

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი



ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი
ექტრული და ლექტრონული იჟინერია

თორნიკე ჭაბუკიანი

ოპტიმალური ანტენის კომპიუტერული მოდელირება

სამაგისტრო ნაშრომი

ხელმძღვანელი: რ. ზარიძე

ფიზ. მათ. მეცნიერებათა დოქტორი, ემერიტუს პროფესორი

თბილისი 2016 წელი

ანოტაცია

ანტენის შექმნა, რომელსაც ექნება სასურველი დიაგრამა მოცემული ამპლიტუდებით და ფაზური განაწილებით უსასრულობაში, საზოგადოდ, პრობლემას წარმოადგენს და დღესაც აქტიური კვლევის საგანია. თანამედროვე საკომუნიკაციო საშუალებები აქტიურად გამოიყენებენ ინფორმაციის უკაბელოდ გადაცემის სხვადასხვა ხერხებს, რაც წარმოუდგენელია შესაბამისი მიმღები და გადამცემი ანტენების გარეშე. რამდენადაც დიდია საკომუნიკაციო საშუალებების რაოდენობა და სახეობა, იმდენად დიდია მოთხოვნა სხვადასხვა ტიპის ანტენებზე, რომლებსაც ექნებათ კარგი მახასიათებელი პარამეტრები, სხვადასხვა სიხშირულ არეში. ცნობილია, რომ ერთი და იგივე გამოსხივების დიაგრამა შეიძლება მოგვცეს სხვადასხვა ანტენამ ან ანტენათა სისტემამ, რომელთაც შეესაბამება განსხვავებული განაწილებული დენების აპლიტუდები, ფაზები და მდებარეობა სივრცეში, მაგრამ საინტერესოა, ვიპოვოთ ოპტიმალური ვარიანტი მათი განაწილებისა. ოპტიმალური ვარიანტი ნიშნავს, რომ გამომსხივებელს ექნება მინიმალური რეაქტიული ველი, სასურველი გამოსხივების მიმართულება და შესაბამისად, მოიხმარს მინიმალურ სიმძლავრეს. აგრეთვე ცნობილია, რომ ამ ამოცანის გადაჭრის მცდელობა ხორციელდება ჯერ კიდევ გასულ საუკუნეში სხვადასხვა მეთოდით. აღნიშნული პრობლემის საფუძვლიანი მიმოხილვა თანამედროვე მეთოდოლოგიებისა მოყვანილია მრავალ ნაშრომსა თუ პუბლიკაციაში, მაგრამ ამ ნაშრომში შემოთავაზებულია ანტენის სინთეზის ამოცანის გადაჭრის ახალი იდეა, რომლის თანახმადაც ელექტრომაქნიტური ველი ანალიზურია და არსებობს მისი ერთადერთი ანალიზური გაგრძელება ამ ველის სინგულარობებამდე. სწორედ ამ სინგულარობების(განსაკუთრებულობების) განაწილება განსაზღვრავს ოპტიმალურ ანტენას სასურველი დიაგრამის მისაღებად. აღნიშნული იდეის კვლევაში აქტიურადაა შესაძლებელი კომპიუტერული მოდელირების გამოყენება, რომელშიც გამოიყენება დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი (დგმ).ეს მეთოდი ითვალისწინებს ზემოაღნიშნულ იდეას ველის ანალიზურობის და მისი ანალიზური გაგრძელების შესახებ. დგმ მეთოდის გამოყენებით შესაძლებელია დაბალი რესურსების მქონე გამომთვლელი მანქანების საშუალებით ამოიხსნას დასმული ამოცანა. ვინაიდან, დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი წარმოადგენს რიხცვით მეთოდს, ამიტომ შესაძლებელია იგი გამოყენებული იქნას კომპიუტერული პროგრამის მუშაობაში, როგორც მთავარი მათემატიკური აპარატი.

სამაგისტრო ნაშრომში განხილულია გაზნეული ველის სინგულარობები, შესაბამისი გამოსხივების დიაგრამა ორ და სამგანზომილებიან შემთხვევაში. აქვეა მოყვანილი შესაბამისი მათემატიკური აპარატი, განხილულია დგმ მეთოდი და მისი გამოყენების უპირატესობა. აღწერილია პროგრამის მუშაობის ალგორითმი, მოდელირების შედეგის ვიზუალიზაცია ორ და სამგანზომილებიან შემთხვევაში, ასევე ექსპერიმენტული ნაწილი, სადაც მოცემულია სხვადასხვა გაზომვების შედეგები და მათი შედარება მოდელირების შედეგთან.

Abstract

The synthesis problem of the well matched antenna, with the predefined directivity pattern, is very old and very topical problem in the practical point of view. From other side there is constant need to construct different kinds of antennas. The technicians design the antenna using their intuition and by trial and error method. It was shown, that this optimal distribution is related to the singularities for the field with the assumed pattern and is uniquely determined by the distribution of these singularities - active sources position.

The Method of Auxiliary Sources (MAS) is efficiently used in the synthesis problem of antenna with the given far field pattern, by means of the radiated field's fundamental singularities determination. As it is known, the same directivity pattern, at the given frequency, could be obtained with the different current distribution on different antenna surface. The problem is reduced to the finding of the more or less optimal current distribution, which is unique. This means the minimal values of the: currents, reactive near field values and also the best matching between antenna and radiation. In the given work is confirmed that the optimal currents' distribution is related to the fundamental singularities of the radiated field.

Main purpose of Master work is to present the source localization methodology along with simulation and measurement results. Proposed methodology is used for directive antenna syntheses to realize desired pattern with minimal side lobes and reactive field and also could be used efficiently to far-field prediction. There is also shown various measurement results and their comparison with modelling results.

სარჩევი

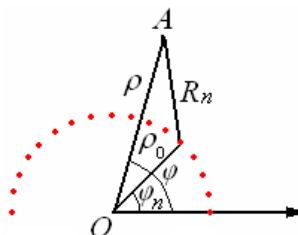
| | |
|---|-----------|
| შესავალი | 5 |
| 1.1. პრობლემის აქტუალობა და კვლევის მიზანი | 5 |
| 1.2. ამოცანის დასმა | 6 |
| თავი I. კვლევის მეთოდოლოგია: დამხმარე გამომსხიველების მეთოდი (დგმ) | 7 |
| 2.1. გაბნეული ველის სინგულარობები და შესაბამისი გამოსხივების დიაგრამა ორგანზომილებიან შემთხვევაში | 7 |
| 2.2. გაბნეული ველის სინგულარობები და შესაბამისი გამოსხივების დიაგრამა სამგანზომილებიან შემთხვევაში | 9 |
| 2.3. მოდელირებისას გამოყენებული კომპიუტერული პროგრამის მუშაობის ალგორითმი და რიცხვითი მოდელირების შედეგები | 10 |
| თავი II. ექსპერიმენტული ნაწილი: შეთანხმების შემოწმება და გამოსხივებული ველის დიაგრამის დეტექტირება | 14 |
| 3.1. S ₁₁ პარამეტრის გაზომვა სიგნალის ანალიზატორზე h/p Agilent 8722ES | 14 |
| 3.2. ანტენის გამოსხივების დიაგრამის გამზომი სისტემა | 15 |
| 3.3. სიგნალის გენერატორები და მუდმივი დენის დეტექტორი | 16 |
| 3.3. ATmega 2560 და ბიჯური ძრავის მართვა | 19 |
| სამაგისტრო ნაშრომის ძირითადი შედეგები და დასკვნები | |
| გამოყენებული ლიტერატურა | |

შესავალი

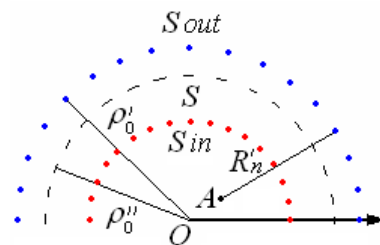
1.1 პრობლემის აქტუალობა და კვლევის მიზანი

ანტენის შექმნა, რომელსაც ექნება სასურველი დიაგრამა მოცემული ამპლიტუდებით და ფაზური განაწილებით უსასრულოებაში, საზოგადოდ, პრობლემას წარმოადგენს და დღესაც აქტიური კვლევის საგანია. ცნობილია, რომ ერთი და იგივე დიაგრამა შეიძლება მოგვცეს სხვადასხვა ანტენათა სისტემამ, რომელთაც შეესაბამება განსხვავებული ანტენაზე განაწილებული დენების აპლიტუდები, ფაზები და მდებარეობა სივრცეში, მაგრამ საინტერესოა, ვიპოვოთ მათი განაწილების ოპტიმალური ვარიანტი. ოპტიმალური ვარიანტი ნიშნავს, რომ გამომსხივებელს ექნება მინიმალური რეაქტიული ველი და შესაბამისად, ანტენაც მოიხმარს მინიმალურ სიმძლავრეს. ცნობილია, რომ ამ ამოცანის გადაჭრის მცდელობა ხორციელდება ჯერ კიდევ გასულ საუკუნეში სხვადასხვა მეთოდით. კვლევის სიახლეს წარმოადგენს ანტენის სინთეზის ამოცანის გადაჭრის ახალი იდეა, რომლის თანახმადაც ელექტრომაგნიტური ველი ანალიზურია და არსებობს მისი ერთადერთი ანალიზური გაგრძელება ამ ველის სინგულარობებამდე. სწორედ ამ სინგულარობების განაწილება განსაზღვრავს ოპტიმალურ გამომსხივებელს სასურველი დიაგრამის მისაღებად. აღნიშნული იდეის შემოწმება ხორციელდება კომპიუტერული მოდელების საშუალებით, რომელშიც აქტიურად გამოიყენება დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი (დგმ).

დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი წარმოადგენს მძლავრ მათემატიკურ აპარატს, რომელიც გამოიყენება ისეთი ელექტრომაგნიტური ამოცანების ამოსახსნელად, სადაც გათვალისწინებული უნდა იქნას ველის წყაროებიც. როგორც ცნობილია ელექტრომაგნიტური ველი ანალიზურია მთელს სივრცეში გარდა იმ არეებისა, სადაც თვითონ ველის წყაროებია განლაგებული. სწორედ ანალიზურობის დარღვევა იწვევს მათემატიკურ განტოლებაში განსაკუთრებულობების გაჩენას, რომელიც ანალიზური ხერხით შეუძლებელს ხდის მის ამოხსნას - ამონახსნი ამწერტილებში უსასრულოაა, ამიტომ საჭიროა გამოვიყენოთ რიცხვითი მეთოდი, რომელიც ამ განსაკუთრებულობებს აუვლის გვერდ. დგმ-ს სარსი მდგომარეობს იმაში, რომ შემოგვაქვს დამხმარე გამომსხივებელი წყაროები და ვთვლით, რომ ველის წყაროები ისინი არიან, ამის შემდეგ კი ვიღებთ შემკრებ წყაროებს და მათი შეკერვის პირობიდან აღვადგენთ რეალური ველის სურათს (ნახ.1, ნახ. 2). მეთოდის სირთულე მდგომარეობს დამხმარე წყაროების სწორად შერჩევაში და მათი რეალურ წყაროებთან დაშორების განსაზღვრაში.



ნახ. 1



ნახ. 2

კვლევის მიზანია შეიქმნას პროგრამული უზრუნველყოფა რომელიც სწრაფად, მარტივად, ეფექტურად და ზუსტად მოგვცემს ოპტიმალური ანტენის პარამეტრებს, რომელიც შეესაბამება ჩვენთვის სასურველ გამოსხივების დიაგრამას. მოგვცემს დამხმარე წყაროების განლაგების ზუსტ კოორდინატებს, ველის დეტალურ სურათს და ანტენაზე დენების განაწილებას.

ამ მიზნის განსახორციელებლად ჩატარდა შესაბამისი ექსპერიმენტული გაზომვები, შედარდა პროგრამით გამოთვლილი და რეალურ ექსპერიმენტზე გაზომილი შედეგები. ამ შედეგების ანალიზით მოხდა შეფასება, თუ რამდენად ზუსტად და ეფექტურად მუშაობს პროგრამა და რამდენად სანდოა იგი. პროგრამის მეშვეობით შესაძლებელია გაცილებით რთული კონსტრუქციის ანტენების მოდელირება, რაც საშუალებას მოგვცემს თავი ავარიდოთ ძვირადღირებულ რეალურ ექსპერიმენტებს მომავალში.

1.2 ამოცანის დასმა

საზოგადოდ ანტენის სინთეზის ამოცანა დაკავშირებულია ანტენის გეომეტრიული პარამეტრების - აპერტურის შერჩევასთან, რომელიც განსაზღვრავს მისი გამოსხივების სიშირულ დიაპაზონს. მნიშვნელოვანია ანტენა კარგად იყოს შთანხმებული, რათა მოხდეს მიწოდებული ენერჯის მაქსიმალურად გამოსხივება სივრცეში. ამ შემთხვევაში მინიმალური უნდა იყოს წარმოქმნილი რეაქტიული ველი და ბოლოს მისი გამოსხივების დიაგრამა უნდა იყოს რაც შეილება ვიწრო და შესაბამისად მიმართული. როგორც უკვე აღინიშნა ამ ამოცანის გადაჭრის სხვადასხვა ხერხი არსებობს, მაგრამ ისინი უნივერსალური არაა და ეს პრობლემა დღესდღეობით გადაჭრილი არ არის. ამიტომ მოცემულ სამაგისტრო ნაშრომში განვიხილავ ამოცანის გადაჭრის სრულიად ახალ მიდგომას, რომელიც დაფუძნებულია დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდის გამოყენებაზე.

დგმ-ს გამოყენებით შესაძლებელია ამოიხსნას როგორც ორგანოზომილებიანი, ასევე სამგანზომილებიანი ამოცანა. ნაშრომში განხილული იქნება ორივე შემთხვევა, რაც გვაძლევს საშუალებას მივიღოთ ანტენაზე წყაროების ოპტიმალური განაწილება, რომელიც შეესაბამება ჩვენთვის სასურველ გამოსხივების დიაგრამას. ასევე ნაჩვენები იქნება, რომ ველი ანალიზურობის თვისება გვაძლევს საშუალებას ვიპოვოთ შესაბამისი სინგულარობები, ხოლო დგმ-ს გამოყენებით შეგვიძლია ვიპოვოთ ამ განაწილებათა შორის საუკეთესო.

მოდელირება და ექსპერიმენტული გაზომვები ჩატარდა 100Mhz-1Ghz დიაპაზონში და შედეგებიც ესაბამისად ამ სიხშირულ არეში იქნა მიღებული. სიხშირული დიაპაზონის ცვლილება გამოიწვევს მხოლოდ ანტენის აპერტურის (ზომების) პროპორციულ ცვლილებას, ამიტომ მიღებული შედეგები სეგვიძლია სამართლიანად ჩავთვალოთ სხვა სიხშირული დიაპაზონებისთვისაც.

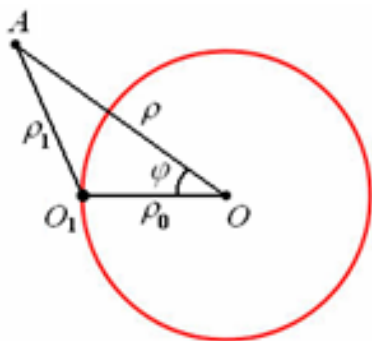
თავი I. კვლევის მეთოდოლოგია: დამხმარე გამომსხივებლების მეთოდი (დგმ)

2.1 გაზნული ველის სინგულარობები და შესაბამისი გამოსხივების დიაგრამა ორგანზომილებიან შემთხვევაში

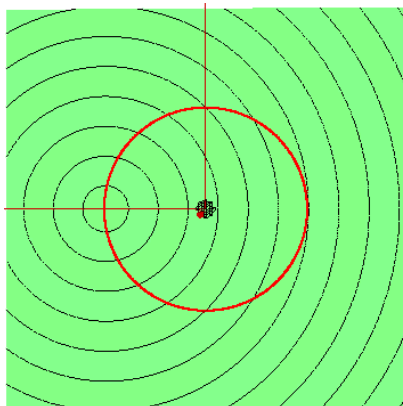
ორგანზომილებიან შემთხვევაში ველის წყაროებს წარმოადგენს ჰანკელის ფუნქციები, რომელთაც სინგულარობა გააჩნიათ სათავეში. განიხილება ჰარმონიული ველის შემთხვევა, როცა დროზე დამოკიდებულება არის $\exp(i\omega t)$ სახის. თუ მოცემულ O წერტილში ავიღებთ უსასრულო ჯამს ასეთი ტიპის გამომსხივებლების, მაშინ მივიღებთ ველს, რომელიც ისე ფორმირდება, თითქოს იგი O_1 წერტილიდან სხივდება (ნახ. 3). მათემატიკურად ეს ასე ჩაიწერება. ეს განტოლებები წარმოადგენენ შეკრების თეორემის მათემატიკურ გამოსახვას, ფიზიკურად კი ეს ნიშნავს, რომ ველი სივრცის ნებისმიერ წერტილში შეთანხმებულია:

$$H_0^{(2)}(k\rho_1) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} J_m(k\rho_0) H_m^{(2)}(k\rho) \exp(-im\varphi), \quad \rho > \rho_0,$$

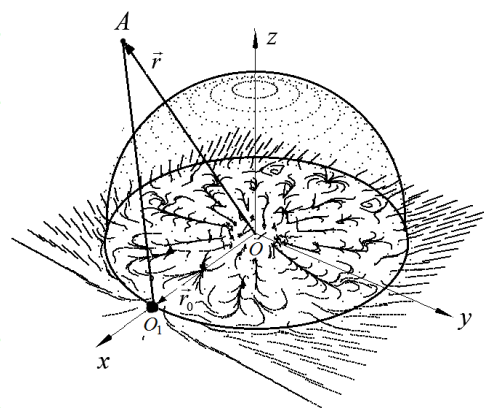
$$H_0^{(2)}(k\rho_1) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} H_m^{(2)}(k\rho_0) J_m(k\rho) \exp(-im\varphi), \quad \rho < \rho_0.$$



ნახ. 3



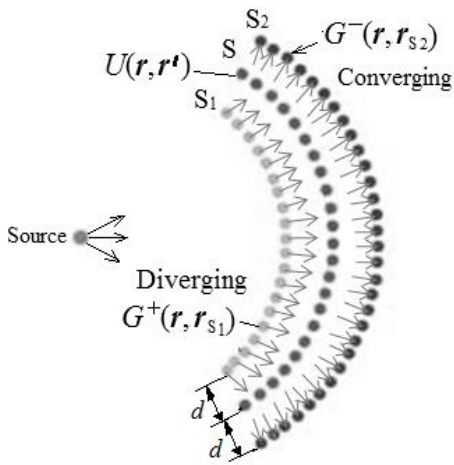
ნახ. 4



ნახ. 5

მეტი თვალსაჩინოებისთვის მოყვანილია კომპიუტერული სიმულაციის შედეგი, რომელზეც (ნახ. 4) წარმოდგენილია წრეწირის ცენტრში წყაროთა ერთობლიობა. ისინი ქმნიან ისეთ ველს თითქოს გამომსხივებელი მდებარეობს წრეწირზე. შემდეგ სურათზე (ნახ. 5) კი ნაჩვენებია გამომსხივებელთა სისტემის რეაქტიული ველი, რომელიც გრიგალური ხასიათისაა. სწორედ ამ რეაქტიული ველის სიდიდე განსაზღვრავს ანტენის თუ ანტენათა სისტემის ოპტიმალურობას. რაც უფრო მცირეა მოცემული ველის სიდიდე, მითუფრო კარგადაა შეთანხმებული სისტემა და შესაბამისად მითუფრო კარგი მახასიათებლები გააჩნია ანტენას.

დამხმარე გამომსხივებლები ორგანზომილებიან შემთხვევაში ნაწილდება წრეწირზე, რომელიც მოიცავს ველის წყაროს (ნახ. 6). გარდა გამომსხივებელი წყაროებისა, ასევე საჭიროა შემკრები წყაროების შემოღებაც რომელთა შეკერვის პირობიდან ვიპოვიტ საძიებელ სიდიდეებს.



ნახ. 6

მეტი სიცხადისთვის განვიხილოთ მაგალითი, სადაც დამკვირვებელი A წერტილიდან აკვირდება მოცემულ ველს (ნახ. 5). რადგან ველი სივრცეში ყველა მიმართულებით ანალიზურია გარდა O_1 წერტილისა, ამიტომ ის დაინახავს მხოლოდ ერთ მანათობელ წერტილს. სინამდვილეში კი მოცემული ველის წყარობი მოქცეულია O_1 რადიუსის მქონე წრის შიგნით, რომელთა ამპლიტუდების და ფაზების განაწილება ქმნის ილუზიას, თითქოს გამომსხივებელი ერთ წერტილშია და ეს წერტილია - O_1 . ამ მაგალითიდან ცხადად ჩანს, რომ ერთიდაიგივე ველის მნიშვნელობები შეიძლება მივიღოთ წყაროების სხვადასხვაგვარი განაწილების შედეგად.

მათემატიკურად ეს ყველაფერი შეგვიძლია გამოვსახოთ

ასე:

$$h_0^{(1)}(k|\vec{r} - \vec{r}_0|) = (ik|\vec{r} - \vec{r}_0|)^{-1} \exp(ik|\vec{r} - \vec{r}_0|)$$

$$h_0^{(1)}(k|\vec{r} - \vec{r}_0|) = \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) P_n(\cos \varphi) j_n(kr) h_n^{(1)}(kr_0) \quad r < r_0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) P_n(\cos \varphi) j_n(kr_0) h_n^{(1)}(kr)$$

აქ $P_n(\cos \varphi)$ წარმოადგენს ლეჟანდრის პოლინომს, $h_0^{(1)}(k|\vec{r} - \vec{r}_0|)$ არის O_1 მოთავსებული წყარო, ხოლო $h_n^{(1)}(kr)$ კი O წერტილში მოთავსებული გამომსხივებელი.

2.2. გაბნეული ველის სინგულარობები და შესაბამისი გამოსხივების დიაგრამა სამგანზომილებიან შემთხვევაში

სამგანზომილებიან შემთხვევაში გამოიყენება ეგრედწოდებული კომბინირებული გამომსხივებლები. დამხმარე ზედაპირს წარმოადგენს სფერო (ნახ. 7). ამ დროს გარდა ამპლიტუდების და ფაზების ცოდნისა, ასევე საჭიროა პოლარიზაციის ვექტორების განსაზღვრა. დროზე დამოკიდებულება აქაც ანალოგიურია - $\exp(i\omega t)$.

თუ $f^\varphi(\varphi, \vartheta)$, $f^\vartheta(\varphi, \vartheta)$ - ცნობილი დიაგრამაა, მაშინ უცნობი ველი იძებნება დამხმარე წყაროების ველების ჯამის სახით S_2 ზედაპირზე (ნახ. 8)

$$\vec{E}(\vec{r}) = \sum_{m,n} \left[a_{mn} \vec{E}_{comb(+)}^\varphi(\vec{R}_{mn}) + b_{mn} \vec{E}_{comb(+)}^\vartheta(\vec{R}_{mn}) \right], \quad r > r_0,$$

რომლისთვისაც მოითხოვება მოცემული დიაგრამასთან დამთხვევა შორ ზონაში:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} (\vec{E}(\vec{r}) \cdot \vec{\varphi}_0) = f^\varphi(\varphi, \vartheta), \quad \lim_{r \rightarrow \infty} (\vec{E}(\vec{r}) \cdot \vec{\vartheta}_0) = f^\vartheta(\varphi, \vartheta).$$

ვლელობით წრფივ ალგებრულ განტოლებათა სისტემას დამხმარე წყაროების უცნობი ამპლიტუდების მიმართ.

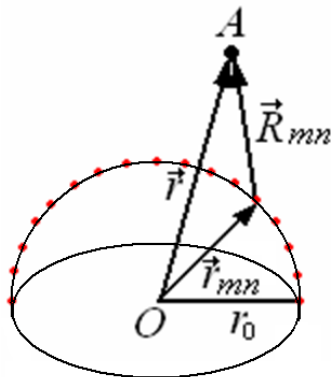
$$\begin{cases} \sum_{m,n} \lim_{r \rightarrow \infty} \left[a_{mn} \vec{E}_{comb(+)}^\varphi(\vec{R}_{mn}) + b_{mn} \vec{E}_{comb(+)}^\vartheta(\vec{R}_{mn}) \right] \cdot \vec{\varphi}_0 = f^\varphi(\varphi, \vartheta) \\ \sum_{m,n} \lim_{r \rightarrow \infty} \left[a_{mn} \vec{E}_{comb(+)}^\varphi(\vec{R}_{mn}) + b_{mn} \vec{E}_{comb(+)}^\vartheta(\vec{R}_{mn}) \right] \cdot \vec{\vartheta}_0 = f^\vartheta(\varphi, \vartheta) \end{cases}$$

შემდეგი ნაბიჯია ახლო ველის განსაზღვრა დამხმარე ზედაპირის შიგნით მის სინგულარობებამდე. ამისათვის იგება გარე დამხმარე ზედაპირი S_1 .

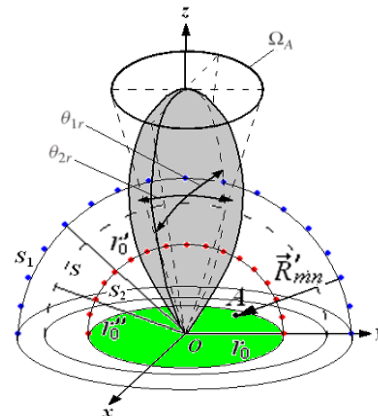
$$\vec{E}'(\vec{r}) = \sum_{m,n} \left[c_{mn} \vec{E}_{comb(-)}^\varphi(\vec{R}'_{mn}) + d_{mn} \vec{E}_{comb(-)}^\vartheta(\vec{R}'_{mn}) \right], \quad r < r_0.$$

აქ უცნობი ამპლიტუდების საპოვნელად მოითხოვება $\vec{E}(\vec{r})$ და $\vec{E}'(\vec{r})$ ველების ტოლობა შუამდებარე S ზედაპირზე:

$$\vec{E}'(\vec{r})|_S = \vec{E}(\vec{r})|_S.$$



ნახ. 7

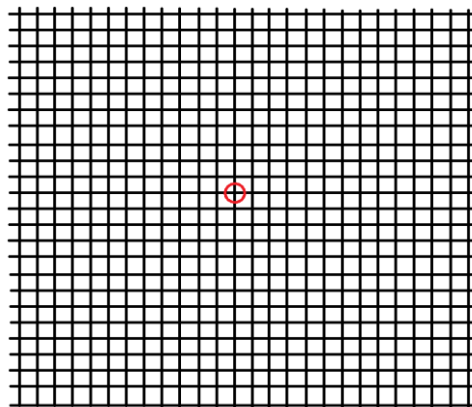


ნახ. 8

საბოლოოდ, აუცილებელია გამოვიკვლიოთ არეები, სადაც მიღებულ ველს გააჩნია მაქსიმუმები. ეს მაქსიმუმები შეესაბამება საძიებელი ველის სინგულარობებს. ამის შემდეგ ჩვენ უნდა გავანაწილოთ კომბინირებული გამომსხივებლები, ანდა შესაბამისი დენის წყაროები მოცემულ მაქსიმუმის წერტილებში და მოვითხოვოთ შემდეგი სასაზღვრო პირობის დაცვა: შორი ველის დიაგრამა, რომელსაც მოცემული წყაროები ქმნიან უნდა დაემთხვას მოცემულ, საწყის დიაგრამას. როცა წყაროების რაოდენობა მცირეა, ვიდრე შორი ველის შესაბამისი დიაგრამის წერტილები, მაშინ ჩვენ ვხსნით შესაბამის მატრიცას, რომელიც წარმოადგენს წრფივი განტოლებების სისტემას, რომლის ამოხსნის შემდეგაც ჩვენ ვიღებთ მოცემული წყაროების შესაბამის უცნობი ამპლიტუდებისა და ფაზების მნიშვნელობებს, რაც წარმოადგენს კიდევ ამოცანის ამოხსნას. ამ ყოველივეს კოპიუტერულად დამუშავება შესაძლებელია და თან ძალიან სწრაფად.

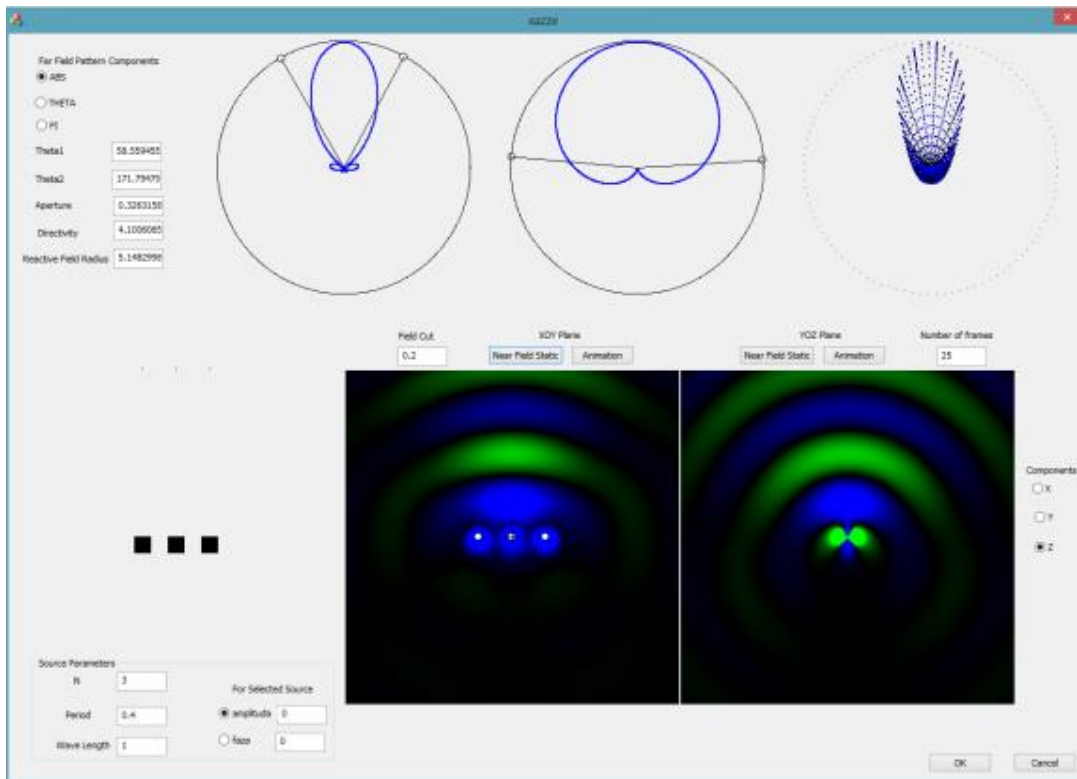
2.3. მოდელირებისას გამოყენებული კომპიუტერული პროგრამის მუშაობის ალგორითმი და რიცხვითი მოდელირების შედეგები

გადავიდეთ პროგრამის მუშაობის ალგორითმის განხილვაზე. იგი საკმაოდ მარტივია. საკვლევი არე იყოფა გარკვეული ბიჯის მქონე ბადით, რომლის ყოველ წერტილში ვიღებთ გარკვეული რადიუსის წრეწირს და ვეძებთ მის შიგნით მაქსიმუმის წერტილს (ნახ. 9). შემდეგ იგივეს ვაკეთებთ დანარჩენ ბადის წერტილებზე. თუ მოცემული წრის შიგნით მაქსიმუმის წერტილი აღმოჩნდება ერთზე მეტი, მაშინ შესაბამისად ვამცირებთ ბიჯს და წრის რადიუსს, სანამ არ დაგვრჩება მხოლოდ ერთი მაქსიმუმის წერტილი, რაც შესაბამისად იწვევს გამოთვლის დროის გახანგრძლივებას, ამიტომაც საჭიროა სწორად იქნას შერჩეული დამხმარე გამომსხივებლების მდებარეობა, რაც უზრუნველყოფს პროგრამის მუშაობის დაჩქარებას.



ნახ. 9

იმისათვის, რომ მივიღოთ სასურველი შედეგი, გამოთვლები უნდა ჩატარდეს რამდენიმე ეტაპად. პირველ რიგში უნდა ამოიხსნას პირდაპირი ამოცანა. ამ ნაწილის შესასრულებლად პროგრამა დაიწერა C++ ენაზე, რომელიც ჩაშენებულია მთლიან პროგრამულ პაკეტში. ამ შემთხვევაში ჩვენ შეგვიძლია სურვილისამებრ გავანაწილოთ კომბინირებული გამომსხივებლები (დიპოლები), ვაკონტროლოთ მათი რაოდენობა, მივცეთ მათ სასურველი ამპლიტუდები, ფაზები, ტალღის სიგრძე და პერიოდი. წყაროების მდებარეობა შეგვიძლია ვცვალოთ მაუსის საშუალებით და თითოეულ პარამეტრს მივანიჭოთ მნიშვნელობა შესაბამის ველში. საბოლოოდ პროგრამა ითვლის ორ და სამგანზომილებიან დიაგრამას და ახლო ველის მნიშვნელობებს, რომელიც შეესაბამება ჩვენს მიერ დასმულ ამოცანას.

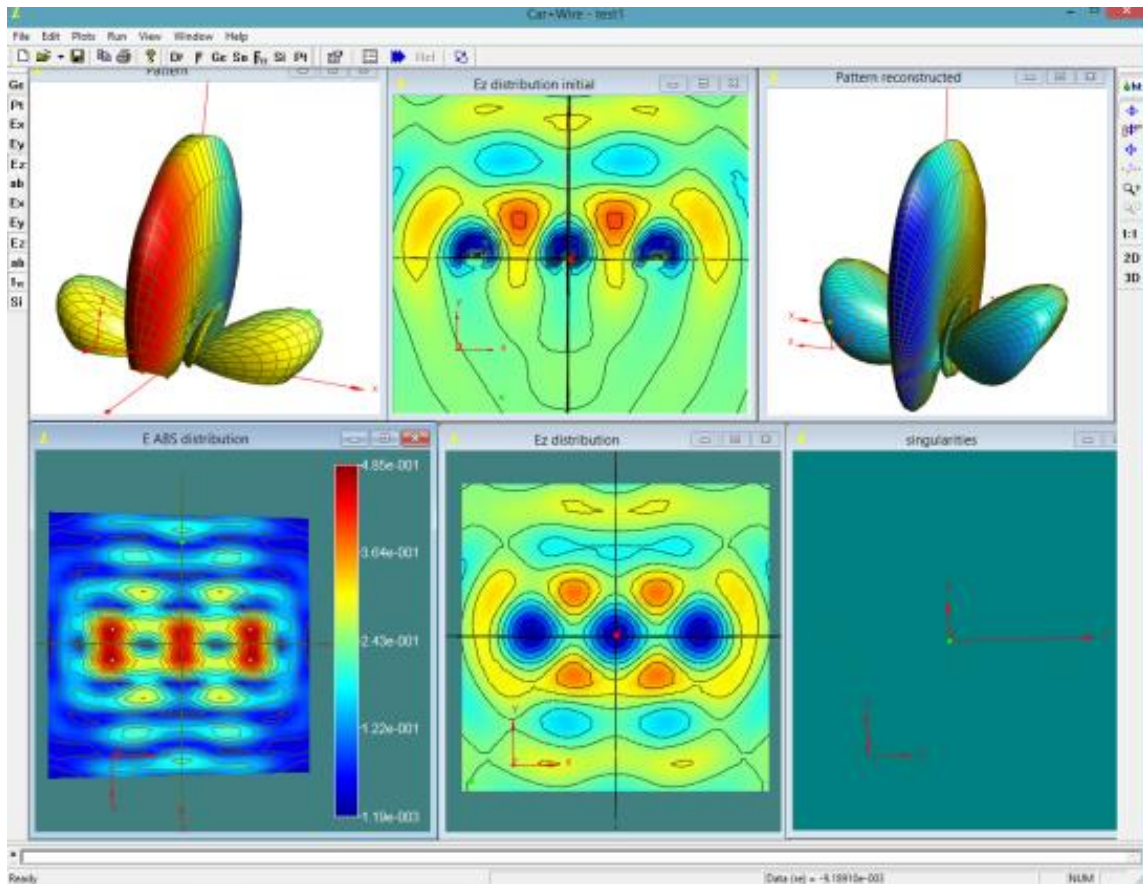


ნახ. 10 C++ პროგრამის ინტერფეისი

გამოთვლილ დიაგრამაზე საკონტროლო წერტილების გამოყენებით შესაძლებელია შევავსოთ შესაბამისი ანტენის საშუალო პარამეტრები: Ω_A , \mathcal{G}_{1r} , \mathcal{G}_{2r} , გამოსხივების კუთხეები. აქედან გამომდინარე ჩვენ შეგვიძლია დავთვალოთ გამოსხივების მიმართულება, რეაქტიული ველის რადიუსი და ანტენის აპერტურა :

$$D_0 \approx 4\pi/(\mathcal{G}_{1r}\mathcal{G}_{2r}), R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}, A_{em} = \lambda^2 D_0/(4\pi).$$

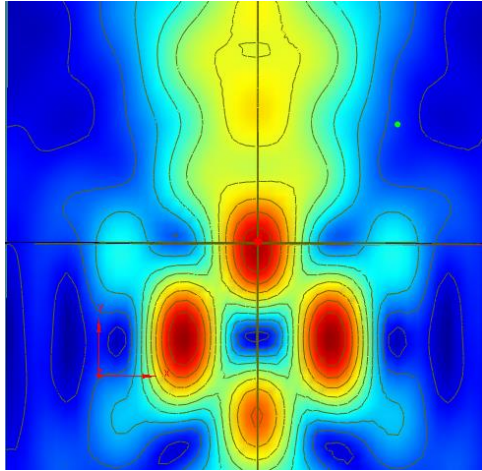
შემდეგი ნაბიჯი არის შებრუნებული ამოცანის ამოხსნა. საზოგადოდ, წყაროთა განაწილება და შესაბამისი პარამეტრები, რომლებითაც მიღებული იქნა დიაგრამა, შეიძლება არ იყოს ოპტიმალური. ჩვენ შეგვიძლია მიღებული დიაგრამის აპლიტუდები და ფაზები გამოვიყენოთ, რათა ვიპოვოთ შესაბამისი წყაროების განაწილება და პარამეტრები შებრუნებული ამოცანის ამოხსნის გზით. ამ გზით ნაპოვნი სინგულარობები უკვე იქნება ოპტიმალური და ის საზოგადოდ არ ემთხვევა საწყისი გამომსხივებელი წყაროების განლაგებას.



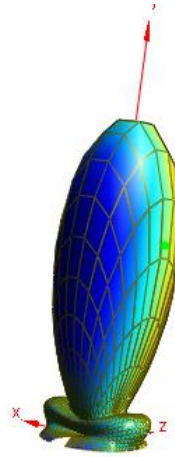
ნახ. 11 მთლიანი პროგრამის ინტერფეისი

იმის დასადგენად, თუ თუ რამდენად კარგად მუშაობს მოცემული ალგორითმი, ამოიხსნა სფეროზე დიფრაქციის ამოცანა. ამოცანის არსი მდგომარეობს შემდეგში: ვიღებთ ბრტყელი ტალღის გამომსხივებელს, რომლის გამოსხივებული ველი ეცემა სფეროს ზედაპირზე. ეს ველი სფეროს ზედაპირზე აღძრავს დენს, რომელიც არის უკვე გადასხივებული ველის წყარო, რომელსაც შეესაბამება შორი ველის დიაგრამა შესაბამისი ფაზებით და ამპლიტუდებით. სწორედ ამ დიაგრამის საწყისი პარამეტრები იქნა გამოყენებული ალგორითმის შესამოწმებლად. მიღებული დიაგრამიდან, მოცემული ალგორითმის გამოყენებით მოხდა შესაბამისი სინგულარობების პოვნა განსაზღვრული

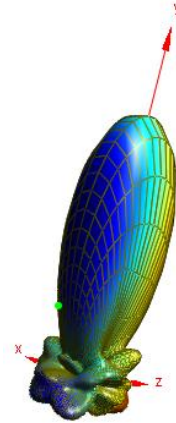
ფაზებით და ამპლიტუდებით და შემდეგ ამ სინგულარობებიდან შესაძლებელი გახდება შორი ველის დიაგრამის აღდგენა, რაც ნაჩვენებია ნახ. 12-ზე.



ა) წყაროების განაწილება



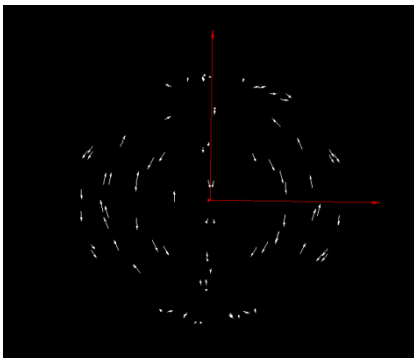
ბ) საწყისი დიაგრამა



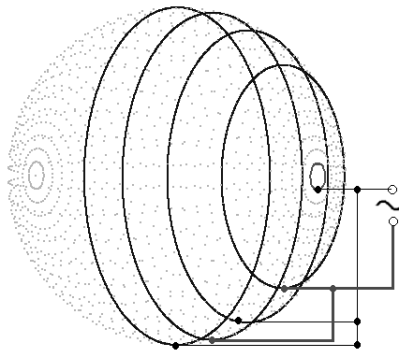
გ) აღდგენილი დიაგრამა

ნახ. 12 სფეროზე დიფრაქციისას მიღებული შედეგი

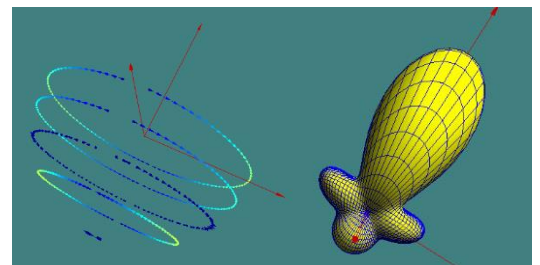
აღმოჩნდა, რომ აღდგენილი ველის დიაგრამა შეიძლება შეიქმნას დენების გარკვეულ წირზე განაწილებით და ეს წირი წარმოადგენს სფერული ზედაპირის ნაწილს და ეს წირები ერთმანეთისგან სფეროს რადიუსის მეოთხედითაა დაშორებული. ეს ნათლად ჩანს ნახ. 13 ა)-ზე.



ა) დენების განაწილება



ბ) წრიული რგოლები სფეროზე



გ) დენების განაწილება წრიულ რგოლებზე და შესაბამისი დიაგრამა

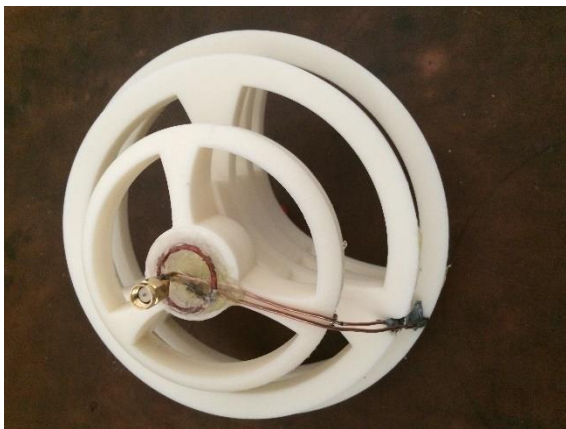
ნახ. 13

შესაბამისად შეიქმნა წრიული რგოლების მოდელი (ნახ.13 ბ), სადაც უნდა აღიძრას გამოთვლების შედეგად მიღებული დენის განაწილება, შესაბამისი ამპლიტუდებით და ფაზებით, რის შედეგადაც მიღებულ იქნა მიმართული დიაგრამა (ნახ.13 გ). საინტერესოა ის ფაქტი, რომ ამ გზით მიღებული დიაგრამა კარგად ემთხვევა სფეროზე დიფრაქციის შედეგად მიღებულ დიაგრამას, რაც აღნიშნული მეთოდის სისწორეზე მიუთითებს. ზოგადად მოცმულ მეთოდოლოგიას შეუძლია სხვადასხვა დიაგრამის შესაბამისი ოპტიმალური გამომსახველების პოვნა, ზუსტად სწრაფად და იაფად.

თავი II. ექსპერიმენტული ნაწილი: შეთანხმების შემოწმება და გამოსხივებული ველის დიაგრამის დეტექტირება

3.1 S₁₁ პარამეტრის გაზომვა სიგნალის ანალიზატორზე h/p Agilent 8722ES

მიღებული საინტერესო შედეგის შემდეგ საკითხი დაისვა მისი რეალურონის შესახებ, ანუ რამდენად შესაძლებელია, რომ შეიქმნას რეალური ანტენა მოცემული მოდელის მიხედვით და ექნება თუარა მას კარგი შეთანხმება, რაც გულისხმობს მინიმალური რეაქტიული ველის არსებობას და რამდენად მიმართული იქნება ასეთი ანტენის გამოსხივების დიაგრამა. ამ მიზნით დამზადდა ანტენის რეალური მოდელი, რომელიც წარმოადგენს სამგანზომილებიან პრინტერზე ABS მატერიალისგან ($\epsilon \approx 2-3$ მ/ფ) დამზადებულ წრიულ რგოლებს. ეს რგოლები იმეორებს სფერულ ზედაპირს. რგოლების დიამეტრებია: 188, 187, 160, 105 და 22 მმ. მათ შორის არსებული დაშორება შეადგენს 24 მმ. მოცემული სფეროს რადიუსი არის 94 მილიმეტრი (უდიდესი რგოლის რადიუსი). ამის შემდეგ მოცემულ რგოლებზე დამაგრდა სპილენძის მავთულები დიამეტრით 1,5 მმ, რომელში კვების მიწოდების შედეგად აღიძვრება დენები.



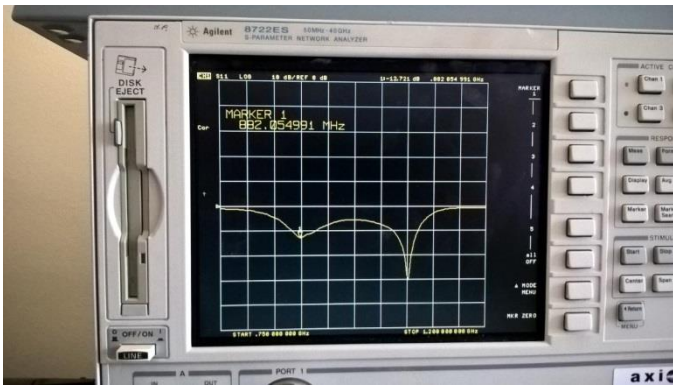
ა) ზედხედი



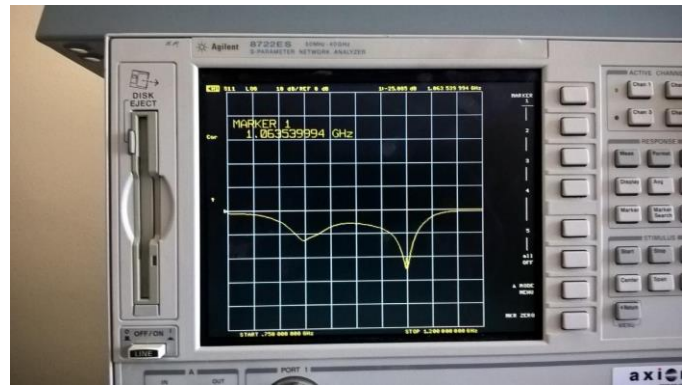
ბ) გვერდხედი

ნახ. 14 რეალური ანტენია

მოცემული ანტენის შეთანხმების შესამოწმებლად თავისუფალ გარემოსთან. ჩატარდა S₁₁ პარამეტრების გაზომვა სიგნალის ანალიზატორზე h/p Agilent 8722ES. სიხშირული დიაპაზონი, რომელშიდაც მიმდინარეობდა გაზომვა არის 750Mhz-1,2Ghz. გაზომვებმა აჩვენა, რომ ანტენა კარგადაა შეთანხმებული გარემოსთან 1Ghz სიხშირის მახლობლობაში, რაც ძალიან კარგ შედეგს წარმოადგენს. გაზომვის შედეგი ასახულია ნახ. 15 ა და ბ-ზე.



ა)



ბ)

ნახ. 15 S₁₁ პარამეტრების გაზომვის შედეგი სიგნალის ანალიზატორ h/p Agilent 8722ES-ზე

3.2. ანტენის გამოსხივების დიაგრამის გამოზომის სისტემა

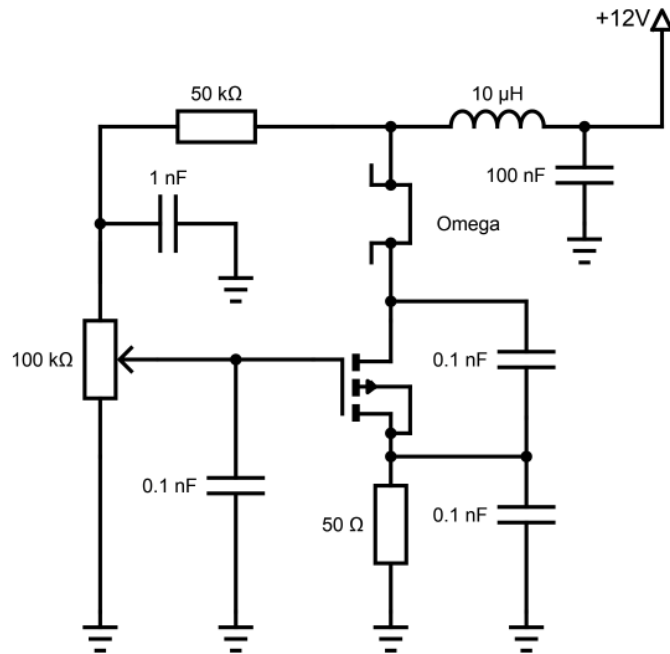
ვინაიდან ექსპერიმენტულად დადასტურდა რეალური ანტენის კარგი შეთანხმება გარემოსთან, უკვე ჯერი მიდგა გამოსხივების დიაგრამის გაზომვაზე, რაც გულისხმობს დიაგრამის რეალურ დროში გადაღებას და დაკვირვებას, თი რამდენად მიმართულია მოცემულია ანტენის გამოსხივება. ამ მიზნით საჭიროა შეიქმნას სხვადასხვა დიაპაზონის სიხშირის გენერატორი, რომელიც საშუალებას მოგვცემს ექსპერიმენტი ჩატარდეს სიხშირეთა ფართო დიაპაზონისთვის, ამიტომ შესაძლებელი გახდება სხვადასხვა აპერტურის ანტენებზე ჩატარდეს ექსპერიმენტები. ასევე მნიშვნელოვანია შეიქმნას გამოსხივებული ველის დეტექტორი, რომელიც წარმოადგენს მუდმივი დენის გამაძლიერებელს. ამ დენს დეტექტორის ანტენაზე აღძრავს ანტენის მიერ გამოსხივებული ველი. შესაბამისად დეტექტორი მოგვცემს სხვადასხვა დენის ამპლიტუდებს, რომელიც შესაბამისობაშია ველის ინტენსივობასთან. გარდა ამისა საჭიროა შეიქმნას სისტემა, რომელიც საშუალებას მოგვცემს მოვახდინოთ გასაზომი ანტენის სასურველი კუთხით მობრუნება და ამავდროილად მის მიერ გამოსხივებული ველის შესაბამისი დენის მნიშვნელობების ჩაწერა, რომელიც მოგვცემს დიაგრამის გამოსახულებას. ამ მიზნით შირჩა ბიჯური ძრავა, რომელიც უზრუნველყოფს სასურველი სიზუსტით ანტენის ბრუნვას. ანტენის სამართავად და მონაცემების ჩასაწერად გამოყენებულია AVR არქიტექტურის მქონე მიკროკონტროლერი Atmega 2560, რომელიც საშუალებას გვაძლევს მოვახდინოთ სისტემის ავტომატიზაცია პროგრამული

უზრუნველყოფის საშუალებით, ამასთან შევძლოთ მიღებული სიგნალების ჩაწრა ტექსტური ფაილის სახით და ეს ყველაფერი დავაკავშიროთ კომპიუტერთან. ეს ყოველივე საშუალებას იძლევა მოვახდინოთ ექსპერიმენტული შედეგების შედარება მოდელირების შედეგებთან.



3.3. სიგნალის გენერატორები და მუდმივი დენის დეტექტორი

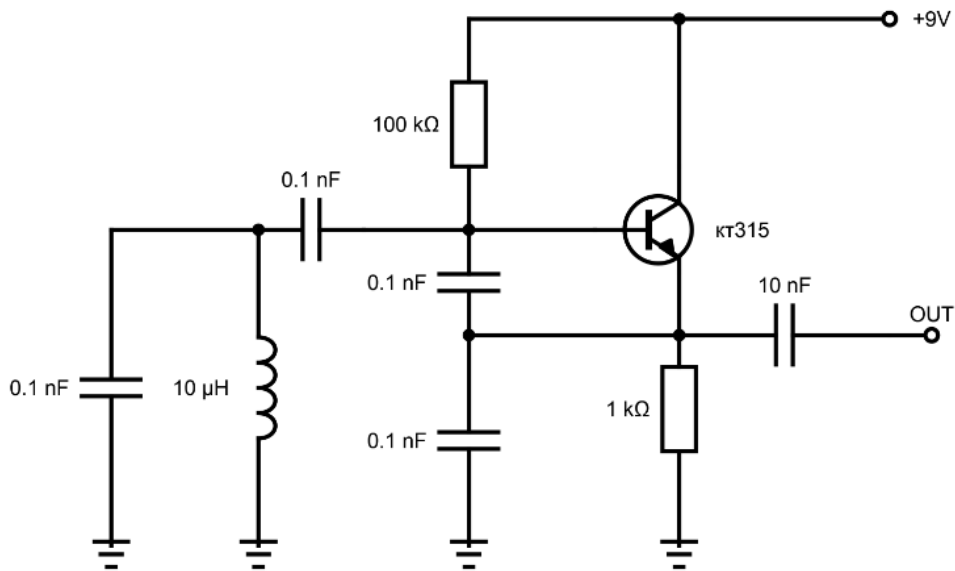
მუშაობის პროცესში შექმენით სხვადასხვა ტიპის გენერატორების სქემები, რომლებიც საშუალებას იძლევა სიხშირეთა განსხვავებულ დიაპაზონში მოხდეს სიგნალის გენერირება. სურათზე მოყვანილია სქემა, რომელიც წარმოადგენს გენერატორს, რომელიც გენერირებს მოცემული ომეგა ელემენტის რეზონანსულ სიხშირეზე:



ნახ. 17 გენერატორის სქემა ველის ტრანზისტორის გამოყენებით

მოცემულ სქემაში გამოყენებულია ველის ტრანზისტორი KP907, რომლის Gate ფეხზე ჩართულია 100 Kohm პოტენციომეტრი, რომელიც უზრუნველყოფს ტრანზისტორის გახსნისათვის საჭირო ძაბვის შერჩევას. იმისათვის რომ სქემამ მოგვცეს გენერაციის საჭიროა უკუკავშირი ტრანზისტორის Drain ფეხსა და Gate ფეხს შორის, რაც უზრუნველყოფლია 50 Kohm წინაღობით. ფაზის წანაცვლებისთვის დამატებით გამოყენებულია 10 uH ინდუქტივობის კოჭა და 100 pF ტევადობის კონდენსატორები. ტრანზისტორის Gate ფეხში ჩართული ომეგა ელემენტი დაიწყებს გამოსხივებას, როცა ტრანზისტორის გენერაციის სიხშირე გაუტოლდება ომეგა ელემენტის რეზონანსულ სიხშირეს.

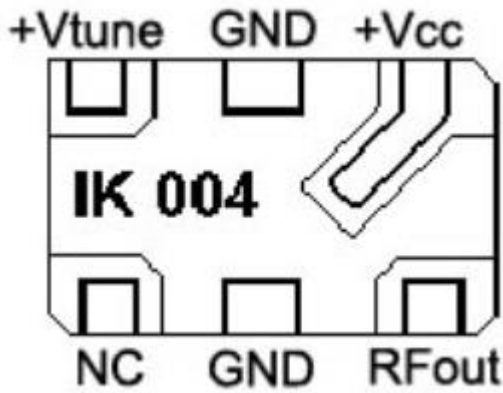
შემდეგი კონსტრუქციის გენერატორი, რომელიც ჩვენს მიერ იქნა შედგენილი წარმოადგენს 100 MHz სიხშირის გენერატორს (ნახ.18). ჩვენი მიზანი იყო მიგველო გენერატორი 800 MHz სიხშირეზე რაც, სამწუხაროდ, მოცემული სქემით ვერ მოხერხდა.



ნახ. 18 გენერატორის სქემა ბიპოლარული ტრანზისტორის გამოყენებით

მოცემულ სქემაში გამოყენებულია ტრანზისტორი KT315, რომლის გენერაციის რეჟიმში მოყვანას უზრუნველყოფს 100 Kohm-იანი უკუკავშირი კოლექტორ-ბაზას შორის, ასევე კონდენსატორული კავშირი ბაზა-ემიტერს შორის. გენერაციის სიხშირეს განსაზღვრავს კოჭის ინდუქტივობა და პირველი კონდენსატორის ტევადობა. გენერირებული სიგნალის მოხსნა ხდება OUT გამოყვანიდან, რომელიც უნდა შეუერთდეს გამომსხივებელ ანტენას კოაქსიალური კაბელით.

მესამე გენერატორი რომელიც შევქმენით და მივიღეთ გენერაცია 1117 MHz-ზე, დამყარებულია ძაბვით კონტროლირებად გენერატორზე VCO IK004 (ნახ.19).



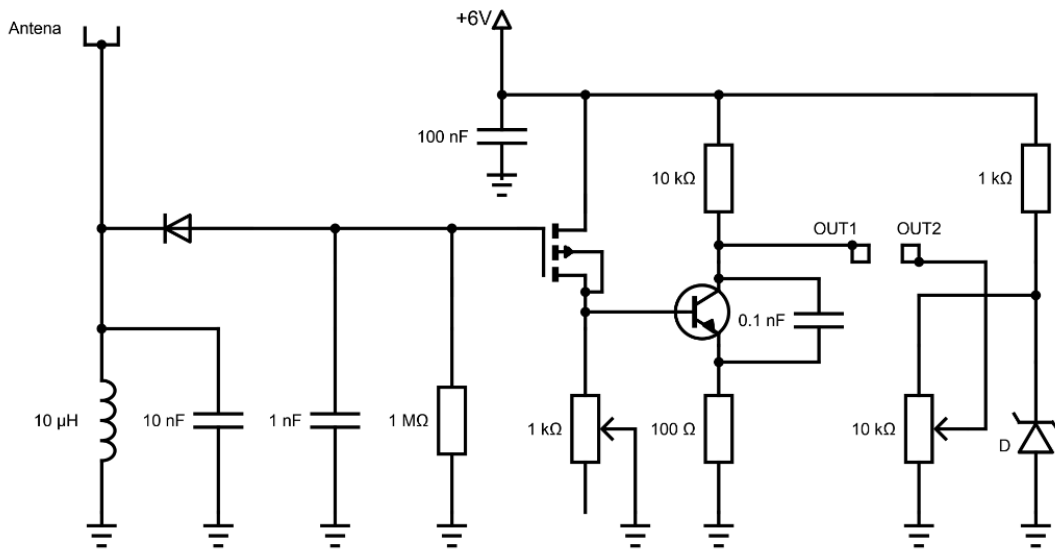
| Typical frequency Vs. tuning voltage (6V power supply) | |
|---|-----------------|
| Tuning voltage (V) | Frequency (MHz) |
| 0 | 980 |
| 3 | 1027 |
| 6 | 1076 |
| 9 | 1129 |
| 12 | 1188 |
| 15 | 1216 |

ნახ. 19 VCO IK004 გენერატორის სქემა და გენერირებულ სიხშირეთა დიაპაზონი

ძაბვის ცვლილების მიხედვით გამოყენებით

მოცემული გენერატორი სავსებით გამოდგება სიგნალის წყაროდ შექმნილი ანტენისათვის. გენერატორის უპირატესობა ისაა, რომ სიხშირის ცვლილება შესაძლებელია ძაბვის საშუალებით დიდი სიზუსტით, რაც ექსპერიმენტების ჩატარებისას მეტ თავისუფლებას გვაძლევს.

დეტექტორის სქემა წარმოადგენს მიმღები ანტენის, დეტექტორი მაღალსიხშირული



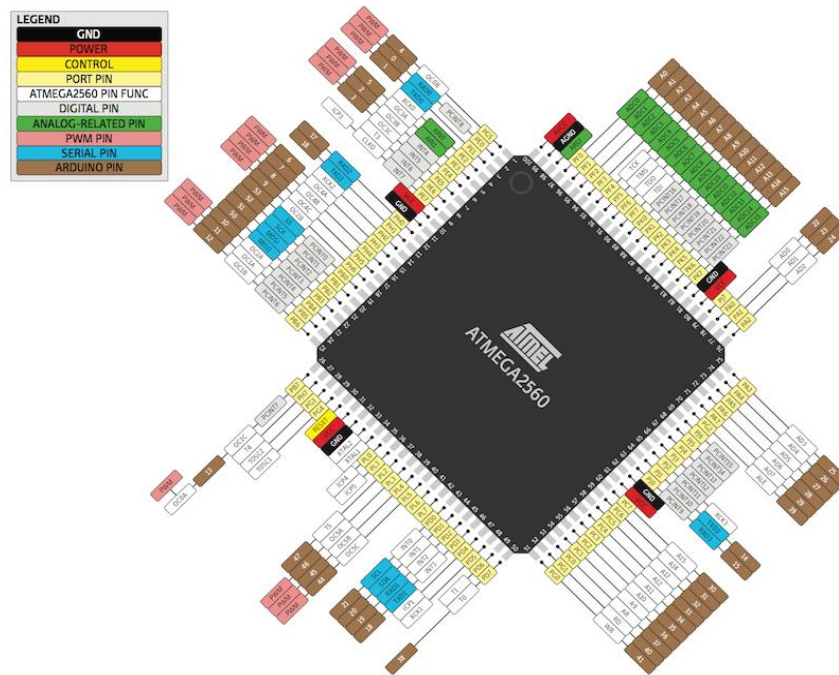
ნახ. 20 დეტექტორის სქემა

დიოდის და მუდმივი დენის გამაძლიერებლის ერთობლიობას (ნახ.20). საბოლოო ჯამში დეტექტორის დამოსავალზე გვაქვს სხვადასხვა ძაბვის მნიშვნელობები რომლებიც შეესაბამება ანტენის მიერ გამოსხივებული ველის ინტენსივობას, რაც წარმოადგენს კიდეც დიაგრამას.

ველის ტრანზისტორის შესავალზე მიერთებულია მადალსიხშირული დეტექტორი დიოდი (ნახ. 20) და ხდება სიგნალის პირველადი გაძლიერება. ამის შემდეგ სიგნალი გადაეცემა ბიპოლარულ ტრანზისტორს და მეორედ ძლიერდება. საბოლოო ჯამში დამოსავალზე გვაქვს 100-ჯერ გაძლიერებული სიგნალი, რომელიც საკმარისია ანალოგურ-ციფრულ გარდამქმნელში შესაშვებად და შემდეგ კომპიუტერში ჩასაწერად. გაძლიერების რეჟიმში მოსაყვანად გამოიყენება 1Kohm რეოსტატი. 10Kohm წინაღობა და სტაბილიტრონი არეგულირებენ დამოსავალი ძაბვის სტაბილურ დონეს, რათა გაზომვებში გამოირიცხოს გარეშე ფაქტორების გავლენა.

3.3. ATmega 2560 და ბიჯური ძრავის მართვა

ATmega 2560 წარმოადგენს AVR არქიტექტურის საკმაოდ მძლავრ მიკროკონტროლერს (ნახ.21), რომელიც გამოიყენება სხვადასხვა ავტონომიურ, ავტომატურ სისტემებში, როგორც ინფორმაციის შემგროვებელი და გადამწოდი ამ ინფორმაციის შემდგომ დასამუშავებლად. იგი წარმოადგენს ძლიერ და მარტივად დასაპროგრამებელ პლატფორმას C++ პროგრამული ენის საშუალებით. ექსპერიმენტებში გამოყენებულ იქნა, როგორც ბიჯური ძრავის მთავარი



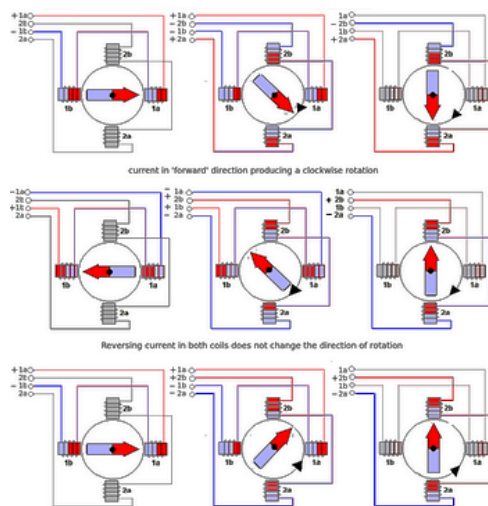
ნახ. 21 ATmega 2560 მიკროკონტროლერი

მაკონტროლებელი და დეტექტორიდან მიღებული ინფორმაციის ჩამწერი. ამ გზით უზრუნველყოფილია სიქრონიზაცია ბიჯური ძრავის ბრუნვასა და ჩაწერილ ინფორმაციას შორის. მისი მახასიათებელი პარამეტრები მოცემულია ნახ.22-ზე.

| | |
|---|---|
| სამუშაო ძაბვა | 5ვ |
| შესავალი ძაბვა (რეკომენდირებული) | 7-12ვ |
| შესავალი ძაბვა (ლიმიტი) | 6-20ვ |
| ციფრული (Digital) შემავალი/გამომავალი (I/O) პინი | 54 ცალი (საიდანაც 15 ცალი არის PWM გამოსავალი) |
| PWM ციფრული შესავალი/გამოსავალი პინი | 15ცალი |
| ანალოგური (Analog) შესავალი(Input) პინი | 16 ცალი |
| მუდმივი (DC) დენი თითოეულ შემავალ/გამომავალ (I/O) პინზე | 20 მა |
| მუდმივი (DC) დენი 3.3 ვოლტიანი პინისთვის | 50 მა |
| ფლეშ მეხსიერება (Flash Memory) | 256KB საიდანაც 16 KB გამოყენებულია bootloader-ის მიერ |
| SRAM (სტატიკური ოპერატიული მეხსიერება, static random-access memory) | 8 KB |
| EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) | 4 KB |
| საათის სიხშირე (Clock Speed) | 16 MHz |

ნახ. 22 ATmega 2560 მახასიათებელი პარამეტრები

ბიჯური ძრავა და მუდმივი ძაბვის ძრავა ერთმანეთისაგან განსხვავდებიან მხოლოდ იმით, რომ ამ ტიპის ძრავებში უძრავი მაგნიტების როლს ასრულებენ კოჭები, რომლებიც

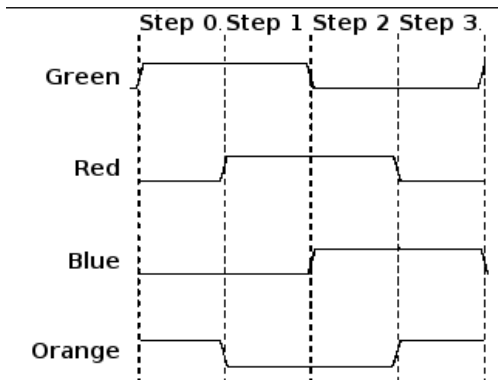


ნახ. 23

მათზე დენისა და ძაბვის მიწოდების შემდეგ ხდებიან ელექტრომაგნიტები. ასეთი ტიპის ძრავებში როტორის ტრიალი იმართება იმის მიხედვით, თუ რომელი ელექტრომაგნიტების წყვილია ჩართული კონკრეტულ მომენტში (ნახ.23).

მაგნიტური განზიდვა მიზიდვის გამო, ისევე, როგორც მუდმივი ძაბვის ძრავებში, შიდა როტორი იწყებს ტრიალს. იმისდა მიხედვით, თუ რა სიჩქარით თანმიმდევრულად ჩავრთავთ და გამოვრთავთ შიდა კოჭებს, შესაბამისად ძრავის ტრიალის სიჩქარე დაიკლებს ან მოიმატებს. ამ ძრავის უპირატესობა არის ის, რომ შესაძლებელია მუდმივი სიდიდის ძაბვისა და დენის მნიშვნელობებით ძრავის სიჩქარის და მობრუნების კუთხის რეგულირება, მაგრამ ამ პლიუსთან ერთად ასეთი ძრავის მინუსი იმაშია, რომ მისი გამართულად მუშაობისათვის აუცილებლად არის საჭირო რაიმე სახის კონტროლერი, რომელიც მართავს კოჭების ჩართვა გამორთვის თანმიმდევრობასა და სიჩქარეს, ჩვენ მიერ მიწოდებული ბრძანებების მიხედვით.

ექსპერიმენტში გამოყენებულ იქნა ბიპოლარულ ბიჯურ ძრავს Stepper Motor Nema 17 Bipolar 40mm 64oz.in(45Ncm) 2A 4 Lead 3D Printer Hobby CNC (ნახ.23) რომლის მმართველი იმპულსების დიაგრამა ასეთია:



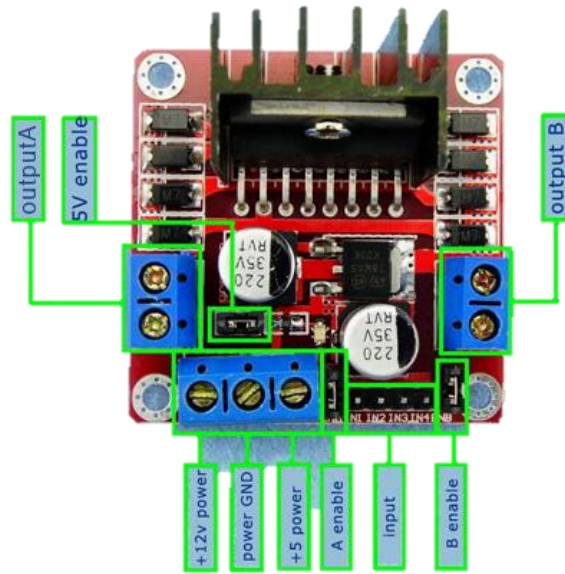
ნახ. 24 ბიჯური ძრავა

ბიჯურ ძრავაზე იმპულსების სწორად მისაწოდებლად საჭიროა მმართველი მიკროსქემის გამოყენება. L298HN არის ძალიან მარტივად მოსახმარი მიკროსქემა, რომელსაც გააჩნია 6 სამართავი პინი, აქედან ორი enable პინი. იმისდამიხედვით რა სიდიდის ძაბვას მივაწვდით ამ ფეხებზე, შესაბამისი სიჩქარით იბრუნებს მოტორი. თუ მივაწვდით ერთიანს (5 ვოლტი), მაშინ მაქსიმალური სიჩქარე გვექნება. თუ მივაწვდით ნულს (0 ვოლტი), მოტორები გაჩერდება. დანარჩენი 4 ფეხი არის შესაბამისად IN1, IN2, IN3, IN4. IN1 და IN2 მართავს პირველი მოტორის ბრუნვას და უზრუნველყოფს იმპულსების მიწოდების სწორ თანმიმდევრობას

გარდა ამისა L298HN ჩიპს ესაჭიროება ორი სხვადასხვა ძაბვის კვება. პირველი, 5 ვოლტი ძაბვა ლოგიკური ელემენტების სამუშაოდაა საჭირო, ხოლო მეორე 35 ვოლტამდე ძალური ნაწილის, ძრავების სამუშაოდაა საჭირო. ჩვენ ვიყენებთ მოდულს, რომელიც დამზადებულია L298HN ჩიპის გამოყენებით.

L298HN-ის სამუშაო პარამეტრებია:

| | |
|-----------------------|----------|
| ლოგიკური ძაბვა | 5 V |
| სამართავი ძაბვა | 5V-35V |
| ლოგიკური დენი | 0mA-36mA |
| სამართავი დენი | 2A |
| მაქსიმალური სიმძლავრე | 25 W |



ნახ. 25 ძრავების მართვის დრაივერის მოდული L298HN ჩიპზე