**

– გამოკვლევებმა გვაჩვენეს, რომ ფოტონური კრისტალების ბაზაზე შესაძლებელია შეიქმნას ისეთი მოწყობილობები და ელემენტები, როგორიცაა ცირკულატორი, სიხშირული ფილტრი, ტალღების გამყოფი, შემრევი და ანტენური სტრუქტურები.

– შეიქმნა პროგრამული პაკეტი, რომელიც საშუალებას იძლევა:

ა) გამოვიკვლიოთ ნებისმიერი ფორმის, ზომის და სტრუქტურის ფოტონური კრისტალი;

ბ) ვცვალოთ კრისტალის დიელექტრიკული შეღწევადობა;

გ) კრისტალში მოთავსებულ პერიოდულ სტრუქტურაში შევიტანოთ ნებისმიერი ფორმის დეფექტი;

დ) კრისტალში განვაღაგოთ სასურველი რაოდენობის ელექტრომაგნიტური ველის წყარო;

ე) ვცვალოთ სიხშირე;

ვ) თითოეული შემთხვევისთვის შეიძლება გამოვსახოთ ახლო ველის განაწილება და ავაგოთ შორ ზონაში გადასხივებული ველის დიაგრამა;

ზ) კრისტალის სასურველ წერტილში ველის მნიშვნელობის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკი.

თ) პროგრამული პაკეტის საშუალებით შესაძლებელია მოვასდინოთ ნებისმიერი მესრის საფუძვლიანი შესწავლა რეალურ დროში, რასაც პრაქტიკული განხორციელებისათვის არამარტო დიდი დროითი, არამედ მნიშვნელოვანი მატერიალური ხარჯი დასჭირდებოდა.

– ჩატარდა რეალური ექსპერიმენტი; მოხდა რეალური და რიცხვითი ექსპერიმენტის მონაცემების შედარება; განსხვავება ამ მონაცემებს შორის არ ცილდება ნორმის ფარგლებს.

– გათვალისწინებულია ქარხნული დამზადების სიზუსტის შემოსაზღვრულობა და ნაჩვენებია რომ მოწყობილობები ინარჩუნებენ მდგრადობას ნორმიდან მაქსიმუმ 10% გადახრის შემთხვევაში.

## ლიტერატურა

- [1] Kupradze, V.D. (1967) About approximates mathematical physics problem, Success of Mathematical Sciences, 22, N2, 59-107. (in Russian).
- [2] V.D. Kupradze, M.A. Aleksidze: On one approximate method for solving boundary problems. The BULLETIN of the Georgian Academy of Sciences. 30(1963)5, 529-536 (in Russian).
- [3] Aleksidze, M.A. (1991) Fundamental functions in approximate solutions of the boundary problems, Nauka, Moscow (in Russian).
- [4] M.A. Aleksidze: Fundamental functions in approximate solutions of the boundary problems, Nauka, Moscow 1991, 1-352 (in Russian).
- [5] Z.Domanski, A.Piskorek, Z.Roek: On the application of the Fisher-Riss-Kupradze method for solving the first Fourier problem. Roczn. Pol. Tow. Mat., Ser. 1, Prace Mat. 16 (1972), 137-147 (in Russian).
- [6] N.S. Bakhvalov: On the properties of the optimal methods for solving the problems of mathematical physics. Journal of Appl. Math. and Math. Physics. 10(1970)3, 555-568 (in Russian).
- [7] Yu.A. Eremin, N.V. Orlov: The method of discrete sources in the diffraction problems upon the body of rotation in dissipative half-space. Radiotekhnika i Elektronika. 33(1988)12, 2506 (in Russian).
- [8] R.S. Popovidi-Zaridze, D.D. Karkashadze, G.Z. Akhvlediani, J. h. Khatiashvili: Investigation of the possibilities of the method of auxiliary sources in solution of the two-dimensional electrodynamics problems. Radiotekhnika i Elektronika. 26(1981)2, 254-262 (in Russian).
- [9] R. Popovidi-Zaridze: The method of auxiliary Sources. Institute of Radio-engineering of Academy of Sciences, preprint N 14(386), Moscow 1984, 1-80 (in Russian).
- [10] Zaridze R., Karkashadze D., Tavzarashvili K., Bijamov A., **Tabatadze V.**, Hafner Ch., Erni D., Moreno E.. "PBG Devices Based On Periodic Structures With Defects". 2002 USNC/URSI National Radio Science Meeting & IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, San Antonio, Texas, June 16-21, 2002, vol. 2, pp. 856-859. <http://www.ieeeaps.org/2002APSURSI>
- [11] R.S. Zaridze, D.D. Karkashadze, F.G. Bogdanov, A.Y. Bijamov. "Scattering and Propagation in Finite Photonic Crystals with Complex Material Filling ". Proceedings of VIth International Seminar/Workshop DIPED-2002, Tbilisi, Georgia, October 10-13, 2002, pp. 87-90. <http://www.ewh.ieee.org/soc/cpmt/ukraine/>
- [12] R. Zaridze, A. Bijamov, K. Tavzarashvili, **V. Tabatadze**. "Finite Photonic Crystals Implementation in Microwave Devices". Proceedings of VIth International Seminar/Workshop DIPED-2002, Tbilisi, Georgia, October 10-13, 2002, pp. 106-109. <http://www.ewh.ieee.org/soc/cpmt/ukraine/>

- [13]A. Bijamov, I. Paroshina, D. Karkashadze. "Simulation of optical control devices based on photonic band structures". Proceedings of VIIIth International Seminar/Workshop DIPED-2003, Lviv, September 23-25, 2003. pp. 59-62 <http://www.ewh.ieee.org/soc/cpmt/ukraine/>
- [14]R. Zaridze, A. Bijamov, K. Tavzarashvili, **V. Tabatadze**. "Simulation of the Finite Photonic Crystal-Based Adaptive Antenna". Proceedings of IX-th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET2002), Kiev, Ukraine, September 10-13, 2002, vol. 2, pp. 407-409. <http://www.kharkov.ukrtel.net/mmet02>
- [15]R.Zaridze, A.Bijamov, D.Karkashadze, K.Tavzarashvili, **V.Tabatadze**, I.Paroshina, C.Hafner, D.Erni. "SOme antenna DEvices Based omPBG Systems".2003 IEEE International Antennas and Propagation Symposium and USNC/CNC/URSI North American Radio Science Meeting, June 22-27, 2003, Columbus, OH, USA.IEEE Catalog#03Ch37450C <http://aps2003.eng.ohio-state.edu/>
- [16]R.Zaridze, A.Bijamov, D.Karkashadze, K.Tavzarashvili, **V.Tabatadze**, I.Paroshina. "Simulation of the Finite Photonic Crystals and HF Circuits Based on Complex Materials." Proceedings of the 2004 IEEE nternational Antenas and Propagation Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting, June 20-26,2004, Monterey,California.AP/URSI B Session: 78.p.141
- [17]Kupradze V. About approximates solution of mathematical physics problem. Success of Mathematical Sciences, Moscow. 22. N2 1967, 59-107.
- [18]Kupradze V. Dynamical Problems in Elasticity, Progress in Solid Mechanics 3, Amsterdam, 1963.
- [19]Kupradze V. Method of integral equations in the theory of diffraction. 1935. Moscow-Leningrad.
- [20]Millar R. F. Proc. Cambr, Phil. Soc. 1969, v.65, p.773.
- [21]Millar R. F. Electron. Letters 1969. v.5p.416.
- [22]Millar R. F. Radio Science. 1973 v.8. N8.9 pp.785-796.
- [23]Mittra R, Wilton K. 1969. Proc. IEEE, 57(11), 2064-2065. Eremin Yu. A. Lebedev O.A. Sveshnikov A.G. 1988. Radioeng. and Electr. Acad. of Scie USSR. Nauka, v.33, N10, 2076-2083.
- [24]Okuno Y. (1994) A duality Relationship between Scattering Field and current density calculation in the Yasuura Method. MMET, URSI, Kharkov, Ukraine pp. 278-281.
- [25]**V. Tabatadze**, D. Kakulia, G. Ghvedashvili, G. Sapparishvili, R. Zaridze. "Application of Equivalent Currents and Charges Conception for Visualization of the Body's Front-Face Area Based on Total Field's Reconstruction". Proceedings of the 11th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET-2006). June 26-29, 2006. Kharkiv, Ukraine. pp. 520-522.
- [26]R. Zaridze, D. Kakulia, G. Ghvedashvili, G. Sapparishvili, **V. Tabatadze**, A. Bijamov Jr. "Numerical Simulation for Experimental Surface Recognition Based on Reflected Field Reconstruction". Proceedings of MEDITERRANEAN MICROWAVE SYMPOSIUM 2006, September 19-21, 2006, Genova, Italy.

- pp. 204-206.
- [27] **V. Tabatadze**, D. Kakulia, G. Ghvedashvili, G. Sapparishvili, R. Zaridze. Visualization of the body's front-face area based on total field's reconstruction. Proceedings of XI-th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED-2006), October 11-13, 2006, Tbilisi, Georgia. pp. 185-188.
- [28] R. Zaridze, **V. Tabatadze**, D. Kakulia, G. Ghvedashvili, G. Sapparishvili "Acceleration of Total Field's Reconstruction for Visualization of Scatterer Surface". Proceedings of the European Conference on Antennas & Propagation (EuCAP 2006), November 6-10, 2006, Nice, France.
- [29] A. Bijamov, D. Kakulia, G. Sapparishvili, **V. Tabatadze**, K. Tavzarashvili, R. Zaridze, Ch. Hafner, D. Erni "Simulation and investigation of 2D and 3D photonic devices" JAE (Journal of Applied Electromagnetism). ISSN 1109-1606, June 2007, Athens, Greece
- [30] M. Prishvin, G. Sapparishvili, **V. Tabatadze**, R. Zaridze Reconstruction of underground structure using seismic event data. Proceedings of XII-th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED-2007), Lviv, September 17-20, 2007, pp. 130-133.
- [31] **V. Tabatadze**, M. Prishvin, G. Sapparishvili, D. Kakulia, R. Zaridze "Soil's characteristics study and buried objects visualization using remote sensing". Proceedings of XII -th International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED-2007), Lviv, September 17-20, 2007, pp. 134-138.
- [32] R. Zaridze, G. Bit-Babik, K. Tavzarashvili, N. Uzunoglu, D. Economou, "Wave Field Singularity Aspects Large-Size Scatterer and Inverse Problems." IEEE Transactions on AP, vol.50, No. 1, January 2002, p.50-58.
- [33] **V. Tabatadze**, A. Bijamov Jr, D. Kakulia, G. Sapparishvili, R. zaridze, CH. Hafner, D. Erni, " Design and Analysis of Planar Photonic Band Gap Devices" Int J Infrared Milli Waves DOI 10.1007/s10762-008-9413-2