

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის თბილისის
სახელმწიფო უნივერსიტეტი

საბაკალავრო ნაშრომი

ბრტყელი და დაბეჭდილი ანტენების
გამოკვლევა და ოპტიმიზაცია

თამარ მახარაშვილი

ფუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი
ელექტრული და ელექტრონული ინჟინერიის დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: მეცნიერებათა მაგისტრი ანა გეორგიანი

IVANE JAVAKHISHVILI TBILISI STATE
UNIVERSITY

INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF PLANAR
AND PRINTED ANTENNAS

TAMAR MAKHARASHVILI

Faculty of Exact and Natural Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Master of science **Anna Gheonjian**

TBILISI, 2013

სარჩევი

ანოტაცია.....	iv
Abstract.....	v
1 შესავალი.....	6
1.1 ნაშრომის მიზნები	7
1.2 ნაშრომის სტრუქტურა.....	7
2 რიცხვითი მეთოდები.....	8
2.1 მომენტების მეთოდი (MoM).....	8
2.2 გალერკინის წყვეტილი მეთოდი დროით არეში (DGTD)	9
3 ანტენის პარამეტრები.....	13
4 მართკუთხა ბრტყელი დაფენილი ანტენა.....	14
4.1 L ფორმის კვება.....	14
4.2 ფართოზოლოვანი მართკუთხა ბრტყელი ანტენა.....	15
4.2.1 კომპიუტერული მოდელი	15
4.2.2 შედეგები	16
4.2.3 განხილვა	18
4.3 ორზოლოვანი U ფორმის ჭრილიანი ბრტყელი ანტენა.....	19
4.3.1 კომპიუტერული მოდელები	20
4.3.2 შედეგები	20
4.3.3 განხილვა	22
4.4 სამზოლოვანი U ფორმის ჭრილიანი ბრტყელი ანტენა.....	23
4.4.1 კომპიუტერული მოდელები	24
4.4.2 შედეგები	24
4.4.3 განხილვა	26
5 ლოგო პერიოდული დაბეჭდილი HyperLOG 60100 ანტენა.....	27
5.1 მოდელი.....	27

5.2	შედეგები.....	29
5.3	ოპტიმიზაცია	30
5.4	ოპტიმიზაციის შედეგები	32
5.5	ოპტიმიზაციის მეთოდის განხილვა	33
6	U ფორმის ჭრილიანი ლოგო პერიოდული ანტენა.....	34
6.1	მოდელი	34
6.2	კომპიუტერული მოდელები.....	36
6.3	შედეგები.....	37
6.4	განხილვა.....	39
7	დასკვნა.....	40
	გამოყენებული ლიტერატურა.....	41

ანოტაცია

ანტენა არის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი საშუალება რადიოტალღურ სისტემებში სიგნალების გადაცემისა და მიღებისათვის. ანტენის არასწორი დაგეგმარების შემთხვევაში, არ მოხდება გადამცემი მოწყობილობის მიერ შექმნილი სიგნალის გადაცემა და შესაბამისად, სიგნალის მიღება მიმღებ ხელსაწყოზე. ანტენების კონსტრუირება არის თანამედროვე ტექნოლოგიის აქტუალური სფერო. მაღალსიხშირულ დიაპაზონში ერთ-ერთი ყველაზე ფართოდ გავრცელებული ანტენის დიზაინი არის მიკროფენიანი დაბეჭდილი ანტენა (microstrip patch antenna). ამ ნამუშევარში შესწავლილია ორი - ლოგოპერიოდული და მართკუთხა, მიკროფენიანი ანტენა.

მართკუთხა ბრტყელი ანტენის შემთხვევაში განხილულია სამი მოდელი: ფართოზოლოვანი, U ფორმის ჭრილიანი ორზოლოვანი და ორი U ფორმის ჭრილის მქონე სამზოლოვანი დაფენილი ანტენები. მართკუთხა ბრტყელი ანტენის ფირფიტაში U ფორმის ამოჭრით გატარების ზოლში ანტენას უზრდუნია აკრძალული სიხშირეები, რაც დაკავშირებულია U ფორმის ჭრილის რეზონანსთან. თითოეული ანტენისათვის კომპიუტერული გამოთვლებით მიღებული არეკვლის კოეფიციენტი შედარებულია გაზომვებთან. ანტენის წინაღობის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკისა და დენის განაწილებაზე დაყრდნობით, გაკეთებულია დასკვნები და ხაზგასმულია U ფორმის ჭრილის მნიშვნელობა და ფუნქცია.

AARONIA AG HyperLOG 60100 ლოგო პერიოდული დაფენილი ანტენისათვის კომპიუტერული გამოთვლის შედეგად შესწავლილია სიგანეში შემცირების მიდგომა. ამ მეთოდის მიხედვით დიპოლები დახრილია α კუთხით ანტენის მთავარი ღერძის მიმართ. ჩატარებულია კომპიუტერული სიმულაცია ორი შემთხვევისათვის, როცა $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$. ნაჩვენებია, რომ ანტენის პარამეტრები: არეკვლის კოეფიციენტი, შესავალი წინაღობა და მიმართულობა მნიშვნელოვნად არ იცვლება, სამაგიეროდ მიიღწევა ანტენის სიგანეში საგრძნობლად (22 %-ით) შემცირება.

კვლევა ასევე მოიცავს ლოგოპერიოდული დაფენილი ანტენის გატარების ზოლში (3.1GHz - 11GHz) გარკვეული აკრძალული სიხშირეების დამატებას, გაფილტვრას. ეს განხორციელებულია U ფორმის ჭრილის დამატებით ანტენის მთავარ ღერძში. შესწავლილია მდგარი ტალღის კოეფიციენტის (VSWR) ფორმის დამოკიდებულება U ფორმის ჭრილის ადგილმდებარეობაზე.

ნაშრომში გაკეთებული ყველა კომპიუტერული გამოთვლა განხორციელებულია ელექტრომაგნიტური სიმულაციის პროგრამულ უზრუნველყოფა EMCoS Antenna VLab-სა და EMCoS MTEC VLab-ის საშუალებით. ნაშრომი ხაზს უსვამს კომპიუტერული სიმულაციის მნიშვნელობას ანტენის დაგეგმარებასა და ოპტიმიზაციაში. ეს არის ყველაზე სწრაფი და იაფი საშუალება სასურველი ანტენის პარამეტრების წინასწარი შერჩევისა. სიმულაცია გვაძლევს საშუალებას მივიღოთ სასურველი პარამეტრების მქონე ანტენა ოპტიმალური გეომეტრიით - შემდგომი წარმოებისათვის.

Abstract

Antenna is one of the most important means in radio frequency (RF) systems for receiving or transmitting signals from and into the air as medium. Without proper design of the antenna, the signal generated by the RF systems will not be transmitted and no signal can be detected at the receiver. Antenna design is an active field in communication for future development. For operation in high frequency range one of popular antenna design is the microstrip patch antenna (MPA). In this work, properties of two microstrip, log-periodical and rectangular, patch antennas are studied.

Three models of rectangular patch antenna are considered: wideband, U-slot dual-band and double U-slot triple-band patch antennas. By cutting a U-shaped slot in a rectangular patch antenna, an exclusion band appears, filtering out certain frequency range. This is caused by resonance properties of U-slots. For each antenna, a computer model was constructed. Calculated reflection coefficients were compared with measurements. By analyzing antenna input impedance vs. frequency and current distribution, conclusions are drawn about role and importance of U-slot.

By means of computer modeling, a method allowing optimization of geometrical size of a log-periodic printed antenna AARONIA AG HyperLOG 60100 was considered. According to it, dipoles are inclined to the central axis by α angle. Computer simulations were used in order to investigate two cases: for $\alpha = 30^\circ$ and 45° . It is shown that antenna properties: reflection coefficient, input impedance and gain change insignificantly as a result, while antenna width is reduced significantly (by 22%).

The research also describes how log-periodic printed dipole array antenna is combined with U-slot technique in order to introduce a notch-filtered frequency band in antenna bandwidth (3.1GHz - 11GHz). Dependence of antenna VSWR property on position of U-slot is also investigated in this work.

All computer models were constructed and calculated by means of EM simulation software EMCoS Antenna VLab and EMCoS MTEC VLab. This work underlines the importance of using computer simulation in antenna design and optimization. These means allow quickly and accurately predict properties of a desired antenna. Modeling also provides the way to optimize existing antenna designs and prepare them for manufacturing.

1 შესავალი

ანტენა არის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი საშუალება რადიოტალღურ სისტემებში სიგნალების გადაცემისა და მიღებისათვის. ანტენის არასწორი დაგეგმარების შემთხვევაში, არ მოხდება გადამცემი მოწყობილობის მიერ შექმნილი სიგნალის გადაცემა და შესაბამისად, სიგნალის მიღება მიმღებ ხელსაწყოზე. ანტენების კონსტრუირება არის თანამედროვე ტექნოლოგიის აქტუალური სფერო. მაღალსიხშირულ დიაპაზონში ერთ-ერთი ყველაზე ფართოდ გავრცელებული ანტენის დიზაინი არის მიკროფენიანი დაბეჭდილი ანტენა (microstrip patch antenna). ასეთი ტიპის ანტენა ითვლება ერთ-ერთ ყველაზე მნიშვნელოვან ინოვაციად ანტენების კონსტრუირების სფეროში, ვინაიდან მათი დამზადება საკმაოდ მარტივი, იაფი და ხელმისაწვდომია კვლევითი ინსტიტუტებისთვის. დაფენილი ანტენის შექმნის აზრი გაჩნდა 1950-იან წლებში, მაგრამ სათანადო ყურადღება არ ექცეოდა 1970 წლამდე.

დაფენილი ანტენის უპირატესობა არის მცირე ზომები და დამზადების შესაძლებლობა ლიტოგრაფიის მეთოდით. დაბეჭდილი დაფების ტექნოლოგიის საშუალებით, შემუშავდა ასეთი ანტენების მასობრივი წარმოების საშუალებები, რომლებმაც შეუწყვეს ხელი დამზადების გაიაფებას.

აღნიშნული ანტენები ფართოდ გამოიყენება უსადენო კავშირისთვის და სხვა მიკროტალღური ამოცანებისთვის. მიკროფენიანი დაბეჭდილი ანტენა შედგება გამტარი ზოლებისა და ბრტყელი ფირფიტებისაგან, რომლებიც მოთავსებულნი არიან თხელი დიელექტრიკული ფენის ერთ-ერთ ზედაპირზე, ხოლო მეორე მხრიდან ის მთლიანად დაფარულია გამტარი ფენით, რომელიც ასრულებს მიწის როლს [1].

დღეს დაფენილი ანტენები არის ყველაზე ფართოდ გამოყენებული ანტენების სახეობა იმის გამო, რომ მათ ახასიათებთ მცირე წონა და ზომა, დაბალი ფასი, კარგი შეთანხმება ინტეგრირებულ წრედებთან და დამონტაჟების მარტივი გზა. გარდა ამისა, შეიძლება დამზადდეს მრავალ-ზოლოვანი, ორმაგი ან წრიული პოლარიზაციის ანტენები [4]. მობილური ტელეფონები, უსადენო ინტერნეტის მოწყობილობები, საფრენი საშუალებები, თანამგზავრები და რაკეტებიც კი ფართოდ იყენებენ ასეთ ანტენებს იმის გამო, რომ მათ პირობებში ზომა, წონა, საფასური და გამძლეობა გადამწყვეტია [8].

ანტენების სწორად შერჩევისათვის საჭიროა მისი მახასიათებლების შესწავლა და საჭიროების შემთხვევაში ოპტიმიზაცია. ამ პროცესში კი შეუცვლელია კომპიუტერული მოდელირება, რომელიც მძლავრი მათემატიკური აპარატის გამოყენებით ითვლის მოდელს და იძლევა შესაბამის შედეგებს. კომპიუტერული სიმულაცია აადვილებს და ასწრაფებს ოპტიმალური ანტენის დიზაინისა და მახასიათებლების შერჩევას.

1.1 ნაშრომის მიზნები

კვლევის მიზანს წარმოადგენს გამოკვლევა და ოპტიმიზაცია მიკროფენიანი ბრტყელი და დაფენილი ანტენების, კონკრეტულად კი ულტრაფართოზოლოვანი ლოგო პერიოდული დაფენილი ანტენისა და ფართოზოლოვანი მართკუთხა ბრტყელი ანტენის სამი კონფიგურაციისათვის.

ნაშრომის ერთ-ერთ მთავარი ამოცანაა U ფორმის ჭრილის მნიშვნელობისა და ფუნქციონალურობის დადგენა ფართოზოლოვანი მართკუთხა ბრტყელი ანტენის მაგალითზე.

კვლევა ასევე მოიცავს ლოგო პერიოდული დაბეჭდილი HyperLOG 60100 ანტენის კომპიუტერული მოდელის შექმნასა და სიგანეში ოპტიმიზაციის მეთოდის ეფექტურობის შემოწმებას.

ნაშრომის მთავარი მიზანია ლოგო პერიოდული დაფენილი ანტენის გატარების ზოლში გარკვეული აკრძალული სიხშირეების დამატება და გაფილტვრა. ეს განხორციელებულია U ფორმის ჭრილის დამატებით ანტენის მთავარ ღერძში.

1.2 ნაშრომის სტრუქტურა

პირველ თავში საუბარია ანტენების მნიშვნელობაზე კომუნიკაციის სფეროში. შეფასებულია ნაშრომში განხილული თემის აქტუალურობა და დასმულია ამოცანები.

მეორე თავი აღწერს იმ რიცხვით მეთოდებს, რომლებიც გამოყენებულია ანტენების კომპიუტერული მოდელების გამოსათვლელად. ეს მეთოდებია მომენტების მეთოდი (Method of Moments) და გალორკინის წყვეტილი მეთოდი დროით არეში (Discontinuous Galerkin Time Domain).

მესამე თავში ჩამოთვლილი და აღწერილია ყველა ის, ანტენის პარამეტრი, რომელიც განხილულია ნაშრომის ფარგლებში.

მეოთხე თავში განხილულია მართკუთხა დაფენილი ანტენის სამი კონფიგურაცია. სამივე მოდელის შემთხვევაში წყაროთი კვება ხდება L ფორმის კაბელით. პირველი ანტენის შემთხვევაში ოთხკუთხა ფირფიტა დადებულია ღრუბელზე ($\epsilon=1.06$). მეორე მოდელში ამოჭრილია U ფორმა ფირფიტაში. განხილულ მესამე ანტენაში დამატებულია კიდევ ერთი U ფორმის ჭრილი. თითოეული მოდელისათვის ნაჩვენებია შედეგები და გაკეთებულია დასკვნები.

მეხუთე თავი შეეხება ლოგო-პერიოდული დაფენილი ანტენის კომპიუტერული მოდელის შექმნას და ამის საფუძველზე ანტენის სიგანეში შემცირების მეთოდს.

მეექვსე თავში განიხილება ულტრაფართოზოლოვანი ლოგო პერიოდულ ანტენის გატარების ზოლში აკრძალვის სიხშირის დამატება U ფორმის ჭრილის მეშვეობით.

დაბოლოს, მოყვანილია საბოლოო დასკვნები ჩატარებული სამუშაოს შესაბამისად და ჩამოთვლილია ის ლიტერატურა, რომელიც განხილულია ამ ნაშრომის ფარგლებში.

2 რიცხვითი მეთოდები

მომენტების მეთოდი და გალიორკინის წყვეტილი მეთოდი დროითი არისთვის, ეს ის რიცხვითი მეთოდებია, რომლებიც ინტერპრეტირებულია იმ კომპიუტერულ უზრუნველყოფაშიც, რომლებშიც განხორციელებულია ნაშრომში განხილული ყველა კომპიუტერული გამოთვლა. EMCoS Antenna VLab v1.5 და EMCoS MTEC VLab არის ელექტრომაგნიტური მოდელირების პროგრამული უზრუნველყოფა, რომელიც იყენებს მომენტების მეთოდს სიხშირული გამოთვლისათვის და გალიორკინის წყვეტილ მეთოდს დროითი არისთვის, შესაბამისად.

ამ თავში განხილულია თითოეული მეთოდის მათემატიკური აპარატი და უპირატესობები.

2.1 მომენტების მეთოდი (MoM)

მომენტების მეთოდი არის რთული ინტეგრალური განტოლებების ამოხსნის მიდგომა, რომელიც ითვალისწინებს მათ დაყვანას მარტივ წრფივ განტოლებათა სისტემად. სასრულ ელემენტთა მეთოდის ვარიაციული მიდგომისგან განსხვავებით, მომენტების მეთოდი იყენებს აწონილი ნაშთების ტექნიკას. სინამდვილეში, აწონილი ნაშთებისა და მომენტების მეთოდები წარმოადგენენ ერთსა და იმავე მიდგომას. ჰარინგტონმა [14] დიდი წვლილი შეიტანა მიდგომის ასეთი სახელწოდებით დანერგვაში („მომენტების მეთოდი“) ელექტრული ინჟინერიის სფეროში. მისმა წამყვანმა შრომებმა პირველად აჩვენეს ამ რიცხვითი მიდგომის სიმძლავრე და პოტენციური ელექტრომაგნიტური ამოცანების გადაწყვეტილებაში.

ყველა აწონილნაშთიანი მიდგომა იწყება იმით, რომ შეირჩევა ამომხსნელ ფუნქციათა სიმრავლე ერთი ან რამდენიმე ცვლადი პარამეტრით. ამომხსნელი ფუნქციებისა და ჭეშმარიტი ამონახსნის შორის განსხვავება ფასდება ნაშთების მეშვეობით. მათი მინიმიზაციით მიიღწევა ცვლადი პარამეტრების ისე შერჩევა, რომ ამომხსნელი ფუნქციები კარგად აღწერენ ამონახსნს.

მომენტების მეთოდით როგორც წესი, ამოიხსნება ელექტრული ან მაგნიტური ველის ინტეგრალური ფორმის განტოლება (შესაბამისად EFIE ან MFIE). ორივე განტოლება გამომდინარეობს მაქსველის განტოლებებიდან, თუ განვიხილავთ იდეალური გამტარის (ან უდანაკარგო დიელექტრიკის) მიერ გაბნეული ველის ამოცანას. განტოლებებს შემდეგი სახე აქვთ:

$$EFIE : \vec{E} = f_e(\vec{J}) \quad (2.1)$$

$$MFIE : \vec{H} = f_m(\vec{J}) \quad (2.2)$$

სადაც მარცხენა მხარეს მოცემულია დაცემული ველების სიდიდეები, ხოლო მარჯვენა მხარეს, $\vec{J}$ ველის მიერ ინდუცირებული დენია.

გამოყენებული ინტეგრალური განტოლების ფორმა განსაზღვრავს თუ რა სახეობის ამოცანები ამოიხსნება მომენტების მეთოდით. მაგალითად, EFIE-ს ერთი ფორმა შეიძლება მოსახერხებელი იყოს ვიწო-მავთულოვანი სტრუქტურებისათვის,

ხოლო სხვა ფორმა გამოდგება მეტალური ფირფიტებისათვის. როგორც წესი, ეს განტოლებები გამოისახება სიხშირულ არეში, თუმცა მომენტების მეთოდი ასევე გამოიყენება დროითი არისთვისაც.

ამოხსნის ჩამოყალიბებისას პირველ ნაბიჯს წარმოადგენს დენის გაშლა საბაზისო ფუნქციების სასრულ ჯამად:

$$\vec{J} = \sum_{i=1}^M J_i \vec{b}_i \quad (2.3)$$

სადაც b_i არის i -ური საბაზისო ფუნქცია და J_i უცნობი კოეფიციენტი.

შემდეგ განისაზღვრება M საწონი (weighting) ფუნქცია w_j . მათი სკალარული ნამრავლი განტოლების ორივე მხარესთან შეადგენს ამოსახსნელ გამოსახულებას. მაგნიტური ველის ინტეგრალური განტოლების შემთხვევაში, მიიღება M დამოუკიდებელი განტოლება:

$$\langle w_j, \vec{U} \rangle = \langle w_j, f_m(\vec{J}_i) \rangle \quad (2.4)$$

სადაც $j = 1, 2, \dots, M$

თუ გავშლით დენს (2.3)-ის მიხედვით, მივიღებთ M განტოლებას M უცნობით.

$$\langle w_j, \vec{U} \rangle = \sum_{i=1}^M \langle w_j, f_m(J_i, \vec{b}_i) \rangle \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (2.5)$$

რაც ჩაიწერება მატრიცული სახით შემდეგნაირად

$$[Z][\vec{J}] = [\vec{U}] \quad (2.6)$$

სადაც

$$Z_{ij} = \langle w_j, f_m(b_i) \rangle \quad (2.7)$$

$$\vec{J}_i = J_i \quad (2.8)$$

$$\vec{U}_j = \langle w_j, \vec{U}_{inc} \rangle \quad (2.9)$$

ვექტორი U შეიცავს ცნობილი დაცემული ველის სიდიდეებს, ხოლო Z მატრიცის შემადგენლები წარმოადგენენ გეომეტრიის ფუნქციას. უცნობი კოეფიციენტები წარმოადგენენ J ვექტორის ელემენტებს. მათი მნიშვნელობა მოიპოვება განტოლებათა სისტემის ამოხსნის მეშვეობით. სხვა პარამეტრები, როგორც გაზნეული ელექტრული და მაგნიტური ველები, მიიღება უშუალოდ ინდუცირებული დენებიდან.

მომენტების მეთოდი განსაკუთრებით ეფექტურია ანტენების მოდელირებისათვის, რადგან მათი აღწერა შეიძლება თხელი მეტალური სტრუქტურების მეშვეობით.

2.2 გალერკინის წყვეტილი მეთოდი დროით არეში (DGTD)

გალერკინის წყვეტილი მეთოდი შემოთავაზებული იყო რიდის და ჰილის მიერ 1973 წელს, როგორც ამონახსნი ნეირონების გადატანის ამოცანისთვის. თუმცა ის გახდა პოპულარული სითხის დინამიკისა და ელექტრომაგნიტური ამოცანებისთვის მხოლოდ ახლახანს.

მეთოდი ეფუძნება წყვეტილ სასრულ ელემენტთა სივრცეს და მარტივად უმკლავდება სხვადასხვა სახის და ფორმის ელემენტებს. არარეგულარულ დისკრეტულ ბადეს, ახასიათებს ლოკალურად ცვალებადი პოლინომიური რიგი და შესაბამისად, საშუალებას იძლევა გამოყენებული იყოს ბადის ნაირსახეობა.

DGTD მეთოდი ეფუძნება არასტრუქტურული ბადის ელემენტებს, ტეტრაედრებს, რუნგე-კუტას მეთოდზე რიგის სქემას.

განვიხილოთ მაქსველის განტოლებები სამ განზომილებაში ერთგვაროვანი წრფივი იზოტროპული გარემოსთვის [12], [13].

$$\begin{cases} \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \nabla \times \vec{H} \\ \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E} \end{cases} \quad (2.10)$$

გამოვსახოთ მაქსველის განტოლებები შენახვის ფორმაში:

$$Q \frac{\partial \vec{u}(x, t)}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{F}(\vec{u}(x, t)) = 0 \quad (2.11)$$

სადაც $x \in \Omega$

$$Q = \begin{bmatrix} \epsilon & 0 \\ 0 & \mu \end{bmatrix}, \vec{u} = \begin{bmatrix} \vec{E} \\ \vec{H} \end{bmatrix}, \vec{F}_i(\vec{u}) = \begin{bmatrix} -\vec{e}_i \times \vec{H} \\ \vec{e}_i \times \vec{E} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

სადაც $\vec{e}_i$ აღნიშნავს სამ მართკუთხა საკოორდინატო სისტემის ერთეულოვან გეზს. სივრცე Ω დაიყოფა ურთიერთგადაუკვეთავ ელემენტებად D^k

$$\Omega \approx \Omega_h = \bigcup_{k=1}^K D^k \quad (2.13)$$

სადაც D^k არის ზოგადი ელემენტი, მაგრამ ამონახსნში გამოიყენება ტეტრაედრები. გლობალური ამონახსნი გამოისახება როგორც:

$$\vec{u}(x, t) \approx \vec{u}_h(x, t) = \sum_{k=1}^K \vec{u}_h^k(x, t) \quad (2.14)$$

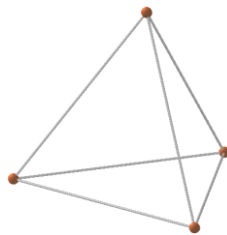
ადგილობრივი მაღალი რიგის პოლინომიალური მიახლოებით

$$\vec{u}_h^k(\vec{x}, t) = \sum_{i=1}^{N_p} \vec{u}_h^k(x_i, t) \psi_i(x) \quad (2.15)$$

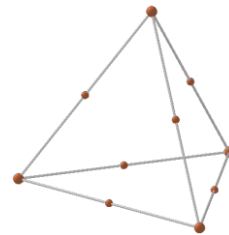
სადაც N_p არის პოლინომიური წერტილების რაოდენობა

$$N_p = \frac{(N+1)(N+2)(N+3)}{6} \quad (2.16)$$

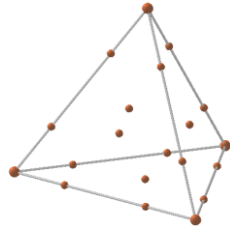
N – არის პოლინომის რიგი.



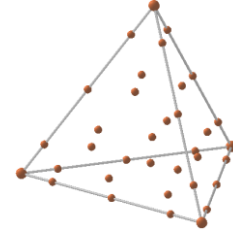
პოლინომის რიგი $N=1$
წერტილების რაოდენობა $N_p = 4$



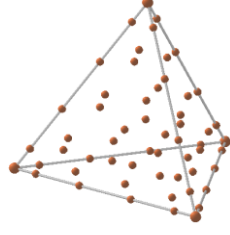
პოლინომის რიგი $N=2$
წერტილების რაოდენობა $N_p = 10$



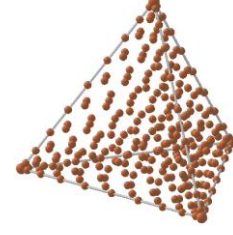
პოლინომის რიგი $N=3$
წერტილების რაოდენობა $N_p = 20$



პოლინომის რიგი $N=4$
წერტილების რაოდენობა $N_p = 35$



პოლინომის რიგი $N=5$
წერტილების რაოდენობა $N_p = 56$



პოლინომის რიგი $N=10$
წერტილების რაოდენობა $N_p = 286$

ჩავწეროთ ლოკალური ნაშთი

$$R_h(x, t) = Q \frac{\partial \vec{u}_h^k(x, t)}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{F}_h^k(\vec{u}(x, t)), \quad x \in D^k \quad (2.17)$$

და მოვითხოვოთ მისი უგულებელყოფა შემდეგი პირობით

$$\int_{D^k} R_h^k(x, t) \cdot \psi_i^k(x) dx = 0 \quad (2.18)$$

სადაც $\psi_i^k(x)$ არის ლოკალური ტესტური ფუნქცია ელემენტზე D^k .

ნაწილებით ინტეგრების შემდეგ ვიღებთ DG-FEM-ს შემდეგი სახით:

$$\int_{D^k} \left(Q \frac{\partial \vec{u}_h^k}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{F}_h \right) \cdot \phi_i(x) dx = \oint_{\partial D^k} \vec{n} \cdot [\vec{F}_h - \vec{F}_h^*] \cdot \psi_i(x) dx \quad (2.19)$$

აქ ϕ_i და ψ_i განასახიერებს N_p ფუნქციების რიგს, F_h^* აღნიშნავს რიცხვით ნაკადს, ხოლო $\vec{n}$ არის გარეთ მიმართული ერთეულოვანი გეზი განსაზღვრული ელემენტის საზღვარზე.

სიმარტივისთვის ჩავთვალოთ, რომ ყველა ელემენტზე მასალის პარამეტრები მუდმივია, ე.ი. Q არის მუდმივი, და ასევე ტეტრაედრის ყველა გვერდი ბრტყელია. შემოვიღოთ ოპერატორები

$$\hat{M}_{ij} = \int_{D^k} \psi_j \phi_i dx, \quad \hat{S}_{ij} = \int_{D^k} \nabla \psi_j \phi_i dx, \quad \hat{F}_{ij} = \oint_{\partial D^k} \phi_i \psi_j dx \quad (2.20)$$

განტოლება გადაიქცევა ცხად სქემად

$$Q \hat{M} \frac{d\hat{u}}{dt} + \hat{S} \cdot \hat{F} = \hat{F} \hat{n} \cdot [\hat{F} - \hat{F}^*] \quad (2.21)$$

სადაც $\hat{u}$ წარმოადგენს $2N_p$ -კოეფიციენტების ვექტორი $\vec{u}_h$.

განვიხილოთ გალერკინის ფორმულირება, რომლის შემთხვევაში $\phi_i = \psi_i$.

$$Q \frac{d\hat{u}}{dt} = -\hat{M}^{-1} \hat{S} \cdot \hat{F} + \hat{M}^{-1} \hat{F} \hat{n} \cdot [\hat{F} - \hat{F}^*] \quad (2.22)$$

სქემის ფორმულირების დასრულებისთვის, უნდა განვსაზღვროთ რიცხვითი ნაკადი F^* , რომელიც განასახიერებს ინფორმაციის გადასვლას ელემენტებს შორის და სასაზღვრო პირობებს. მაქსველის განტოლებების წრფივობის გამო მიიღება

$$\hat{n} \cdot [\hat{F} - \hat{F}^*] = \begin{cases} \bar{Z}^{-1} n \times (n \times [\vec{E}] - Z^+ [\vec{H}]) \\ \bar{Y}^{-1} n \times (n \times [\vec{H}] + Y^+ [\vec{E}]) \end{cases} \quad (2.23)$$

სადაც $[\vec{u}] = \vec{u}^- + \vec{u}^+$ ზომავს ნახტომს ველის მნიშვნელობაში ინტერფერენციის გასწვრივ. ნიშანი '+' მიუთითებს ველის მნიშვნელობებზე მეზობელ ელემენტებზე, ხოლო '-' მიუთითებს ველის მნიშვნელობებზე ელემენტის ლოკალურად. მასალათა თვისებების პოტენციალთა სხვაობის გამოსარიცხად, ჩვენ შემოგვაქვს ლოკალური წინაღობა და $Z^\pm$, და გამტარებლობა $Y^\pm$.

$$\bar{Z} = Z^+ + Z^-, \bar{Y} = Y^+ + Y^- \quad (2.24)$$

3 ანტენის პარამეტრები

ანტენის შესავალი (საკუთარი) წინაღობა (ინგ. Input impedance) არის ანტენის ტერმინალებზე მოდებული ძაბვის ფარდობა გამავალ დენზე. წინაღობა კომპლექსური რიცხვია $Z = R + jX$ და შედგება რეალური და წარმოსახვითი ნაწილებისაგან. რეალური ნაწილი დაკავშირებულია სიმძლავრის რაოდენობასთან, რომელიც გამოსხივდა ან შთაინთქა ანტენის მიერ, ხოლო წარმოსახვითი - ანტენის ახლო ველში ჩაჭერილ სიმძლავრესთან [11].

არეკვლის კოეფიციენტი (ინგ. Reflection coefficient, S_{11}) აჩვენებს თუ რა რაოდენობის სიმძლავრე აირეკლა ანტენიდან. როგორც წესი, იზომება დეციბელებში.

$$S_{11} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (3.1)$$

მდგარი ტალღის კოეფიციენტი (ინგ. VSWR) რაოდენობრივად აღწერს თუ რამდენად კარგად არის ანტენის შესავალი წინაღობა შეთანხმებული მკვებავის გადამცემ ხაზთან [11].

$$VSWR = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad (3.2)$$

გამძიერების კოეფიციენტი (ინგ. Gain) განისაზღვრება, როგორც მაქსიმალური გამოსხივების მიმართულებით გამოსხივებული სიმძლავრის ფარდობა იზოტროპული უდანაკარგო ანტენის გამოსხივებასთან. ჩვეულებრივ, ეს ფარდობა გამოსახება დეციბელებში, ხოლო ერთეული ცნობილია „იზოტროპული დეციბელის“ (dBi) სახელით [11].

მუშაობის დიაპაზონად (ინგ. Bandwidth, ასევე შეიძლება ითარგმნოს როგორც გატარების ზოლი) ითვლება ის სიხშირეთა შუალედი, რომელზედაც $S_{11} < -10$ dB ან $VSWR < 2$. ანტენის მუშაობის დიაპაზონის ფუნდამენტური განმარტებაა სხვაობა ზედა და ქვედა მუშაობის სიხშირეების სხვაობა (f_H და f_L შესაბამისად) [1].

$$bw = f_H - f_L \quad (3.3)$$

ხშირად მუშაობის დიაპაზონს გამოსახავენ დანაწევრებული ან პროცენტული სიდიდის მიხედვით. დანაწევრებული მუშაობის დიაპაზონი გამოითვლება bw -ის ფარდობით ცენტრალურ სიხშირესთან:

$$BW = \frac{bw}{f_c}, \quad (3.4)$$

ხოლო მუშაობის დიაპაზონი პროცენტებში გამოითვლება შემდეგი ფორმულით:

$$BW\% = \frac{bw}{f_c} 100, \quad (3.5)$$

სადაც $f_c = \frac{f_H + f_L}{2}$ არითმეტიკული საშუალოა.

სიხშირეთა ფარდობა (ინგ. Frequency ration) არის გატარების ზოლის ზედა სიხშირის შეფარდება ქვედა სიხშირესთან.

$$F = \frac{f_H}{f_L} \quad (3.6)$$

4 მართკუთხა ბრტყელი დაფენილი ანტენა

მართკუთხა ბრტყელი დაფენილი ანტენა (ინგ. Rectangular Microstrip Patch Antenna) შედგება დიელექტრიკულ ფენაზე დატანილი გამტარი ფირფიტისა და მიწისაგან. ამ პრინციპის განვითარება ვერ ხერხდებოდა მანამ, სანამ არ დაიწყო ელექტრული წრედების მინიატურიზაცია და მათი მასობრივი დანერგვა 1970 წლებში [2], [1]. მუნსონის ადრეულმა ნამუშევრებმა აღწერეს რაკეტებზე დამაგრებული დაფენილი ანტენები და აჩვენეს პრინციპის პრაქტიკულობა და პოტენციური ანტენების სისტემებში მათი გამოყენების. ამ პრინციპით შექმნილი ანტენების აღსაწერად შეიქმნა მათემატიკური მოდელები და მათ გამოყენება ჰპოვეს ბევრ სხვა სფეროში. თანამედროვე ინჟინერისათვის, დაფენილი ანტენა წარმოადგენს ერთ-ერთ საუკეთესო არჩევანს.

მაქსიმალური გამოსხივების მისაღწევად მიზანშეწონილია გამოყენებული იყოს დიელექტრიკი დაბალი დიელექტრიკული შეღწევადობის მუდმივით. გამტარი ფენის ფორმა შეიძლება იყოს ნებისმიერი ფორმის, მაგრამ ყველაზე ფართოდ გამოიყენება წრიული და მართკუთხა ფორმები.

ბრტყელი დაფენილი ანტენა ხასიათდება მისი სიგრძით, სიგანით, შემავალი წინაღობით, გაძლიერების კოეფიციენტითა და გამოსხივების დიაგრამით. ფირფიტის სიგრძე მნიშვნელოვან როლს თამაშობს სამუშაო სიხშირის განსაზღვრის დროს: გამომსხივებლის სიგრძე უნდა იყოს სასურველი სიხშირის ტალღის სიგრძის ნახევარი.

დაფენილი ანტენები U ფორმის ჭრილით პირველად შემოთავაზებული იყო 1995 წელს ჰიუნისა (Huynh) და ლის (Lee) მიერ, როგორც ერთფენოვანი, წრფივად პოლარიზებული ფართოზოლოვანი დაფენილი ანტენა [2]. მკაცრად დადგინდა, რომ U-ჭრილიან ანტენას შეუძლია უზრუნველყოს 30%-ზე მეტი წინაღობა ჰაერის ფენისათვის 0.08 λ , და 20%-ზე მეტი მსგავსი სისქის დიელექტრიკებისათვის [3].

უახლესმა კვლევებმა აჩვენეს, რომ U-ჭრილიანი ანტენის გამოყენება შეიძლება არა მხოლოდ ფართოზოლოვანი გამოყენებისათვის, ასევე ორმაგი და სამმაგი გამტარებლობის ამოცანებისათვის. ჩვენ განვიხილავთ ასეთ სამ ანტენას [4], რომელთა წყაროთი მომარაგება ხდება L-ფორმის კაბელით [5].

4.1 L ფორმის კვება

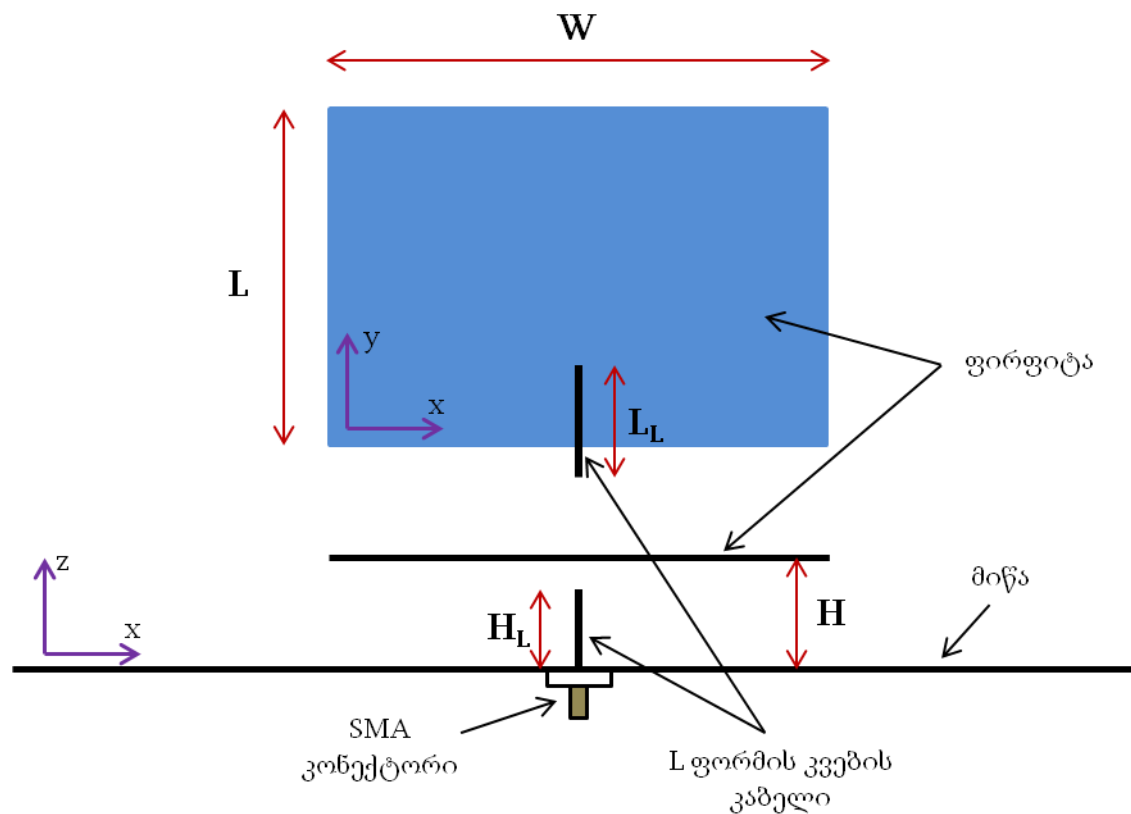
L ფორმის კვება (ინგ. L-Probe Fed) შესანიშნავად მუშაობს ანტენებისათვის, რომელთა დიელექტრიკის ფენა 0.1 λ სისქისაა. თუ ამ კვებასთან ერთად გამოვიყენებთ გამომსხივებელ ფირფიტას, ჩნდება დამატებითი ტევადობა, რომელიც აკომპენსირებს კვების მიერ შეტანილ ინდუქტიობას. ეს ტექნიკა არ მოითხოვს რჩილვას და სწორი ფორმის ზოლიდან L ფორმის მიღება მარტივია წარმოების თვალსაზრისით. თუ გამოვიყენებთ მართკუთხა ფირფიტას და L ფორმის კვებას, შესაძლებელია მივიღოთ 35% გატარების ზოლი და 7.5 dB მიმართულობა [5].

4.2 ფართოზოლოვანი მართკუთხა ბრტყელი ანტენა

განხილული ფართოზოლოვანი მართკუთხა ბრტყელი ანტენა (ინგ. Broadband rectangular patch antenna) შედგება გამტარი ფირფიტისა და მიწისაგან, მათ შორის კი არ არის დიელექტრიკი. კვება ხდება L ფორმის კაბელით.

ფართოზოლოვანი მართკუთხა ბრტყელი ანტენის გეომეტრია და გაზომვების შედეგებია აღებულია [4] პუბლიკაციიდან.

სურათი 1. -ზე ნაჩვენებია ანტენის გეომეტრია და მისი განზომილებები ცხრილი 1. -შია ჩამოთვლილია.



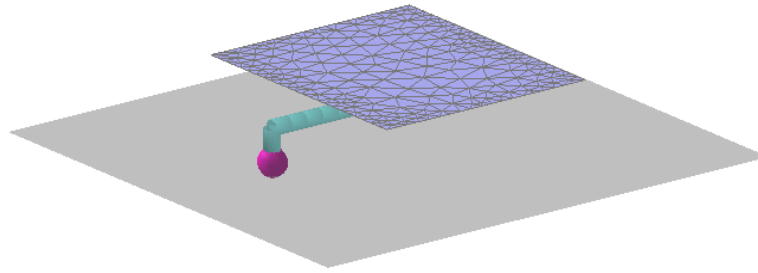
სურათი 1. ანტენის გეომეტრია

W	L	H	H _L	L _L
22	18	5.0	3.5	8.5

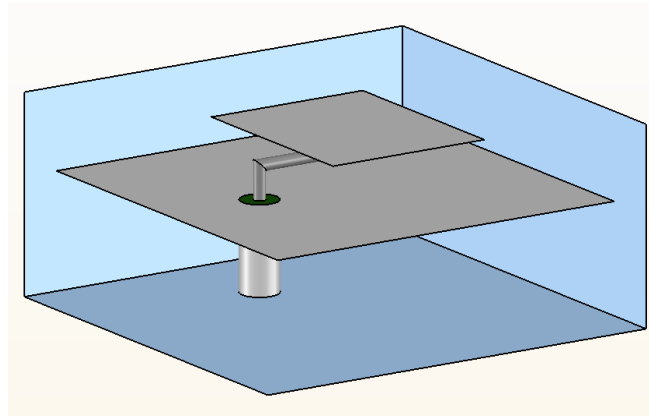
ცხრილი 1. ანტენის განზომილებები [მმ]

4.2.1 კომპიუტერული მოდელი

კომპიუტერული მოდელი შექმნილია EMCoS Antenna VLab-სა (სურათი 2.) და EMCoS MTEC VLab-ში (სურათი 3.), რომლებიც წარმოადგენენ 3 განზომილებიანი ელექტრომაგნიტური სიმულაციის პროგრამულ უზრუნველყოფას.



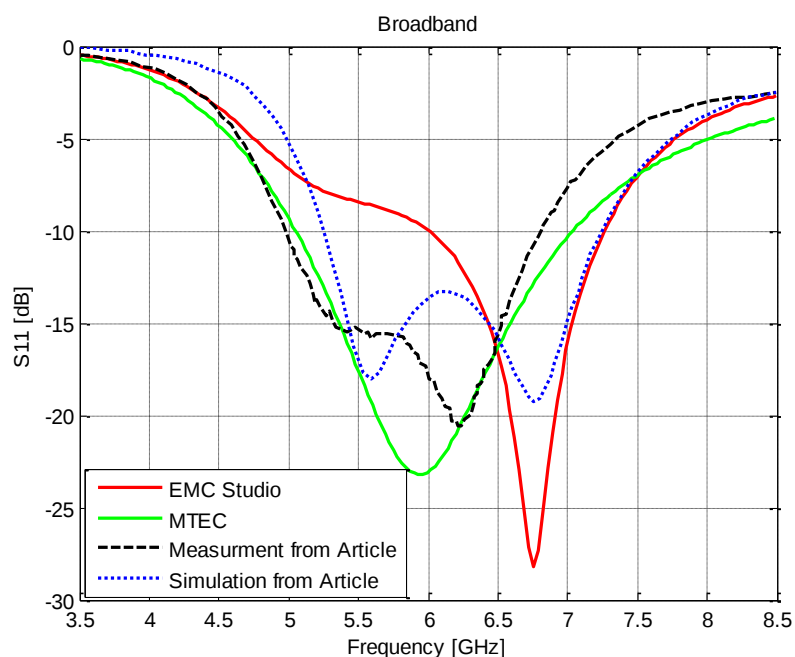
სურათი 2. კომპიუტერული მოდელი EMCoS Antenna VLab-ში



სურათი 3. კომპიუტერული მოდელი EMCoS MTEC VLab-ში

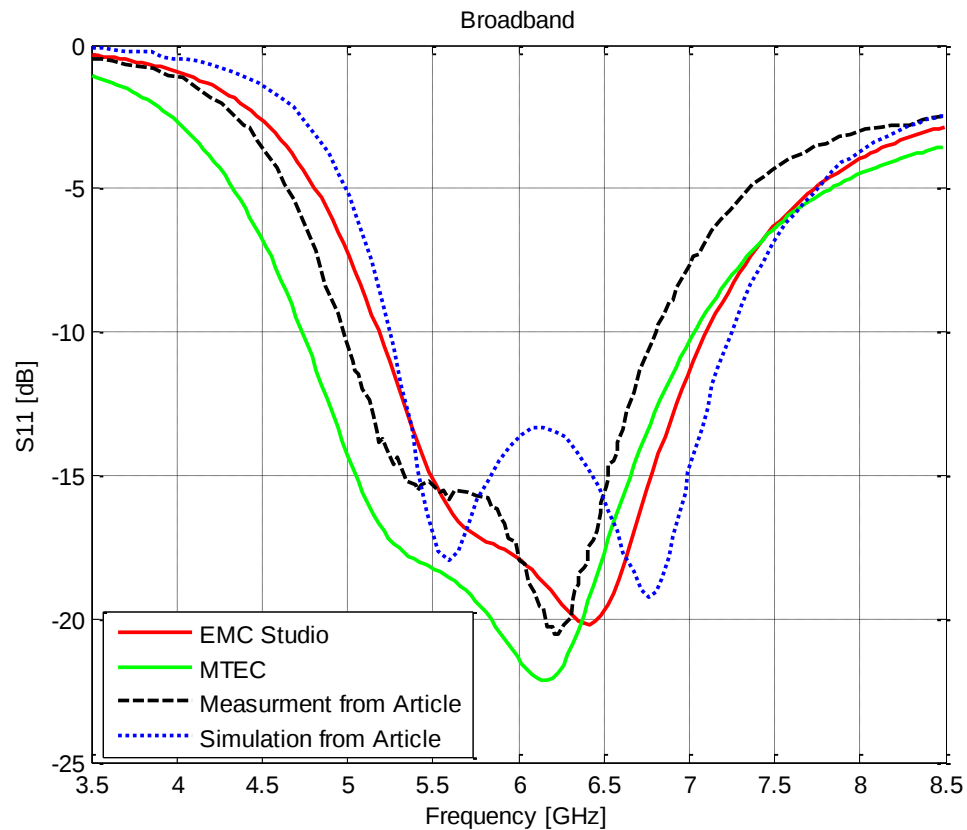
4.2.2 შედეგები

პუბლიკაციაში [4] მითითებული პარამეტრების მიხედვით აიგო კომპიუტერული მოდელები პროგრამულ უზრუნველყოფა EMCoS Antenna VLab-სა და EMCoS MTEC VLab-ში. გამოთვლილი და გაზომილი ანტენის არეკვლის კოეფიციენტი (S_{11}) ნაჩვენებია გრაფიკი 1. -ზე.

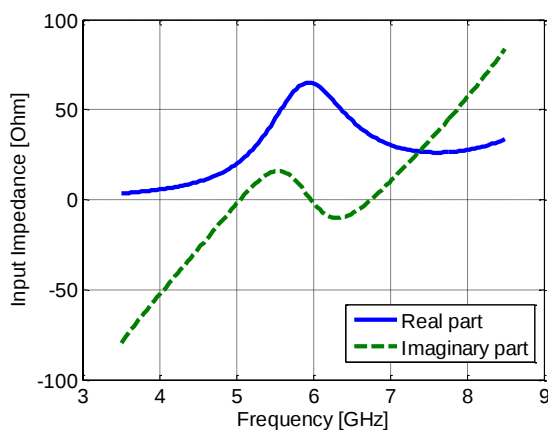


გრაფიკი 1. ანტენის არეკვლის კოეფიციენტის დამოკიდებულება სიხშირეზე

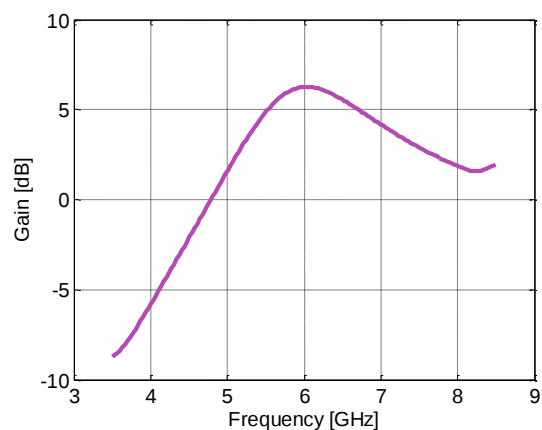
შედეგების აცდენის გამო ჩატარდა პარამეტრული კვლევა. გამოვიკვლიეთ შესაძლო მიზეზები, როგორც კონექტორის არსებობა ასევე, კაბელის რადიუსი და ფირფიტის ზომები. შედეგად დადგინდა, რომ თუ H პარამეტრს გავზრდით 0.7მმ-ით მივიღებთ საკმაოდ კარგ დამთხვევას შედეგებს შორის (გრაფიკი 2.).



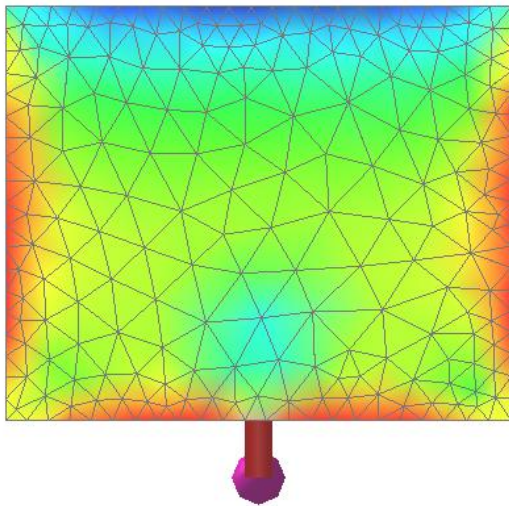
გრაფიკი 2. ფართოზოლოვანი ოთხკუთხა ბრტყელი ანტენის S_{11} პარამეტრი



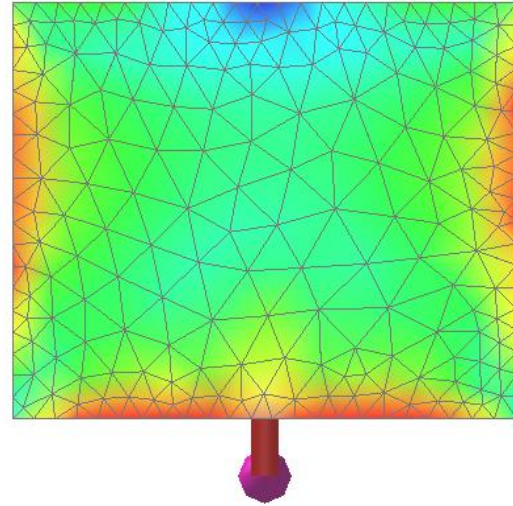
გრაფიკი 3. ანტენის საკუთარი წინააღობის დამოკიდებულება სიხშირეზე



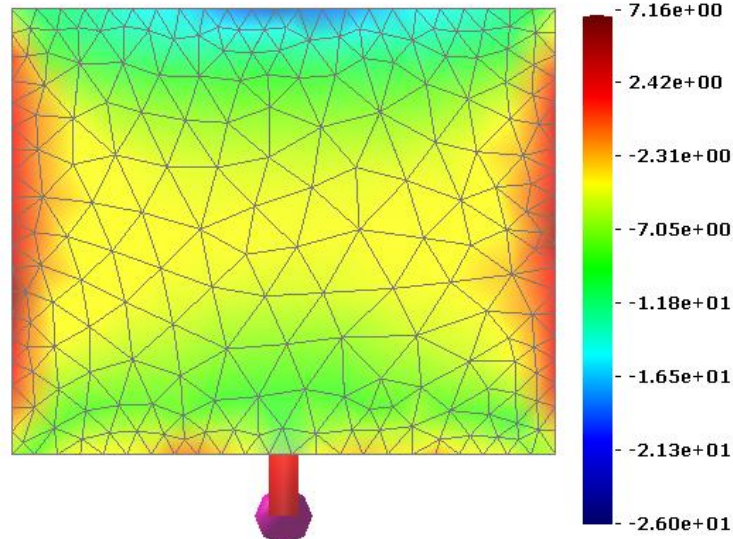
გრაფიკი 4. ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტის დამოკიდებულება სიხშირეზე



სურათი 4. დენის განაწილება
4.7 GHz-ზე [dB]



სურათი 5. დენის განაწილება
8 GHz-ზე [dB]



სურათი 6. დენის განაწილება 6 GHz-ზე [dB]

4.2.3 განხილვა

გაზომვების და კომპიუტერული გამოთვლით მიღებული შედეგებიდან (გრაფიკი 2.) გამომდინარე მიღებულია ანტენის მუშაობის დიაპაზონის შემდეგი მნიშვნელობები:

გაზომვები [GHz]	EMCoS Antenna Vlab [GHz]	EMCoS MTEC Vlab [GHz]
5-6.8 GHz (30.5%)	5.18-7.1 GHz (31.3%)	4.7-7 GHz (43.3%)

ანტენის მუშაობის დიაპაზონში ანტენის საკუთარი წინაღობა დაახლოებით 50 ომია და კარგ შეთანხმებაშია კვების შიდა 50 ომიან წინაღობასთან (გრაფიკი 3.).

ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტი (ინგ. Gain), საშუალოდ 4 dB, რომელიც 6dB-საც კი აღწევს 6GHz-ზე (გრაფიკი 4.), რაც საკმაოდ კარგია ვიწროზოლოვანი ბრტყელი ანტენისათვის.

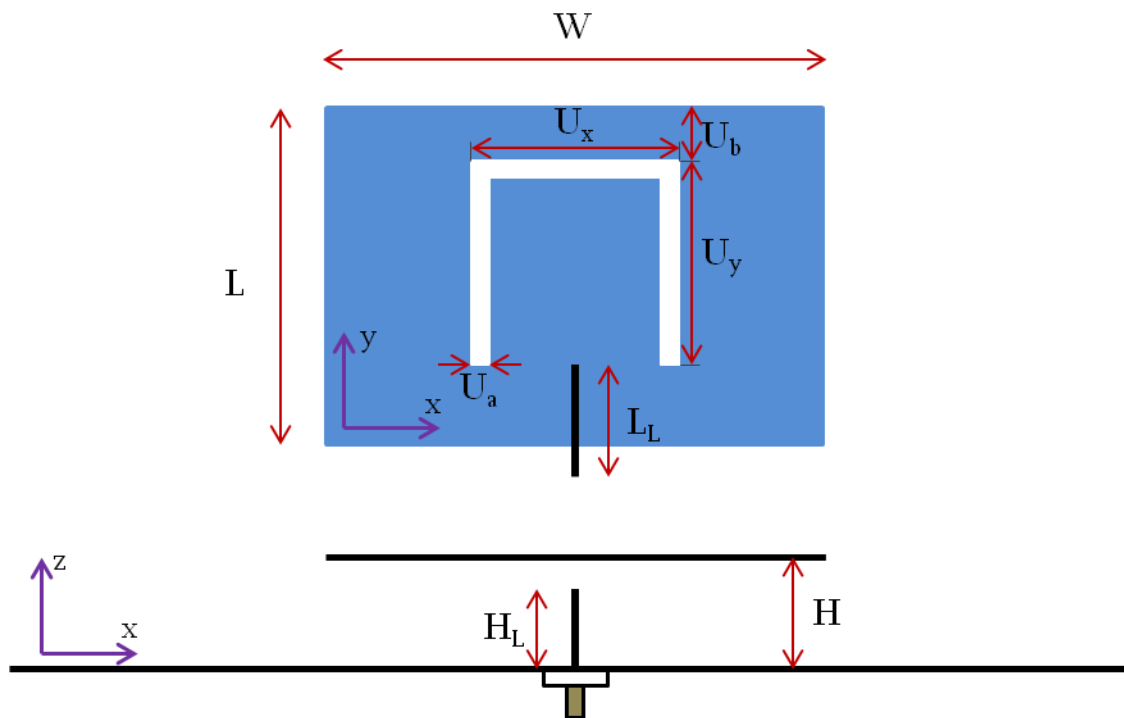
4.7-7 GHz დიაპაზონში რეზონანსი დაკავშირებულია ფირფიტის TM_{01} მოდასთან. დენის განაწილების სურათზე (სურათი 4. , სურათი 5. და სურათი 6.) ნათლად ჩანს, რომ დენის სიმკვრივე გაცილებით მეტია y მიმართულებით ვიდრე x ღერძის გასწვრივ. რეზონანსული სიხშირე დაკავშირებულია ფირფიტის ზომებთან.

რაც შეეხება ფირფიტასა და მიწას შორის მანძილის გაზრდას, ეს შესაძლებელია გამოწვეული იყოს ან გაზომვის სიზუსტით ან დამზადების პროცესის ხარვეზით.

4.3 ორზოლოვანი U ფორმის ჭრილიანი ბრტყელი ანტენა

იმ შემთხვევაში, თუ სიხშირეთა ფარდობა 1.5-ზე მეტია, გამოიყენება თანაღერძული კვება, ხოლო U-ჭრილის განზომილებები შეირჩევა ისე, რომ ფენისა და ჭრილის რეზონანსები ერთმანეთს არ დაემთხვეს. სიხშირეთა მცირე ფარდობის მისაღწევად (<1.5), შეიძლება გამოყენებული იყოს ფართოზოლოვანი ანტენა L-ფორმის კვებით. როცა U-ჭრილი ამოიჭრება ფენიდან, არსებულ გატარების ზოლში ჩნდება ამკრძალავი რეზონანსი, რის შედეგადაც მიიღება ანტენა ორი გატარების ზოლით.

L-ფორმის კვებით ორზოლოვანი ანტენის აგებულება მოცემულია სურათი 7. -ზე, ხოლო განზომილებები ცხრილი 2. -ში.



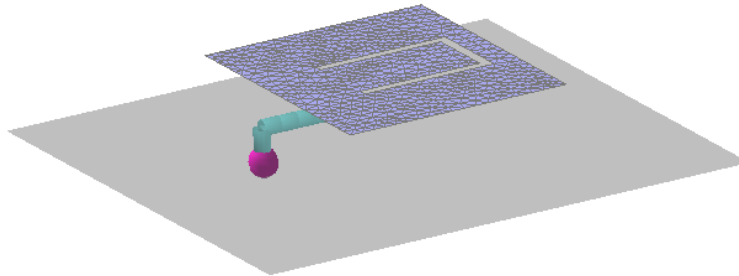
სურათი 7. ანტენის გეომეტრია

W	L	H	HL	LL	Ua	Ub	Ux	Uy
22	18	5.0	3.5	8.5	0.8	2	7.5	10.8

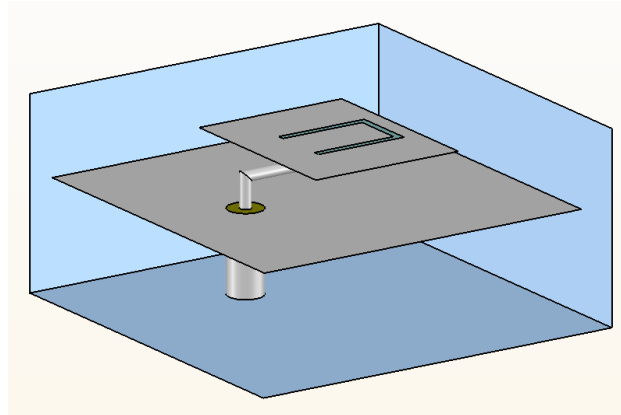
ცხრილი 2. ანტენის განზომილებები [მმ]

4.3.1 კომპიუტერული მოდელები

ზემოთ აღწერილი გეომეტრიისა და ზომების მიხედვით EMCoS Antenna VLab-ში და EMCoS MTEC VLab-ში შეიქმნა ანტენის კომპიუტერული მოდელები ელექტრომაგნიტური სიმულაციისათვის (სურათი 8. და სურათი 9.).



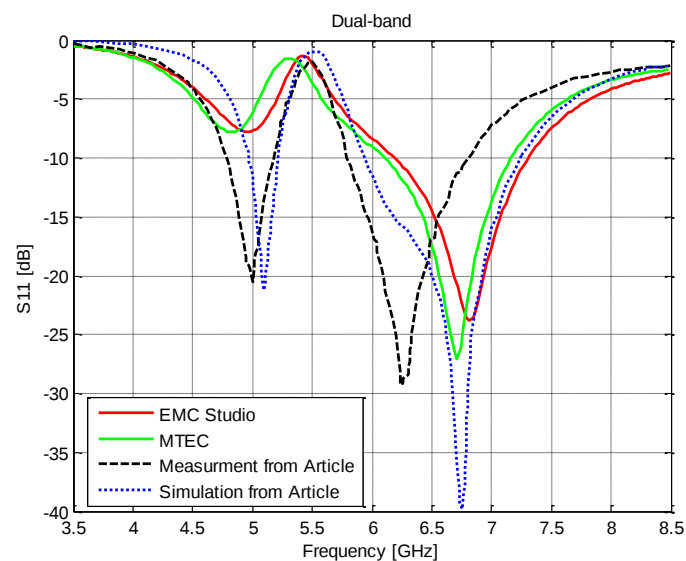
სურათი 8. კომპიუტერული მოდელი EMCoS Antenna VLab-ში



სურათი 9. კომპიუტერული მოდელი EMCoS MTEC VLab-ში

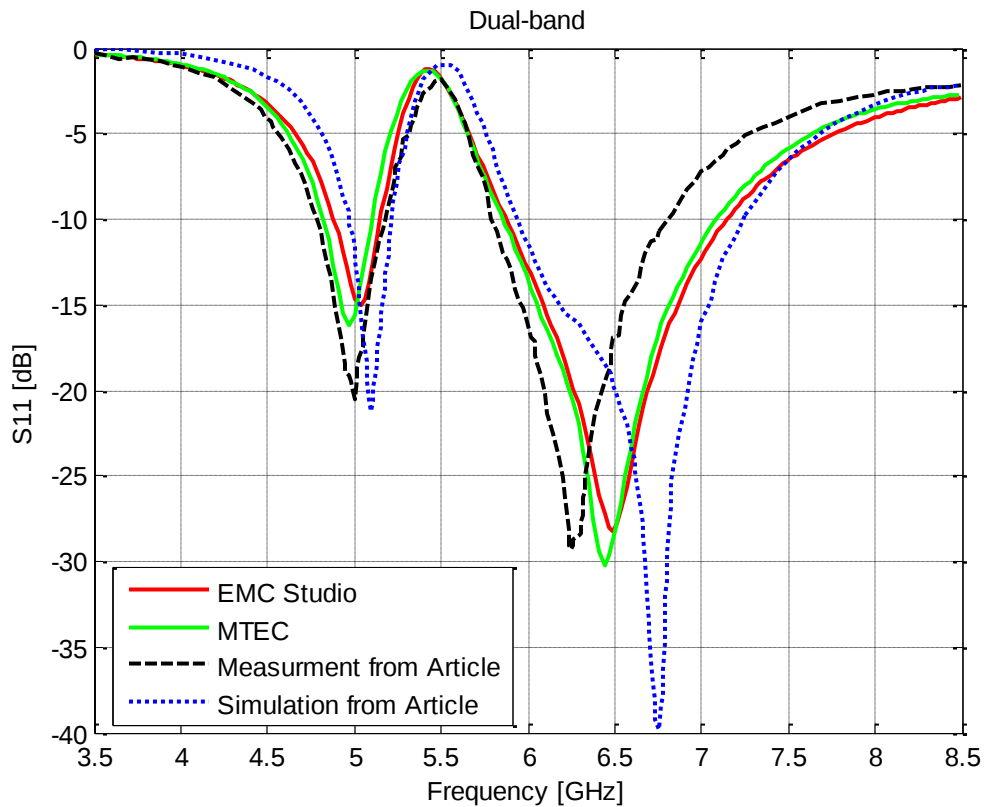
4.3.2 შედეგები

ელექტრომაგნიტური სიმულაციით მიღებული ანტენის არეკვლის კოეფიციენტი შედარებულია გაზომვებთან (გრაფიკი 5.).

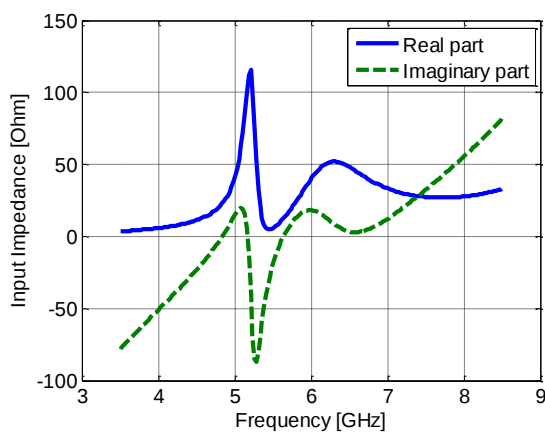


გრაფიკი 5. ანტენის არეკვლის კოეფიციენტის დამოკიდებულება სიხშირეზე

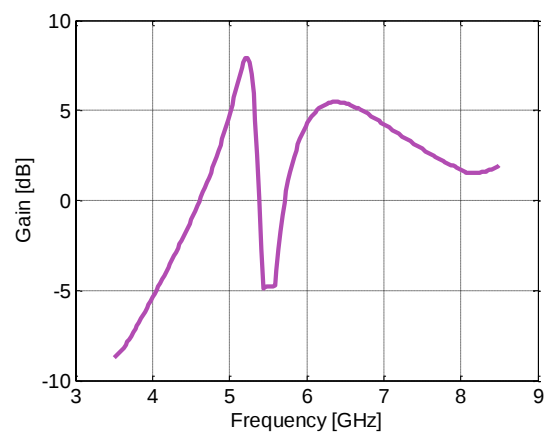
რადგან გაზომვის შედეგებს არ დაემთხვა კომპიუტერული მოდელირებისგან მიღებული მონაცემები, ამიტომ სავარაუდო მიზეზის ძიების მიზნით ჩატარდა პარამეტრული კვლევა. კვლევამ აჩვენა, რომ მანძილის გაზრდით (5.7მმ) ფირფიტასა და მიწას შორის სიმულაციისა და გაზომვების შედეგები ერთმანეთს ემთხვევა (გრაფიკი 6.)



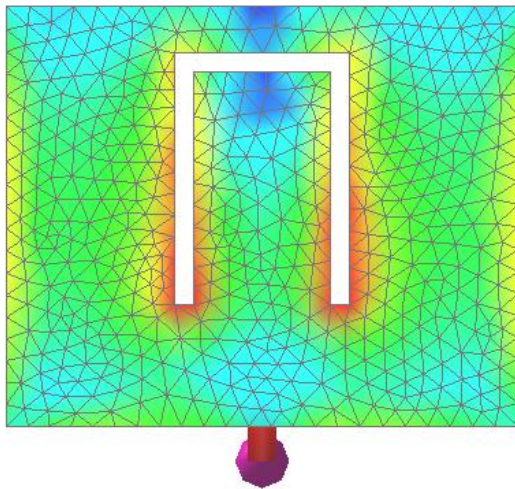
გრაფიკი 6. ფართოზოლოვანი ოთხკუთხა ბრტყელი ანტენის S_{11} პარამეტრი



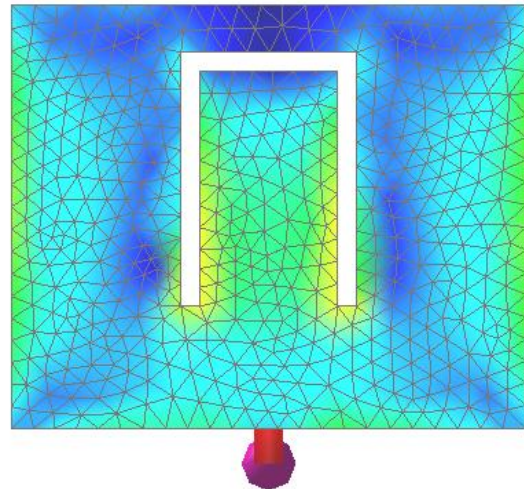
გრაფიკი 7. ანტენის წინაღობის დამოკიდებულება სიხშირეზე



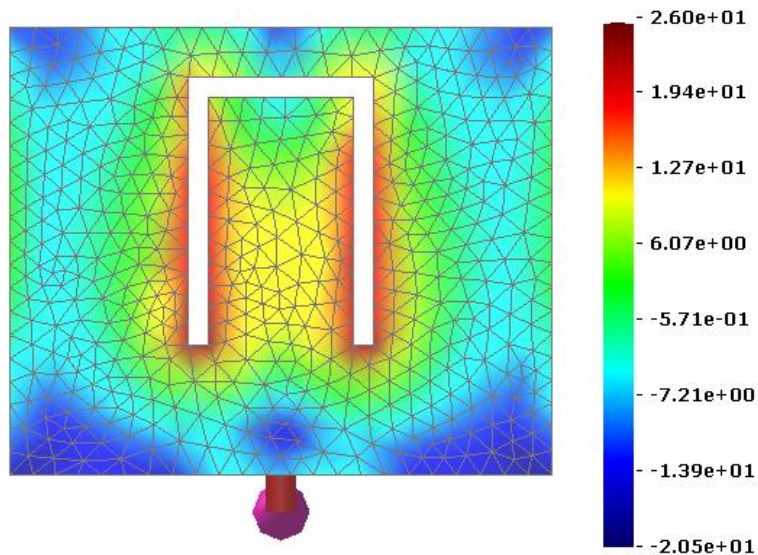
გრაფიკი 8. ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტის დამოკიდებულება სიხშირეზე



სურათი 10. დენის განაწილება
5 GHz-ზე [dB]



სურათი 11. დენის განაწილება
6.5 GHz-ზე [dB]



სურათი 12. დენის განაწილება 5.5 GHz-ზე [dB]

4.3.3 განხილვა

გაზომვებიდან და კომპიუტერული სიმულაციიდან მიღებული შედეგების მიხედვით (გრაფიკი 6.) ცხრილში ჩამოთვლილია ორზოლოვანი U ფორმის ჭრილიანი ბრტყელი ანტენის მუშაობის დიაპაზონები:

გაზომვები [GHz]	EMCoS Antenna Vlab [GHz]	EMCoS MTEC Vlab [GHz]
4.8 - 5.18 (7.6%)	4.88 - 5.16 (5.6%)	4.82 - 5.09 (5.4%)
5.8 - 6.8 (15.9%)	5.86 - 7.14 (19.7%)	5.84 - 7.07 (19.1)

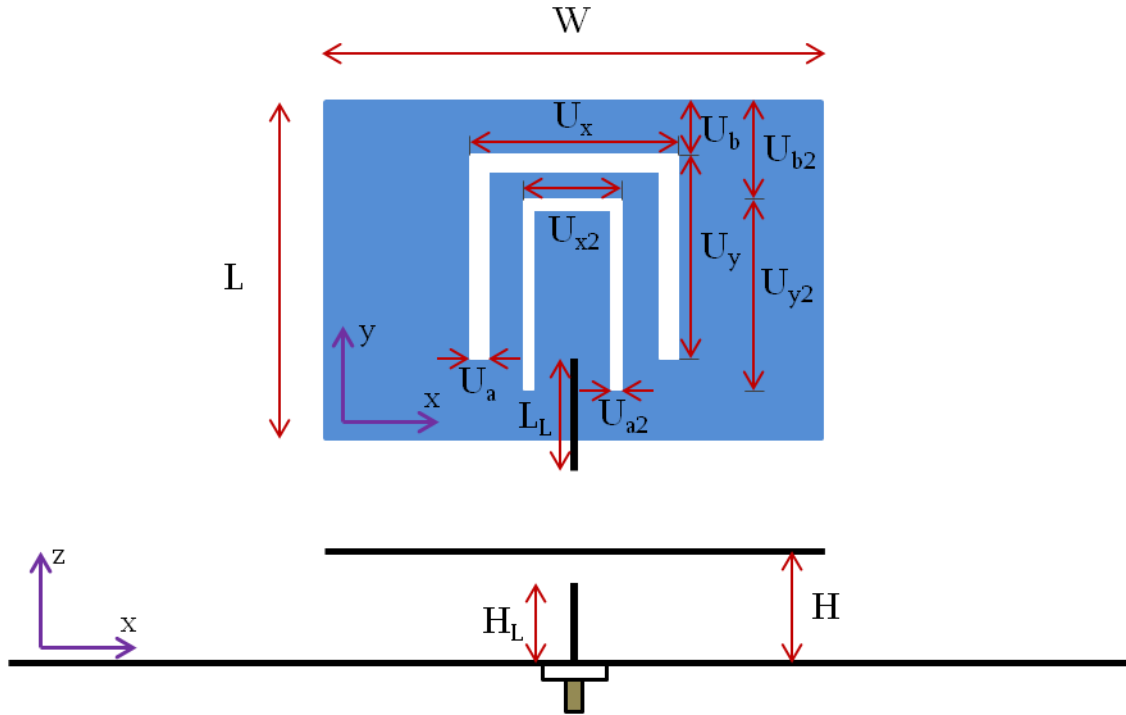
ანტენის გატარების ზოლში შიდა წინაღობა კვლავ საშუალოდ 50 ომია. U ფორმის ჭრილზე რეზონანსის დამყარების შედეგად 5.7GHz-ზე, რაც ცხადად ჩანს წინააღობის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკზე (გრაფიკი 7.), ანტენის

გაძლიერების კოეფიციენტი მკვეთრად მცირდება (გრაფიკი 8.). U ფორმაზე დამყარებული რეზონანსი კრძალავს გატარების ზოლში გარკვეულ სიხშირეს. რეზონანსული სიხშირე შეირჩევა U ფორმის ჭრილის ზომებით. როგორც დენის განაწილებიდან (სურათი 10. , სურათი 11. და სურათი 12.) ჩანს რეზონანსული სიხშირე დამოკიდებულია U ფორმის სიგრძეზე (U_y). U_y -ის სიგრძე დაახლოებით ტოლია რეზონანსული ტალღის სიგრძის მეოთხედის.

4.4 სამზოლოვანი U ფორმის ჭრილიანი ბრტყელი ანტენა

სამზოლოვანი U ფორმის ჭრილიანი ბრტყელი ანტენის მისაღებად წინა ორზოლიან მოდელზე დამატებულია კიდევ ერთი ჭრილი. მათი ზომები ისეა შერჩეული, რომ დამატებითი ჭრილზე რეზონანსი ხდება 5.7 GHz-ზე.

ანტენის გეომეტრია გამოსახულია სურათი 13. -ზე და მისი ზომები ჩამოთვლილია ცხრილი 3. -ში.



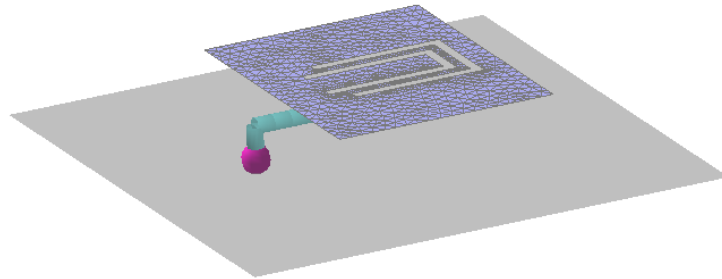
სურათი 13. ანტენის გეომეტრია

W	L	H	HL	Lx	Ua	Ub	Ux	Uy	Ua2	Ub2	Ux2	Uy2
22	18	5.0	3.5	8.5	0.8	2	7.5	10.8	0.8	3.5	4.5	10.8

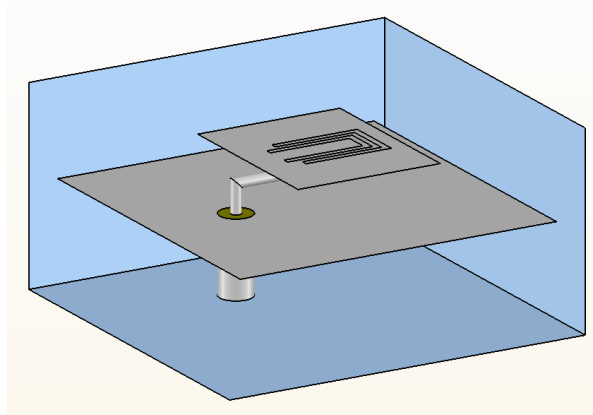
ცხრილი 3. ანტენის განზომილებები [მმ]

4.4.1 კომპიუტერული მოდელები

ზემოთ აღწერილი გეომეტრიის მიხედვით პროგრამული უზრუნველყოფა EMCoS Antenna VLab-ის (სურათი 14.) და EMCoS MTEC VLab-ში (სურათი 15.) აიგო კომპიუტერული მოდელები და მიღებულ იქნა შედეგები.



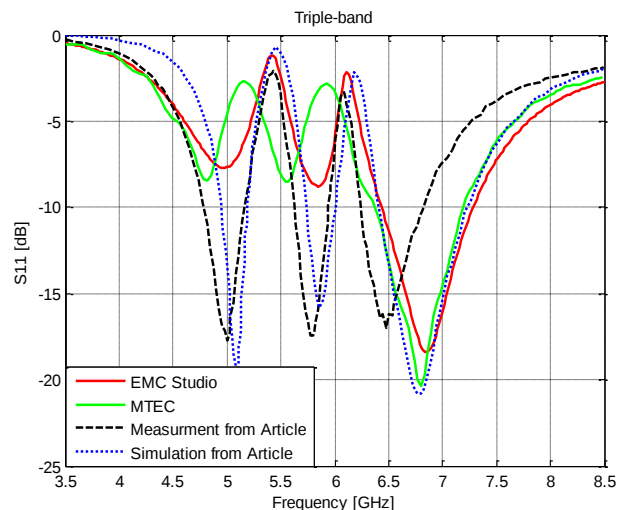
სურათი 14. კომპიუტერული მოდელი EMCoS Antenna VLab-ში



სურათი 15. კომპიუტერული მოდელი EMCoS MTEC VLab-ში

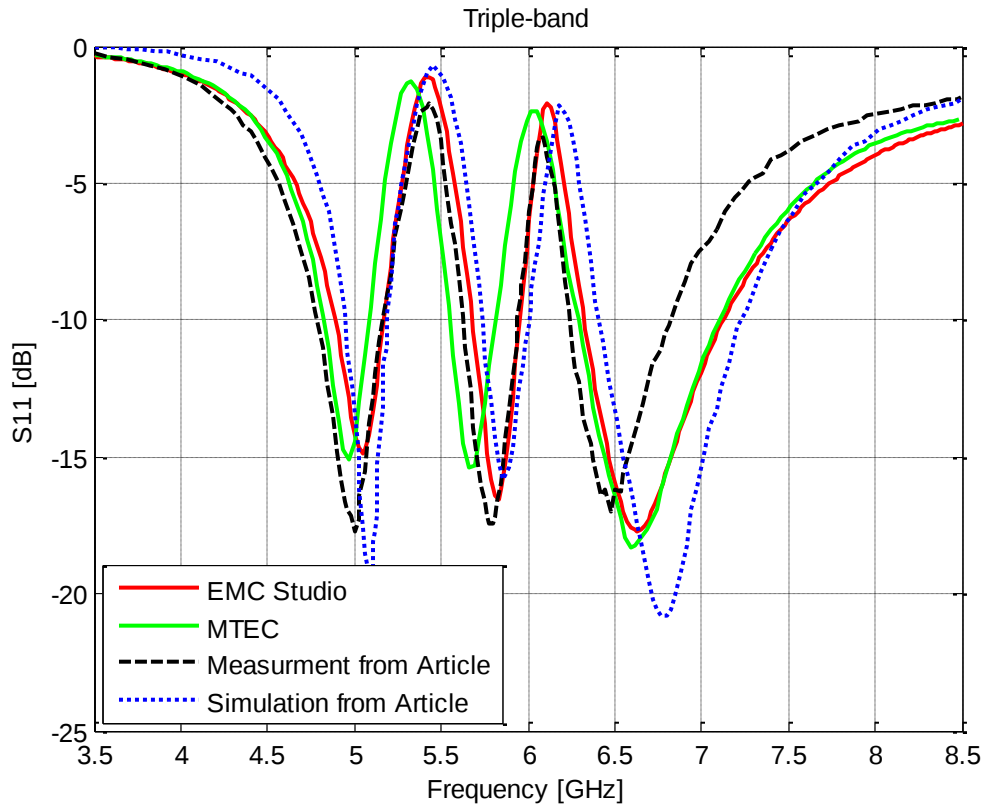
4.4.2 შედეგები

გრაფიკი 9. -ზე ნაჩვენებია მიღებული კომპიუტერული სიმულაციის შედეგების შედარება გაზომვებით მიღებულ მონაცემებთან. გრაფიკი აღწერს ანტენის არეკვლის კოეფიციენტის დამოკიდებულებას სიხშირეზე.

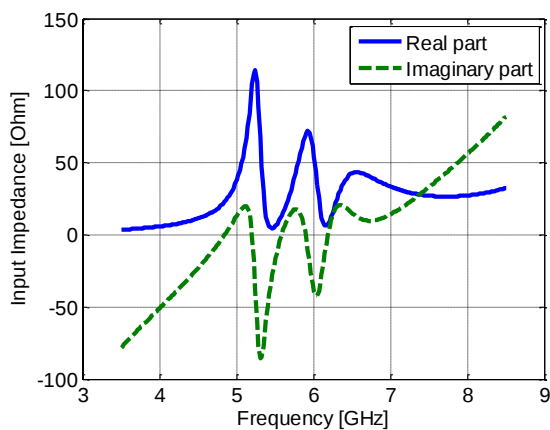


გრაფიკი 9. S_{11} პარამეტრის დამოკიდებულება სიხშირეზე

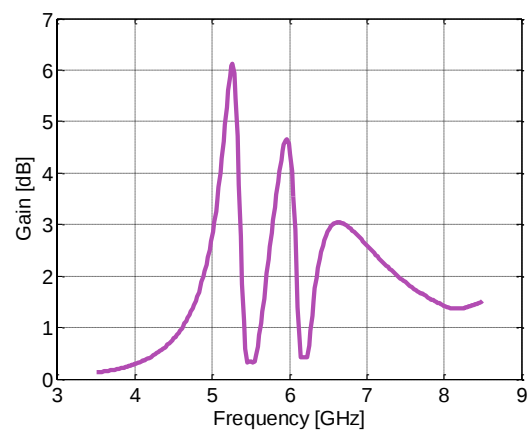
ამ შემთხვევაშიც ჩატარებულმა პარამეტრულმა კვლევამ აჩვენა, რომ H პარამეტრის გაზრდით 0.7 მმ-ით, გაზომილი და სიმულაციით მიღებული შედეგები ერთმანეთს ემთხვევა (გრაფიკი 10.).



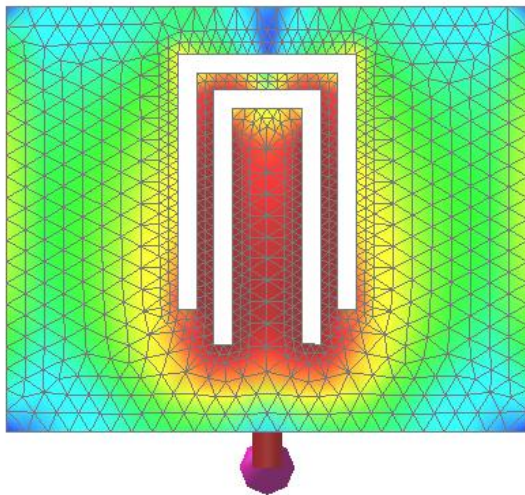
გრაფიკი 10. სამზოლოვანი ბრტყელი ანტენის S_{11} პარამეტრი



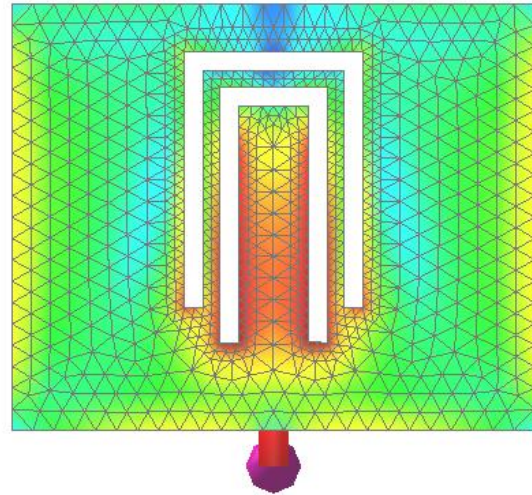
გრაფიკი 11. ანტენის წინაღობის დამოკიდებულება სიხშირეზე



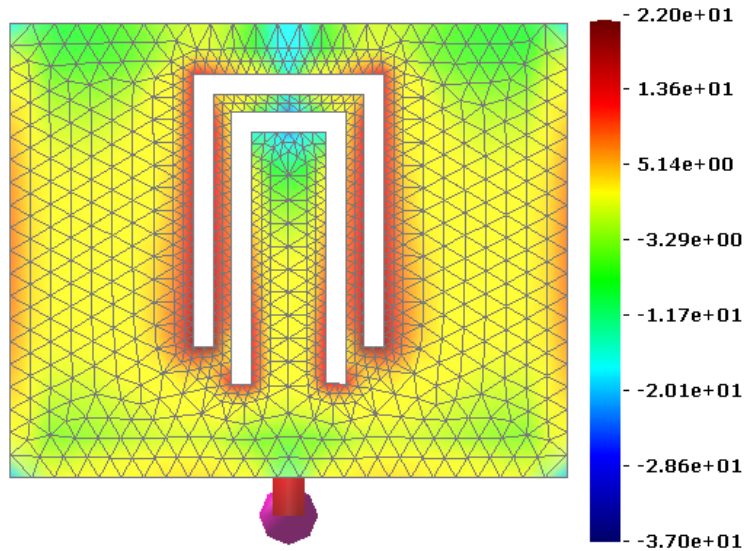
გრაფიკი 12. ანტენის გაძლიერების კოეფიციენტი სიხშირულ არეში



სურათი 16. დენის განაწილება
6.2 GHz-ზე [dB]



სურათი 17. დენის განაწილება
6.51 GHz-ზე [dB]



სურათი 18. დენის განაწილება 5.5 GHz-ზე [dB]

4.4.3 განხილვა

გაზომვებიდან და კომპიუტერული სიმულაციიდან მიღებული შედეგების (გრაფიკი 10.) მიხედვით ცხრილში ჩამოთვლილია სამზოლოვანი U ფორმის ჭრილიანი ბრტყელი ანტენის მუშაობის დიაპაზონები:

გაზომვები [GHz]	EMCoS Antenna Vlab [GHz]	EMCoS MTEC Vlab [GHz]
4.8 - 5.18 (7.6%)	4.88 - 5.16 (5.6%)	4.82 - 5.09 (5.4%)
5.63 - 5.95 (5.5%)	5.69 - 5.94 (4.3%)	5.55 - 7.82 (4.7%)
6.25 - 6.83 (8.9%)	6.33 - 7.14 (12.0%)	6.3 - 7.1 (11.9%)

წინააღმდეგობის და გაძლიერების კოეფიციენტის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკიდან ზუსტად დგინდება გარე U ფორმის ჭრილის რეზონანსული სიხშირე 5.7 GHz და შიდა ჭრილისთვის - 6.2GHz.

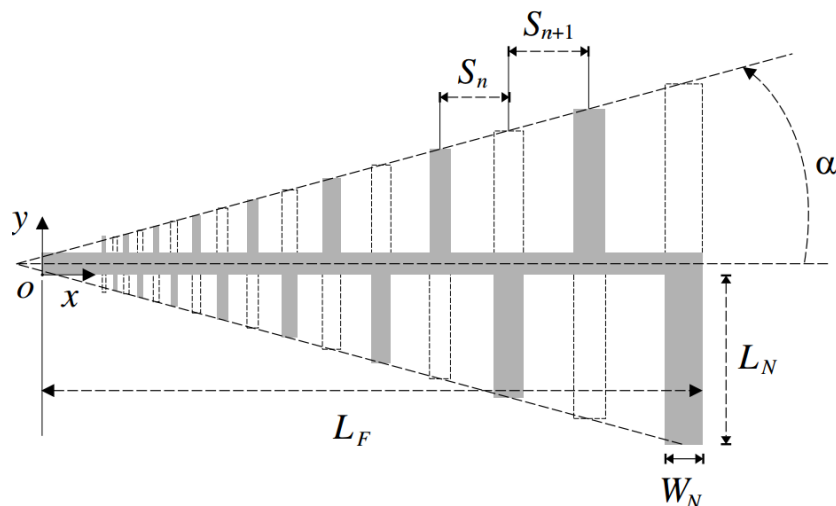
5 ლოგო პერიოდული დაბეჭდილი ანტენა HyperLOG 60100

ლოგო პერიოდული დიპოლური მასივის ანტენა (ინგ. Log-periodic dipole array, LPDA) წარმოადგენს ცილინდრული მავთულების დიპოლების ერთიანობას [11]. მისი აგების წესის და ძირითადი მახასიათებლების შესწავლა დაიწყო 1950-იანი წლებიდან. ამ ტიპის ანტენის ძალიან ფართე გატარების ზოლი, მისაღები გაძლიერების კოეფიციენტი ხდის მას არაჩვეულებრივ კანდიდატად ულტრაფართოზოლოვან სისტემებში სიგნალის გადაცემასა და მიღებისათვის. მისი თვისებების გამო, შეიქმნა ლოგოპერიოდული ანტენის მრავალი სახეობა, რომლებიც მიზნად ისახავენ კომპაქტურ და იაფ რეალიზაციას ფართოზოლოვან ამოცანებში.

დაფენილი ანტენები ხშირად ხდება მიკროტალღურ ამოცანებში, მცირე ზომის, წონის, ფასის და დამზადების სიმარტივის გამო. მათი ძირითად ნაკლოვანებებში შედის მცირე ეფექტურობა და ზედაპირული ველის გავრცელება დიელექტრიკულ ფენაში, შედარებით ვიწრო გატარების ზოლი. ზოგიერთი ამოცანისათვის ეს შეიძლება საკმაოდ სერიოზული შეზღუდვა იყოს, მაგრამ ამის დაძლევა შეიძლება ლოგოპერიოდული კონსტრუქციის გამოყენებით ფართოზოლოვანი დაფენილი ანტენების აგებისთვის.

5.1 მოდელი

მავთულოვანი ლოგო პერიოდული ანტენის პრინციპის გაერთიანებამ დაბეჭდილი ანტენების ტექნოლოგიასთან მოგვცა სურათი 19. -ზე ნაჩვენები სტრუქტურა.



სურათი 19. მუქი ზოლებით გამოსახულია დიელექტრიკის ზედა მხარე, ხოლო წყვეტილი კონტურით დიელექტრიკის ქვედა მხარე.

გამოკვლეული იქნა LPDA HyperLOG® 60100 მოდელის ანტენა, წარმოებული კომპანია AARONIA AG-ის მიერ (სურათი 20.).



სურათი 20. ანტენა HyperLOG 60100

აღნიშნული ლოგო პერიოდული ანტენა შედგება 59 დიპოლისაგან. ყველაზე პატარა დიპოლის სიგრძეა 3.05მმ, ხოლო ყველაზე გრძელის 89.68მმ, შესაბამისად მათი სიგანეებია 0.3მმ და 4.81მმ.

დიპოლების ზომების შეფარდებებია:

$$\frac{L_{n+1}}{L_n} = 1.06 \quad \frac{W_{n+1}}{W_n} = 1.049 \quad \frac{S_{n+1}}{S_n} \approx 1.06$$

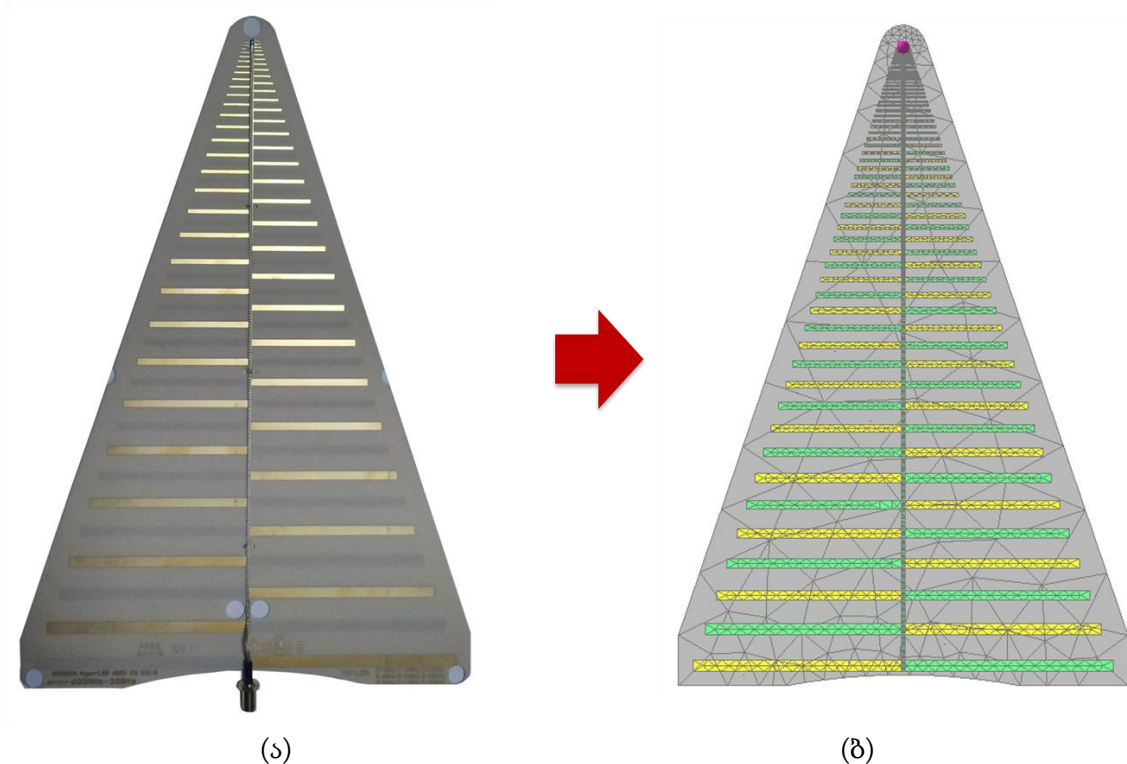
ანტენა დაფენილია ტეფლონზე, რომლის დიელექტრიკული შეღწევადობაა 3, დიელექტრიკული დანაკარგები 0.0013 და სისქე 0.5მმ. ტეფლონის მახასიათებლები აღებულია ROGERS Corporation RO3003-ის მონაცემებიდან (ინგ. datasheet). დაფენილი დიპოლების სისქეა 0.035მმ და დამზადებულია სპილენძისაგან (გამტარებლობა $5.7 \cdot 10^7$).

ანტენის მახასიათებლები მოცემულია ცხრილ 5.-ში.

სიხშირეთა დიაპაზონი	ნომინალური წინაღობა [ომი]	VSWR	მიმართულობა [dBi]	მაქსიმალური გადაცემული სიმძლავრე [W]
680MHz - 10GHz	50	<1:2,5	5	100 (400GHz)

ცხრილი 4. AARONIA AG HyperLOG 60100 ანტენის მახასიათებლები

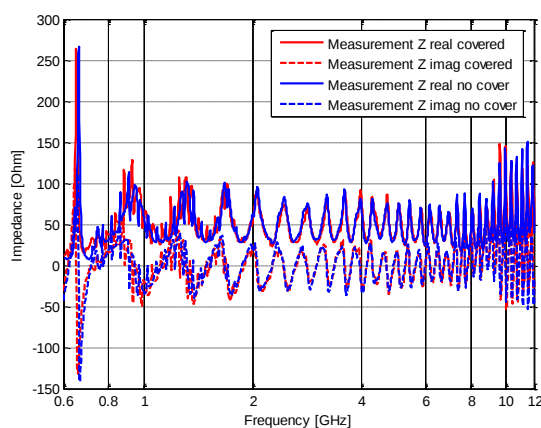
მოცემული მონაცემების მიხედვით პროგრამულ უზრუნველყოფა Antenna VLab-ში აიგო კომპიუტერული მოდელი (სურათი 21. (ბ)).



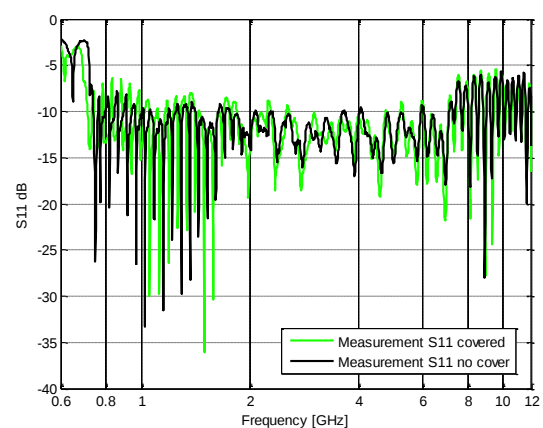
სურათი 21. (ა) გამოსახულია HyperLOG 60100 ანტენა გარეთა საფარის გარეშე. (ბ) მიღებული კომპიუტერული მოდელი

5.2 შედეგები

გაზომვები ჩატარდა Network Analyzer (Hp 8720B) -ით ორი შემთხვევისათვის: ანტენა საფარით და საფარის გარეშე. გაიზომა ანტენის საკუთარი წინაღობა გრაფიკი 13. (ა) და არეკვლის S_{11} კოეფიციენტი (გრაფიკი 13. (ბ)).

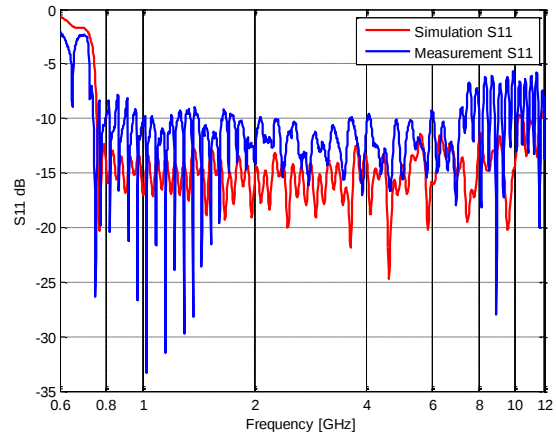
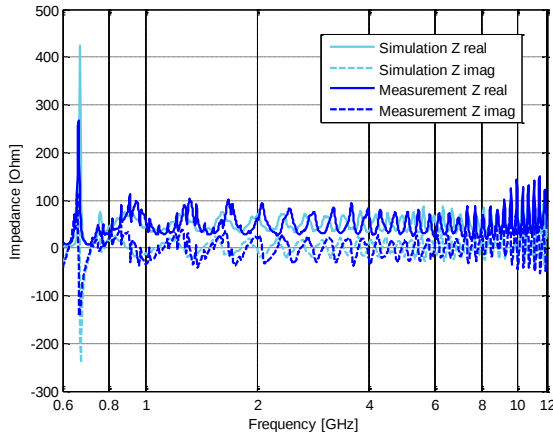


(ა) ანტენის იმპედანსის დამოკიდებულება სიხშირეზე
გრაფიკი 13. ანტენა საფარის გარეშე და საფარით გაზომილი მახასიათებლების შედარება



(ბ) ანტენის არეკვლის კოეფიციენტის დამოკიდებულება სიხშირეზე

პროგრამა EMCoS Antenna VLab-ში მიღებული შედეგები შედარებულია გაზომვებთან (გრაფიკი 14. (ა) და (ბ)). გაზომვებისა და სიმულაციის შედეგები მიღებულია საფარის გარეშე ანტენისათვის.



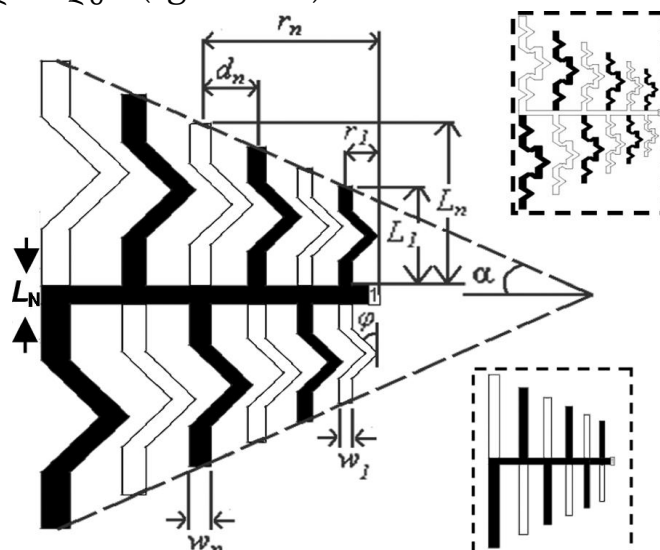
(ა) ანტენის იმპედანსის
დამოკიდებულება სიხშირეზე
გრაფიკი 14. საფარის გარეშე ანტენის კომპიუტერული სიმულაციითა და
გაზომვებით მიღებული შედეგების შედარება

(ბ) ანტენის არეკვლის კოეფიციენტის
დამოკიდებულება სიხშირეზე
გრაფიკი 14. საფარის გარეშე ანტენის კომპიუტერული სიმულაციითა და
გაზომვებით მიღებული შედეგების შედარება

5.3 ოპტიმიზაცია

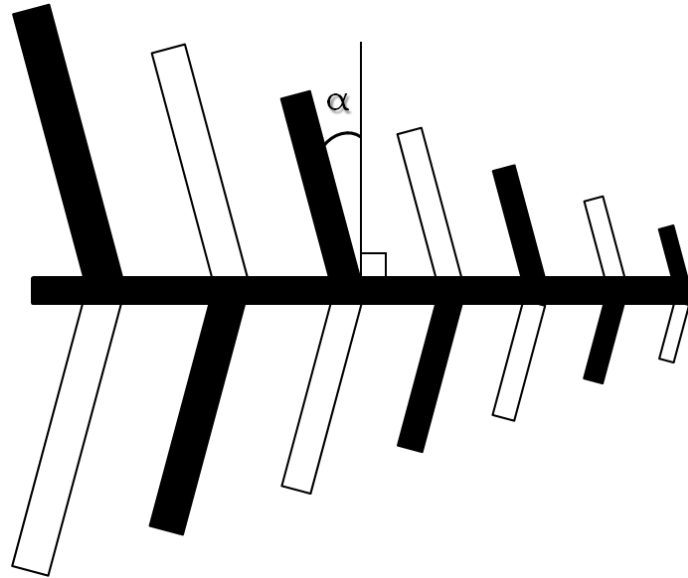
ნაშრომის ერთ-ერთ მიზანს წარმოადგენს ანტენის სიგანეში შემცირება ისე, რომ ანტენის პარამეტრები უცვლელი დარჩეს. შემუშავებულია მდგომარეობა ანტენის ზომების შემცირებაში, რაც დაწვრილებით განხილულია ამ თავში.

როგორც წესი, ანტენის ზომების შემცირებისათვის იყენებენ კოშის მიერ შემუშავებულ პრინციპს, რომელიც მდგომარეობს იმაში, რომ ანტენის დიპოლების ილუნებიან გარკვეული კუთხეებით [15]. მოლუნვათა იტერაცია დაფუძნებულია ფრაქტალების ფორმაზე. ასეთი ფორმის დიპოლებს ხშირად მოიხსენიებენ, როგორც კოშის ფორმიან დიპოლებს (სურათი 22.).



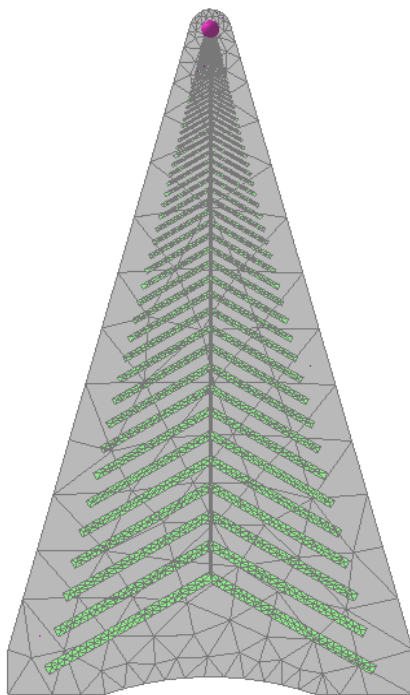
სურათი 22. კოშის ფორმიანი დიპოლების მიღება

ამ ნაშრომში განხილულია ალტერნატიული მიდგომა ლოგო პერიოდული დაფენილი ანტენის ზომის შესამცირებლად იმის გათვალისწინებით, რომ ანტენის მახასიათებლები უცვლელი უნდა დარჩეს. ალტერნატიული მიდგომა მდგომარეობს ანტენის დიპოლების გარკვეული კუთხით მოხრით მთავარი ღერძის მიმართ (სურათი 23.).

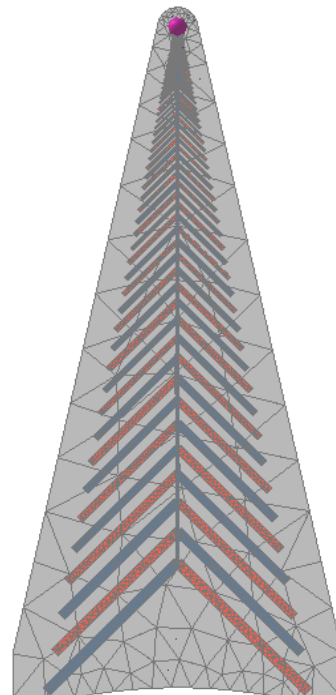


სურათი 23. დიპოლები დახრილია α კუთხით მთავარი ღერძის მიმართ

სურათი 24. -სა და სურათი 25. -ზე ნაჩვენებია $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ კუთხით დახრილი დიპოლები. ანტენის კომპიუტერული მოდელირება და ყველა გამოთვლა განხორციელდა EMCoS Antenna VLab-ში.



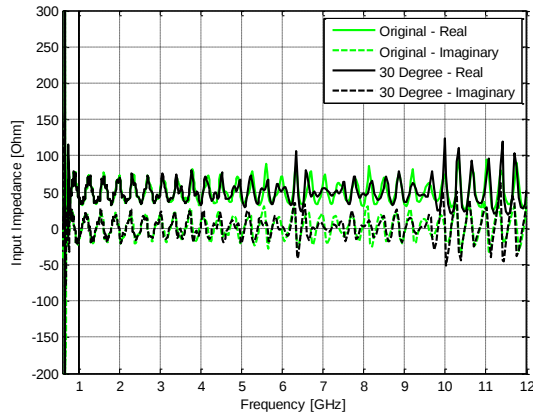
სურათი 24. 30° გრადუსით დახრილი დიპოლები



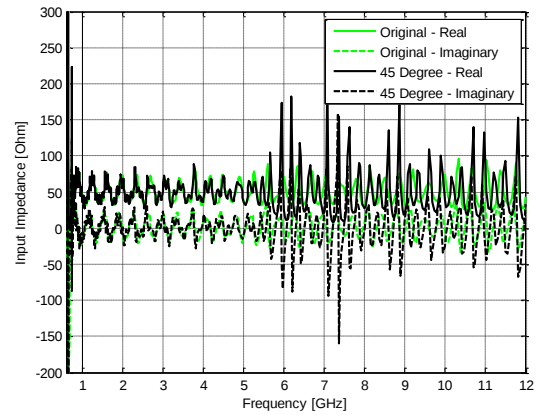
სურათი 25. 45° გრადუსით დახრილი დიპოლები

5.4 ოპტიმიზაციის შედეგები

განხილულია ორი მოდელი, როდესაც $\alpha = 30^\circ$, 45° და შედარებულია ანტენის წინაღობა (გრაფიკი 15.), მიმართულობა (გრაფიკი 16.) და VSWR (გრაფიკი 17.).

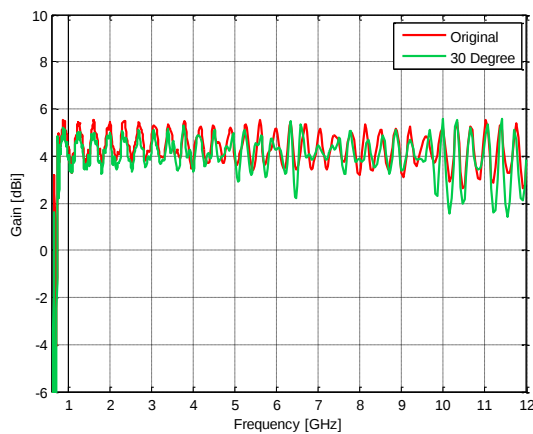


(ა)

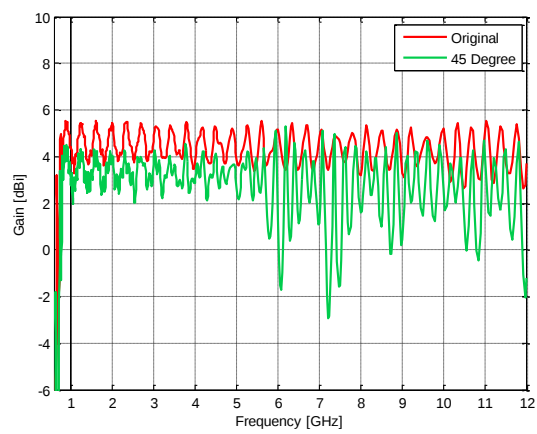


(ბ)

გრაფიკი 15. თავდაპირველი ანტენის წინაღობის შედარება (ა) 30° -ითა და (ბ) 45° -ით დახრის შედეგად მიღებულ შედეგებთან

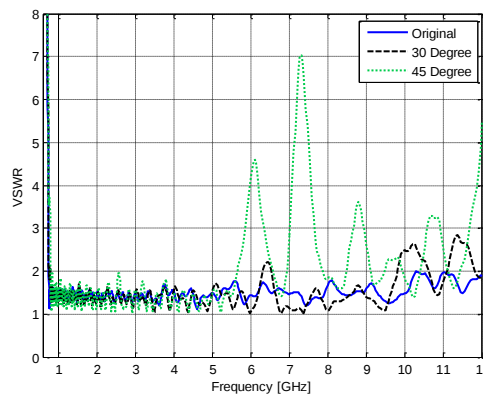


(ა)



(ბ)

გრაფიკი 16. თავდაპირველი ანტენის გაბლიერების კოეფიციენტის შედარება (ა) 30° -ითა და (ბ) 45° -ით დახრის შედეგად მიღებულ შედეგებთან



გრაფიკი 17. თავდაპირველი ანტენის მდგარი ტალღის კოეფიციენტის შედარება 30° -ითა და 45° -ით დახრის შედეგად მიღებულ შედეგებთან

5.5 ოპტიმიზაციის მეთოდის განხილვა

შედეგებიდან გამომდინარე შეიძლება ითქვას, რომ 30°-ით დიპოლების დახრა მნიშვნელოვნად არ ცვლის ანტენის მახასიათებლებს ანტენის გატარების ზოლში (680MHz – 10GHz) და ამავე დროს ანტენის სიგანეს ამცირებს დაახლოებით 4სმ-ით, რაც შეადგენს საწყისი სიგანის 22%-ს. თუმცა უფრო მეტი კუთხით მოღუნვა (45°) მაღალ სიხშირეებზე შედეგს აფუჭებს და გაძლიერების კოეფიციენტიც მნიშვნელოვნად მცირდება 4 dB-მდე.

შედეგები აჩვენებს, რომ კუთხით დიპოლების დახრა მთავარი ღერძის მიმართ მუშაობს გარკვეული კუთხის მნიშვნელობისათვის და არსებობს გარკვეული საზღვარი, რომელიც ამ ანტენისათვის 45°-ს წარმოადგენს.

6 U ფორმის ჭრილიანი ლოგო პერიოდული ანტენა

ულტრაფართოზოლოვანი (ინგ. Ultrawideband, UWB) უკაბელო კომუნიკაციები, რომლებსაც ახასიათებთ დაბალი სიმძლავრის დონე და მონაცემთა გადაცემის მაღალი სიჩქარე, გამოიწვიეს დიდი კვლევითი ინტერესი ინჟინრების მხრიდან 3.1GHz – 10.6GHz სიხშირულ არეში. მაღალი წარმადობის მქონე ულტრაფართოზოლოვანი ანტენები მოითხოვენ, როგორც იმპედანსის კარგ შეთანხმებას, ისე სიგნალის დაბალი დამახინჯების ფაქტორი ნახსენებ სიხშირულ არეში.

არსებობს ბევრი უსადენო კომუნიკაციური სისტემა, რომლის მუშაობის სიხშირეთა დიაპაზონი ზედედება UWB ანტენების დიაპაზონს. მაგალითად, UWB ანტენა შეიძლება გამოიწვიოს შეფერხება ისეთ სისტემებში, როგორიცაა IEEE 802.11a აშშ-ში (5.150 GHz–5.350 GHz და 5.725 GHz–5.825 GHz), HIPERLAN/2 ევროპაში (5.150 GHz–5.350 GHz და 5.470 GHz–5.725 GHz), და მსოფლიო ურთიერთქმედების სტანდარტი მიკროტალღური კავშირისთვის (ინგ. World Interoperability for Microwave Access, WiMAX) (3.400 GHz–3.690 GHz და 5.250 GHz–5.825 GHz) [16]. ამგვარად, კვლევის საინტერესო თემა გახდა ისეთი UWB ანტენების დაგეგმარება და კონსტრუირება, რომელებსაც ექნება აკრძალული უბნები გატარების ზოლში.

ბოლო ათწლეულში, ბევრი დაგეგმარების ტექნიკა იყო შემოთავაზებული UWB ანტენის გატარების ზოლში აკრძალული უბნების ჩასართავად. ერთ-ერთი მარტივი გზა არის U [16], L, H-ფორმის ჭრილის გაკეთება. პარაზიტული ზოლების დამატება ასევე ეფექტური გზაა აკრძალული სიხშირეების გაჩენისთვის. გარდა ამისა, მკვებავ ხაზზე რეზონატორის დამაგრება ასევე კარგი გზაა ამის მიღწევისთვის.

ჩვენ განვიხილავთ U ფორმის ჭრილებს, როგორც აკრძალული სიხშირეების ჩამატების საშუალებას. ასეთი ჭრილების უპირატესობა მდგომარეობს იმაში, რომ მათი ჩასმა ანტენის კონსტრუქციაში და ადგილმდებარეობის არჩევა საკმაოდ მარტივია. პუბლიკაციაში [16] საუბარია იმაზე, რომ ლოგოპერიოდული ანტენის მოქმედების თავისებურებიდან გამომდინარე, აკრძალული უბნის ეფექტურობის გაზრდისთვის, ჭრილი უნდა მდებარეობდეს რეზონირებულ დიპოლთან. სურათი 26. აჩვენებს შემოთავაზებული ანტენის კონსტრუქციას. ჭრილის ფიზიკური სიგრძე არის ჩასახშობი ტალღის სიგრძის მეოთხედის ტოლი, ამიტომაც ამ სიხშირეზე ის რეზონირებს და ახშობს სიგნალს. აკრძალულ სიხშირეზე ხდება სიგნალის სრული არეკვლა. ამ თავში განხილულია U ფორმის ჭრილის ადგილმდებარეობის მნიშვნელობა და ზეგავლენა შედეგებზე და მის ეფექტურობაზე.

6.1 მოდელი

ლოგო პერიოდული დიპოლების მასივის ანტენის (LPDA) გეომეტრია აღებულია [16] პუბლიკაციიდან. შეირჩა შემდეგი პარამეტრები გეომეტრიის ასაგებად: სკალირების კოეფიციენტი (scale factor) $\tau = 0.61$, დაშორების კოეფიციენტი (spacing factor) $\sigma = 0.155$, და დიპოლების რაოდენობა $N = 10$ (სურათი 26.).

ყველაზე გრძელი დიპოლის სიგრძე L_1 გამოითვლება ყველაზე დაბალი რეზონანსული სიხშირიდან f_{min} (6.1) ფორმულით.

$$L_1 = \frac{\lambda_{effmax}}{4} \quad (6.1)$$

სადაც λ_{effmax} არის ყველაზე გრძელი ტალღის სიგრძე ანტენის მუშაობის დიაპაზონში. მისი მნიშვნელობა გამოითვლება (6.2) ფორმულით.

$$\lambda_{effmax} = \frac{c}{f_{min}\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (6.2)$$

სადაც c არის სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში და ϵ_{eff} არის ეფექტური დიელექტრიკული მუდმივა. ეფექტური დიელექტრიკული შეღწევადობის გამოთვლისათვის ფორმულა (6.3) აღებულია მიკროფენიანი ზოლის (ინგ. microstrip line) შემთხვევისათვის.

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{W_1}}} \quad (6.3)$$

სადაც ϵ_r არის ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობა, h დიელექტრიკის სისქე, W_1 ყველაზე გრძელი დიპოლის სიგანე. დამოკიდებულება დიპოლების დაშორებასა და სიგრძეს შორის გამოსახება (6.4) ტოლობით.

$$S_{n+1} = 4\sigma L_n \quad (6.4)$$

სადაც $n = 1, 2, \dots, 9$.

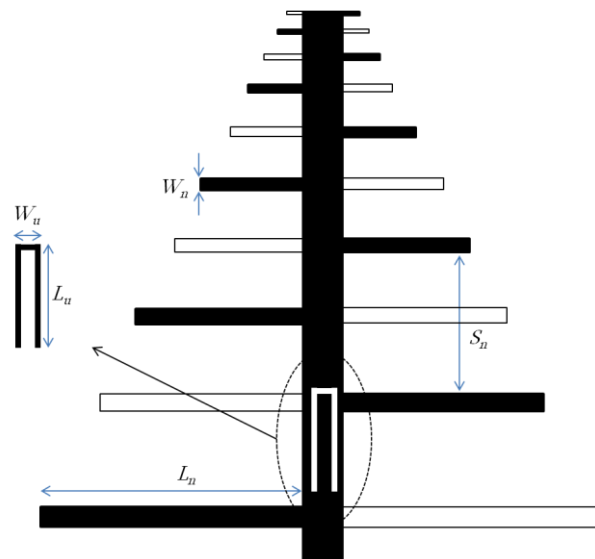
ყველაზე გრძელი დიპოლის ზომებიდან გამომდინარე გამოთვლილია დანარჩენების სიგრძეები და სიგანეები (6.5) დამოკიდებულებით.

$$\frac{L_{n+1}}{L_n} = \frac{W_{n+1}}{W_n} = \tau \quad (6.5)$$

დამოკიდებულება U ფორმის ჭრილის სიგრძისა და აკრძალული სიხშირის გამოსახულია (6.6) ფორმულით.

$$L_u = \frac{c}{4f_{notch}\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (6.6)$$

სადაც f_{notch} არის ჭრილის რეზონანსული სიხშირე.



სურათი 26. ლოგო პერიოდულ ანტენაში ამოჭრილი U ფორმა

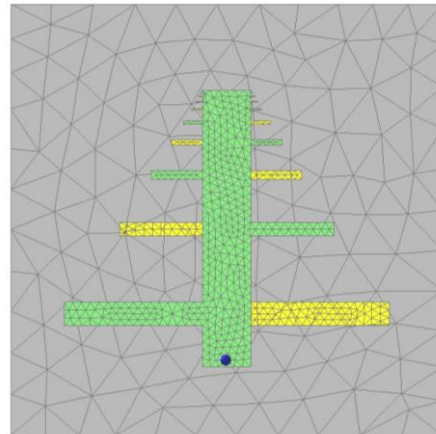
გრძელი U ფორმის ჭრილის სიგრძე გავლენას ახდენს დაბალ სიხშირეებზე. ხოლო მისი სიგანე მცირედით მოქმედებს აკრძალულ სიხშირეზე. აკრძალული სიხშირე დამოკიდებულია ძირითადად U ფორმის ჭრილის სიგრძეზე და მცირედით იცვლება სიგანის მიხედვით [16].

6.2 კომპიუტერული მოდელები

ზემოთ აღწერილი წესების მიხედვით პროგრამულ უზრუნველყოფა EMCoS Antenna VLab-ში აიგო ლოგო პერიოდული ანტენის შესაბამისი კომპიუტერული მოდელი (სურათი 27.), რომელიც დისკრეტული სახით ნაჩვენებია სურათი 27. -ზე.



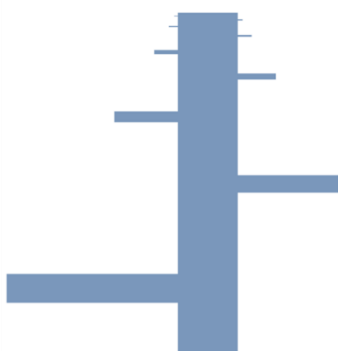
სურათი 27. ლოგო პერიოდული დიპოლების მასივიანი ანტენის გეომეტრია



სურათი 28. ლოგო პერიოდული ანტენა დისკრეტული ბადის სახით

ნაშრომში განხილულია 5 მოდელი. მოდელი 1 არის ლოგო პერიოდული ანტენა, რომლის გატარების ზოლია 3.1GHz – 10.6GHz. მოდელ 2-ზე ამოჭრილია U ფორმის ჭრილი, რომლის სიგრძეა 9მმ და სიგანე 2მმ და დაშორებულია ანტენის წვეროდან 15მმ-ით. მოდელ 3-ზე ჭრილის ზომები და მდებარეობა უცვლელია, მხოლოდ შეცვლილია ჭრილის პირის მიმართულება.

სურათებზე ნაჩვენებია ანტენის ზედა მხარეები, ქვედა რჩება უცვლელი.



მოდელი 1



მოდელი 2



მოდელი 3

მოდელი 4-ის შემთხვევაში U ჭრილი დაშორებულია ანტენის წვეროდან 6მმ-ით. მოდელი 5-ზე ჩანს, რომ U ფორმის ჭრილი ჩამოწეულია 9.6მმ-იანი მეცხრე დიპოლის ქვევით.



მოდელი 4

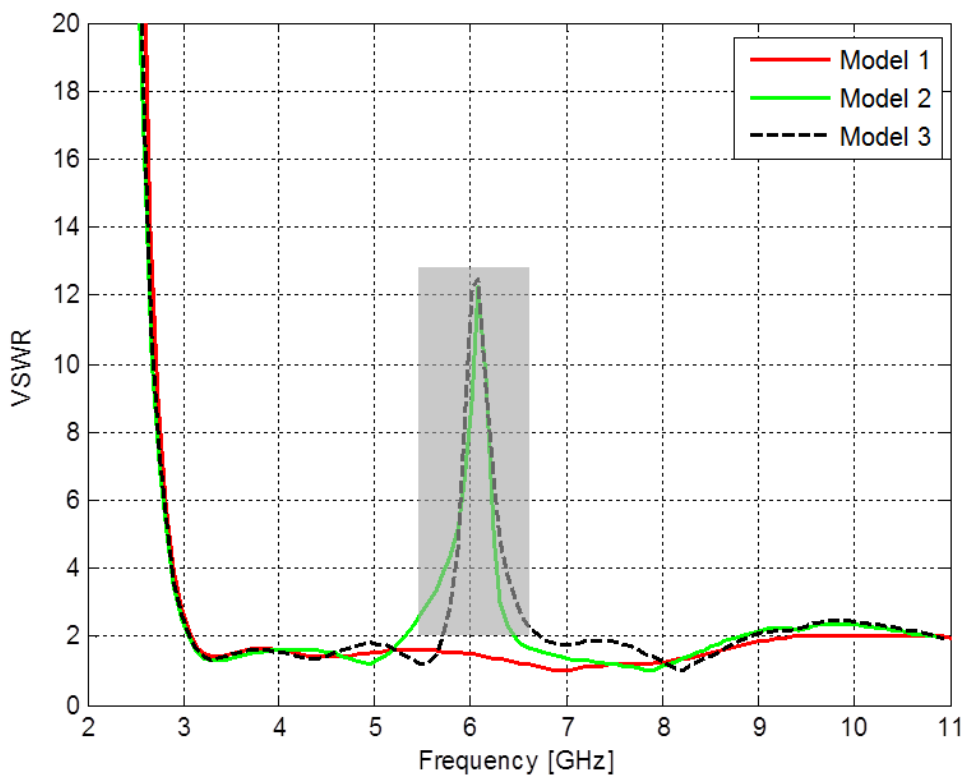


მოდელი 5

6.3 შედეგები

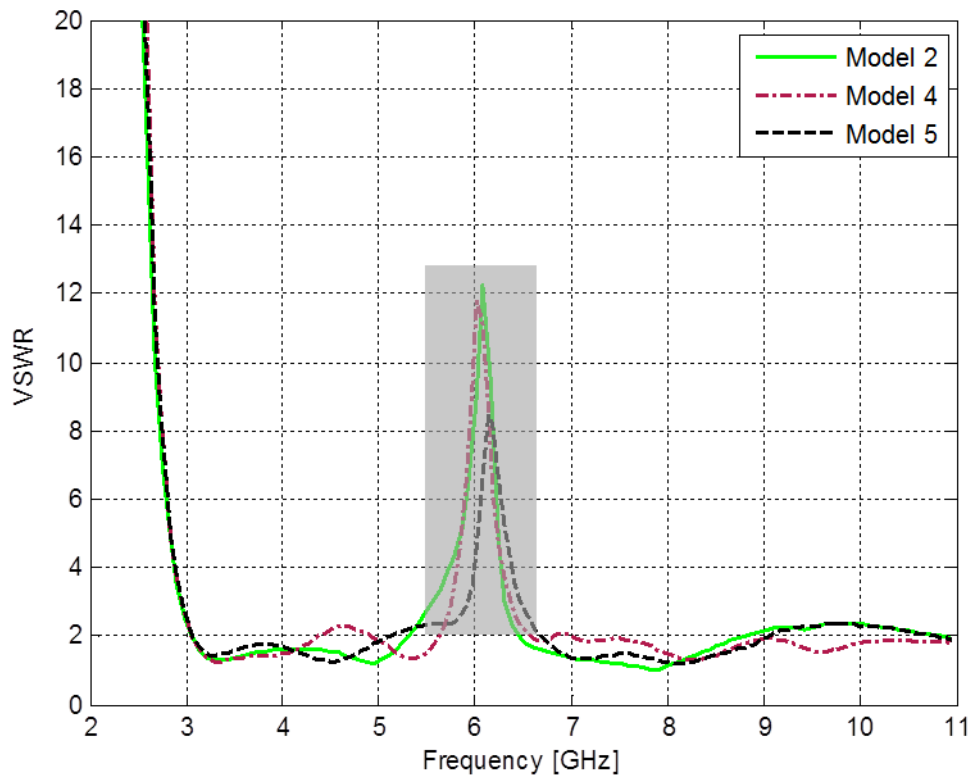
U ფორმის ჭრილის ადგილმდებარეობის მნიშვნელობის დასადგენას შედარდა აღნიშნული მოდელების კომპიუტერული სიმულაციით მიღებული მდგარი ტალღის კოეფიციენტის სიხშირეზე დამოკიდებულების გრაფიკები.

გრაფიკი 18. -ზე შედარებულია მოდელი 1-ის, 2-ისა და 3-ის შედეგები.



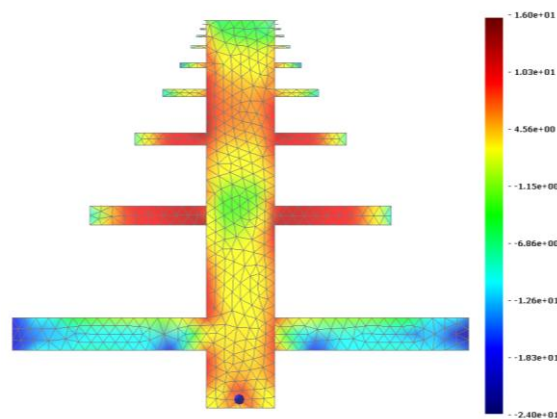
გრაფიკი 18. მდგარი ტალღის კოეფიციენტის დამოკიდებულება სიხშირეზე

გრაფიკი 19. -ზე შედარებულია მოდელი 1-ის, 2-ისა და 3-ის შედეგები.

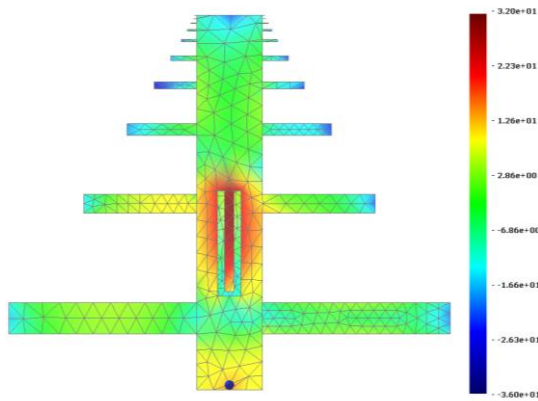


გრაფიკი 19. მდგარი ტალღის კოეფიციენტის დამოკიდებულება სიხშირეზე

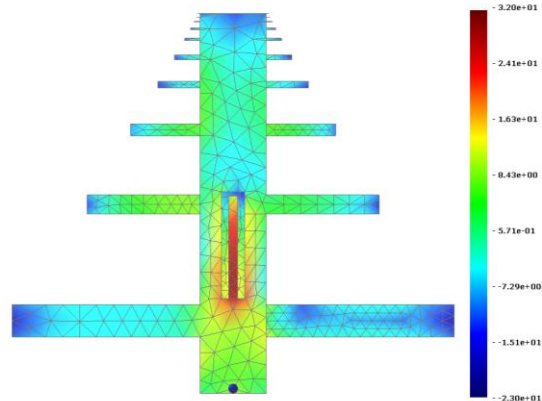
სურათი 29. -ზე, სურათი 30. -სა და სურათი 30. -ზე ნაჩვენებია ანტენაზე დენის განაწილების სურათები 6 GHz-ზე.



სურათი 29. მოდელი 1-ისთვის დენის განაწილება 6 GHz-ზე [dB]



სურათი 30. მოდელი 2-ისთვის დენის
განაწილება 6 GHz-ზე [dB]



სურათი 31. მოდელი 3-ისთვის დენის
განაწილება 6 GHz-ზე [dB]

6.4 განხილვა

გრაფიკი 18. ცხადყოფს, რომ U ფორმის ჭრილის დამატება ლოგო პერიოდული ანტენის მთავრ ღერძში, მართლაც რომ მუშაობს და ასრულებს თავის ფუნქციას. 6GHz-ზე (± 0.5 GHz) ულტრაფართოზოლოვანი ანტენების გატარების ზოლში არის აკრძალული ვიწრო სიხშირეთა დიაპაზონი, რაც გამოწვეულია U ფორმის ჭრილზე რეზონანსით. ჭრილის პირის მიმართულებას არსებით მნიშვნელობა არ გააჩნია. რეზონანსული სიხშირე უცვლელი რჩევა, მაგრამ მცირედიტაა წანაცვლებული აკრძალული სიხშირეთა დიაპაზონი.

გრაფიკი 19. -დან გამომდინარე შეიძლება ითქვას, რომ U ფორმის ჭრილის მდებარეობას ანტენის მთავარ ღერძში არ აქვს გადამწყვეტი მნიშვნელობა. მიუხედავად მისი ადგილმდებარეობის დაახლოებით 6GHz-ზე მაინც ხდება რეზონანსი.

ცხრილში ჩამოთვლილია აკრძალვის ზონის სიხშირეები თითოეული მოდელისათვის.

მოდელი 2 [GHz]	მოდელი 3 [GHz]	მოდელი 4 [GHz]	მოდელი 5 [GHz]
5.3 - 6.4 (18%)	5.7 - 6.7 (16%)	5.6 - 6.6 (16%)	5.2 - 6.6 (23.7%)

U ფორმის ჭრილზე რეზონანსისა დენი კონცენტრირდება ჭრილის კიდეზე. ამ დროს რეზონანსული სიხშირის შესაბამისი დიპოლი მუშაობას წყვეტს და აღარ ასხივებს ველს.

7 დასკვნა

აღნიშნულ ნაშრომში განხილულია და შესწავლილია ბრტყელი და დაფენილი ანტენები, ლოგო პერიოდული და მართკუთხა ბრტყელი ანტენების მაგალითზე. გამოკვლეულია ფირფიტაში U ფორმის ჭრილის დამატების ფუნქციონალურობა და ანტენის მახასიათებლებზე გავლენა. განხილულია ფართოზოლოვანი მართკუთხა ბრტყელი ანტენა და ნაჩვენებია, რომ ფირფიტაში U ფორმის ჭრილის დამატებით მიიღება ორზოლოვანი და სამზოლოვანი ბრტყელი ანტენები.

ლოგო პერიოდული დაბეჭდილი ანტენისათვის AARONIA AG HyperLOG 60100 შექმნილია კომპიუტერული მოდელი და პროგრამული უზრუნველყოფა EMCoS Antenna VLab-ის მეშვეობით შესწავლილია სიგანეში შემცირების მიდგომა. ნაჩვენებია, რომ 30°-მდე დიპოლების დახრა მთავარი ღერძის მიმართ არ ცვლის ანტენის პარამეტრებს მნიშვნელოვნად და ამცირებს ანტენის სიგანეს 3სმ-ით.

კვლევა ასევე მოიცავს ლოგოპერიოდული დაფენილი ანტენის გატარების ზოლში (3.1GHz - 11GHz) გარკვეული აკრძალული სიხშირის (6GHz) დამატებას, გაფილტვრას. ეს განხორციელებულია U ფორმის ჭრილის დამატებით ანტენის მთავარ ღერძში. შედეგებზე დაყრდნობით მიღებულია რომ U ფორმის ჭრილის მდებარეობას მთავარ ღერძში არ აქვს არსებითი მნიშვნელობა.

ნაშრომის მიზნები შესრულებულია მიღებულია, კარგი შედეგები და გაკეთებულია შესაბამისი დასკვნები.

გამოყენებული ლიტერატურა

- [1] G. Kumar and K. P. Ray, "Broadband Microstrip Antennas", Artech House, Boston, London, UK, 2003.
- [2] T. Huynh and K. F. Lee, "Single-Layer Single-Patch Wideband Microstrip Antenna", *Electronics Letters*, 31, 16, 1995, pp. 1310-1312.
- [3] K. F. Tong, K. M. Luk, K. F. Lee and R. Q. Lee, "A Broadband U-slot Rectangular Patch Antenna on a Microwave Substrate", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, AP-48, 6, 2000, pp. 954-960.
- [4] K. F. Lee, S. L. Steven Yang, A. A. Kishk, K. M. Luk, "The Versatile U-Slot Patch Antenna", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 52, 1, February 2010, pp. 71-88.
- [5] C. L. Mak, K. M. Luk, K. F. Lee, Y. L. Chow, "Experimental Study of a Microstrip Patch Antenna with an L-Shaped Probe", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 48, 5, May 2000, pp. 777-783.
- [6] Kin-Lu Wong, "Compact and Broadband Microstrip Antennas", John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 2002.
- [7] A. K. Shackelford, K. F. Lee, K.M. Luk, "Design of Small-Size Wide-Bandwidth Microstrip-Patch Antennas", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 45, 1, February 2003, pp. 75-83.
- [8] K. Siakavara, „Methods to Design Microstrip Antennas for Modern Applications“, InTech, 2011, Chapter 9.
- [9] S. Weigand, G. H. Huff, K. H. Pan, J. T. Bernhard, "Analysis and Design of Broad-Band Single-Layer Rectangular U-Slot Microstrip Patch Antenna", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 51, 3, March 2003, pp. 457-468.
- [10] A. A. Deshmukh, K. P. Ray, "Formulation of Resonance Frequencies for Dual-band Slotted Rectangular Microstrip Antennas", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 54, 4, August 2012, pp. 78-97.
- [11] C. A. Balanis, "Antenna Theory Analysis and Design", John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, Third Edition, 2005.
- [12] J. S. Hesthaven and T. Warburton. "High-order unstructured grid methods for time-domain electromagnetics", 2004.
- [13] J. S. Hesthaven and T. Warburton. "Nodal Discontinuous Galerkin Methods", Springer, New York, USA, 2008.
- [14] R. F. Harrington. "Field Computation by Moment Methods", Wiley-IEEE Press, USA, 1993.
- [15] J. Papapolymerou, M. Tentzeris and C. G. Christodoulou, "A Printed Log-Periodic Koch-Dipole Array (LPKDA)", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 7, 2008, pp. 456-460.
- [16] W. Hong, L. Chiu, G. Zhai, C. Yu, W. Qin and Z. Kuai, "Ultrawideband Printed Log-Periodic Dipole Antenna with Multiple Notched Bands", *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 59, 3, March 2011, pp. 725-732.