

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
FIZIKOS FAKULTETAS  
CHEMINĖS FIZIKOS INSTITUTAS

Rolanda Blinovaite

NANOPALYDOVO IŠSKLEIDŽIAMOSIOS ORIGAMI ANTENOS TYRIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

(studijų programa – Telekomunikacijų fizika ir elektronika)

Studentė  
Vadovas  
Recenzentas  
Instituto direktorius

Rolanda Blinovaite  
dr. Liudas Tumonis  
doc. dr. Mindaugas Viliūnas  
dr. (HP) Valdas Šablinskas

Vilnius 2020

# Turinys

Įvadas .....	2
1. Literatūros apžvalga .....	3
1.1. Nanopalydovai ir jų komunikacijos sistemos .....	3
1.2. Pagrindiniai antenų parametrai.....	5
1.3. Nanopalydovų antenos .....	6
1.4. Ruporinė antena.....	7
1.5. Origami ir išsilankstančių struktūrų inžinerija .....	10
1.6. Origami matematikos pagrindai .....	11
1.7. Kresling origami geometrija.....	13
1.8. Origami antenų prototipų apžvalga .....	16
2. Tyrimo metodika .....	18
3. Tyrimo rezultatai .....	20
3.1. K-dažnių juostos kūginė ruporinė antena.....	20
3.2. K-dažnių juostos origami ruporinė antena .....	23
3.3. Origami antenos prototipavimas .....	25
Išvados .....	27
Literatūros šaltinių sąrašas .....	28
Summary .....	31
1 Priedas. Beselio funkcijų vertės .....	32

## Įvadas

Nanopalydovų rinka yra pakankamai nauja (šiuo metu jai yra apie 20 metų [1]), tačiau pastaraisiais metais ji patyrė smarkų augimą. Pradiniai nanopalydovų naudojimo tikslai buvo moksliniai ir nekomercinis Žemės stebėjimas, tačiau dabar jie skinasi kelią ir į komercines rinkas, tokias kaip technologijų demonstravimas ir testavimas, telekomunikacijos, daiktų internetas. Jau ne viena ryšio paslaugų įmonė planuoja arba pradėjo įgyvendinti daugiau nei šimto ar net tūkstančio nanopalydovų spiečius, kurie galėtų aprėpti visą Žemę, taip užtikrindami nenutrūkstamą ryšį net ir nutolusiose vietovėse [2].

Didelis rinkos augimas yra pagrįstas mokslui ir verslui itin svarbiais privalumais. Pagrindiniai privalumai yra tie, jog nanopalydovų paleidimui į kosmosą reikalingi žymiai mažesni kaštai bei ženkliai trumpesnis pasiruošimo laikas lyginant su iki šiol paplitusiais didesniais palydovais.

Nors nanopalydovai turi ženklių privalumų, tačiau kuriant jų dizainą susiduriama ir su tam tikrais trūkumais. Viena iš pagrindinių problemų, kuriai sprendimas siūlomas ir šiame darbe, yra ta, jog nanopalydovai yra apriboti dydžio ir masės standartu [3]. Tačiau, šio standarto svarbiausia laikytis paleidžiant palydovą, nes paleidimo raketoje tokiems palydovams skirtas ribotas tūris. Taip yra, nes nanopalydovai dažniausiai yra antrinis krovinys [4], užimantis likusią laisvą vietą nuo pirminio krovinio – didžiųjų geostacionariųjų palydovų. Nanopalydovui jau skriejant orbitoje, standarto dydžio apribojimai jau nebeturi tokios didelės reikšmės, todėl nanopalydovas savo viduje gali talpinti struktūras, kurios esant orbitoje išsiskleidžia į išorę. Tokių struktūrų pavyzdžiai – tai antenos, fotoelektriniai elementai, vadinamosios saulės burės ar kitos struktūros.

Projektuojant išsilankstančią struktūrą, svarbiausia atkreipti dėmesį į du pagrindinius aspektus. Savaiame aišku, jog siekiama kuo mažesnių matmenų ir tūrio struktūrą išlankstyti į kuo didesnių matmenų ir tūrio struktūrą, t.y. matmenų po ir prieš transformaciją santykis turi būti kuo didesnis. Antrasis aspektas yra tas, jog išlankstyta struktūra turi būti pakankamai tvirta. Tai reiškia du dalykus: reikalinga kruopščiai parinkti medžiagas iš kurių struktūra pagaminta ir turi būti užtikrinta, jog lenkimo vietos ir sujungimai nedarys įtakos išankstinei struktūros deformacijai ar degradacijai.

Menininkų, matematikų ir inžinierių dėmesį XX a. patraukė origami meno pritaikymas įvairiose mokslinėse ir techninėse srityse. Matematiškai aprašius origami struktūras paaiškėjo, jog jos pasižymi geru standumu, origami sistemos yra labai tinkamos ten, kur reikalingas išsilankstomumas, sutraukiamumas, kompaktiškumas [37]. Be architektūros, robotikos, medicinos ir kitų sričių, origami turi didelį potencialą ir telekomunikacijų sferoje kuriant išsilankstančias antenas mažiesiems palydovams. Literatūroje jau aptinkama spiralinių ([36], [38]), mikrojuostelinių [50], monopolinių [51] ir dipolinių [52] origami antenų prototipų.

**Šio darbo tikslas yra suprojektuoti origami pagrindu išsilankstančią ruporinę anteną tinkamą naudoti nanopalydove ir skaitiniais metodais ištirti jos savybes.**

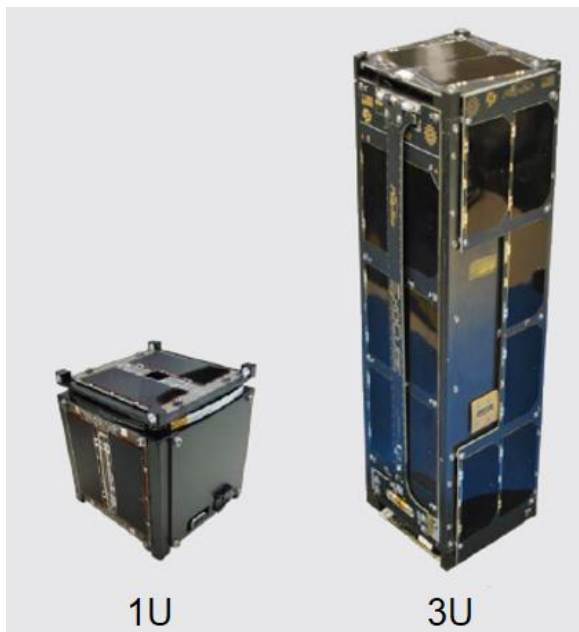
Raktiniai žodžiai: origami antenos, origami inžinerija, nanopalydovai, išsilankstančios antenos, ruporinė antena.

# 1. Literatūros apžvalga

## 1.1. Nanopalydovai ir jų komunikacijos sistemos

Nanopalydovai išpopuliarėjo apytiksliai nuo 1999 metų, kuomet Kalifornijos politechnikos universitete (Cal Poly) buvo sukurta „CubeSat dizaino specifikacija“ [3]. Pagrindinis šio projekto tikslas tuomet buvo platinti žinią, jog universitetų ir mokslo bendruomenė taip pat gali naudotis kosmoso ištekliams net neturėdami didelių lėšų, reikalingų įprastiems palyovams paleisti ir eksploatuoti. Taip pat dėl greitesnės gamybos ir kompaktiškumo, tai reiškė, jog nuo šiol galima atlikti pavienius kosmoso tyrimus ir žymiai greičiau gauti rezultatus.

Pagal minėtąją specifikaciją, nanopalydovo blokas yra apie  $\leq 10$  cm kraštinės kubas, kurio svoris  $\leq 1,33$  kg [3]. Tai nėra griežtai nustatyti apribojimai, tačiau rekomenduojama jų laikytis, nes paleidimo raketose nanopalydovams paskirta vieta būtų pagal šį standartą. Be to, laikantis standarto, kuriant naują palydovą, nereikia atlikti daug naujų dizaino procedūrų, kas taip pat mažina kaštus ir didina įgyvendinimo paprastumą ir greitį [5]. Nanopalydovo dydis yra apibūdinamas tokio dydžio ir masės blokų skaičiumi. Pradžioje buvo gaminami 1U, 2U, 3U dydžio nanopalydovai (1 pav.), tačiau šiandien paplitę ir 6U, 8U, 12U, 16U ir net 27U palydovai [6].



1 pav. 1U (10x10x11 cm) ir 3U (10x10x34 cm) nanopalydovų pavyzdžiai [1]

Mažųjų palydovų įgyvendinimo galimybę sąlygojo skaitmeninių signalų apdorojimo technologijų, integrinių grandynų, MEMS sistemų, mažos galios programuojamų sistemų tobulėjimas. Visi šie veiksniai sumažino elektronikos dydį ir galios suvartojimą [5].

Nors pradėti gaminti mokslo tikslams, nanopalydovai greitai rado savo vietą ir komercinėje sferoje, kuri dabar užima jau gerokai daugiau negu pusę visos nanopalydovų rinkos [6]. Jie populiarėja ne tik dėl mažesnės kainos, bet ir kitų privalumų, tokių kaip mažesnis atstumas iki žemės (tokie palydovai dažniausiai yra leidžiami į žemąją Žemės orbitą), draugiškumas aplinkai, didesnis tinkamumas tam tikriems pritaikymams, įgyvendinimo greitumas. Pavyzdžiui, nanopalydovo gamybos ir paruošimo paleidimui laikas palyginti trumpas: apytiksliai tarp 6 mėn. iki poros metų, palyginus su tuo, jog geostacionarių palydovų paruošimas gali trukti ir 10 metų [1]. Nanopalydovai dažniausiai pritaikomi tokiose srityse, kaip [7]:

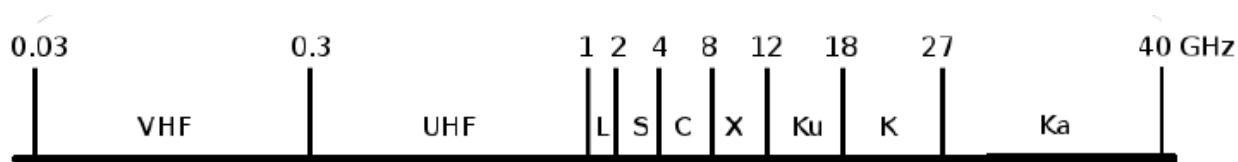
- Žemės stebėjimas. Nanopalydovai dažniausiai yra leidžiami į žemąją Žemės orbitą, todėl juose patalpinus aukštos kokybės kameras, galima pasiekti didelę Žemės nuotraukų rezoliuciją. Žemės stebėjimo nanopalydovų informacija gali būti naudojama katastrofų

valdymui, orų prognozių nustatymui, gamtos ir klimato kaitos tyrinėjimui, komunikacijų tinklų planavimui, urbanistikos studijoms, agrikultūros reikmėms, transporto sistemų planavimui ir optimizavimui, kartografijai [7]. Pritaikymų ratas nuolat plečiasi.

- Mokslinės ar eksperimentinės misijos. Dažnai mokslininkai norėdami iširti pavienius reiškinius naudoja nanopalydovus – juos galima greitai paruošti, jų maži kaštai. Be to, norint iširti tam tikrus reiškinius nereikalingos ilgos misijos (užtenka iki 3-5 metų), todėl nanopalydovai gerai atitinka reikalavimus. Mokslines kosmoso misijas Tarptautinė telekomunikacijos sąjunga (ITU, angl. International Telecommunications Union) apibūdina kaip fundamentinių fizikos dėsnių tyrimus Saulės sistemoje, kurie gali žmonėms suteikti informacijos, reikalingos norint sukurti naujas arba patobulinti esamas technologijas [9]. Taip pat atliekamos ir nebūtinai mokslinės, tačiau komercinės technologijų demonstravimo – eksperimentinės misijos, kurių metu yra tikrinama, ar gali būti tinkamai suteikta tam tikra paslauga.
- Telekomunikacijos, daiktų internetas. Šiuo metu ne viena pasaulio įmonė planuoja leisti nanopalydovų spiečius, kurie užtikrintų ryšio padengimą viso pasaulio mastu [10]. Tai leistų užtikrinti ryšį su nutolusiomis, kaimo vietovėmis, kurios yra neapartnaujamos antžeminių tinklų. Taip pat populiaru tema nanopalydovų sferoje yra daiktų internetas – galimybė sujungti daug nutolusių jutiklių į vieną tinklą, norint užtikrinti išmanų natūralių bei žmogaus sukurtų ir valdomų išteklių naudojimą [11].

Be daugelio nanopalydovų privalumų, jie turi ir trūkumų. Vienas akivaizdžiausių yra tūrio trūkumas norint sutalpinti visus elementus, kurie užtikrina tinkamą palydovo veikimą. Nanopalydovų energijos šaltinis yra fotoelektriniai elementai, tačiau dažnai jo posistemoms maitinti nepakanka vien palydovo paviršiaus ploto padengimo. Taip pat, radijo ryšio antenos matmenys yra tiesiogiai susijusios su persiuntimo dažniu, todėl itin svarbu apgalvoti kokio dizaino antena bus naudojama komunikacijoms su nanopalydovu.

Komunikacijų sistema nanopalydove yra esminė dalis, kadangi užtikrina bendravimą tarp Žemės ir palydovo, komandų bei surinktos informacijos persiuntimą. Parenkant nanopalydovo antenos dažnį, svarbu apgalvoti ne tik antenos dizainą, tačiau būtina atkreipti dėmesį ir į ITU radijo reglamentą bei vietinius ir tarptautinius susitarimus, kadangi norint komunikuoti su palydovu radijo bangomis, reikalingas oficialus leidimas – radijo dažnis yra labai ribotas ir svarbus išteklius. Nepaisant to, radijo dažniams yra priskirtinos tam tikros paslaugos, todėl ne visi radijo dažniai yra tinkami komunikacijai su kosmosu [12]. Kosmoso komunikacijų sistemoms pritaikomi dažniai iš 2 pav. pavaizduotų dažnių juostų.



2 pav. Dažnių juostos, naudojamos kosmoso komunikacijų sistemose [12]

Dažniausiai nanopalydovuose naudojamos antenos, kurių dažniai, pagal ITU Radijo reglamentą, yra priskirtini palydovinei Žemės tyrimo, meteorologinei, kosmoso tyrimo tarnyboms. Tai gali būti UHF (pvz., 401 – 403 MHz), S-juostos (pvz., 2025 – 2110 MHz), X-juostos (pvz., 8025 – 8400 MHz) ir aukštesni dažniai [12].

Pastaraisiais metais smarkiai daugėjo ne tik pavienių mažųjų palydovų, tačiau ir jų sistemų bei spiečių skaičius [40]. Leidžiant į kosmosą palydovų spiečius, atsiranda poreikis ne tik komunikacijai tarp kosmoso ir Žemės, tačiau ir tarppalydoviniam ryšiui. Įvedus tokį ryšį, spiečiaus palydovai gali tarpusavyje keistis informacija apie vienas kito parametrus, gali būti žymiai sumažinamas delsos laikas perdavus informaciją arčiau Žemės stoties esančiam palydovui. ITU Radijo reglamento dažnių lentelėje [12] tarppalydovinio ryšio paskirtis gali būti priskiriama įvairioms dažnių juostoms, tačiau galima būtų išskirti K juostos dažnius:

1. 22,55-23,15 GHz
2. 23,15-23,55 GHz
3. 24,45-24,75 GHz
4. 25,25-25,50 GHz

Ši dažnių juosta yra šiuo metu yra labai patraukli, nes galima pasiekti didelius informacijos persiuntimo greičius, jos naudojimas yra dar nedaug paplitęs, todėl mažesnė interferencijos tikimybė.

## 1.2. Pagrindiniai antenų parametrai

Antena yra įtaisas laisvai sklindančioms radijo bangoms spinduliuoti ir priimti [13]. Radijo bangos yra tokios elektromagnetinės bangos, kurių dažnių diapazonas yra nuo 3 kHz iki 300 GHz [12]. Antena yra apgręžiamas įtaisas – galima tiek siųsti, tiek priimti, nes dažniausiai ji būna sudaryta iš tiesinių pasyviųjų elementų [13]. Aptarsime pagrindinius elektrinius antenų parametrus.

Izotropinė antena spinduliuoja visomis kryptimis vienodai. Antena gali pasižymėti kryptingumu – tai reiškia, jog maksimali antenos spinduliavimo galia yra nukreipta erdviu kampu tam tikra kryptimi. Antenos stiprinimas nurodo, kokia galia yra spinduliuojama tam tikru kampu, palyginus su izotropinės antenos išspinduliuojama galia. Antenos spinduliavimo charakteristikos yra atvaizduojamos stiprinimo diagramoje dvimatėje arba trimatėje erdvėje [14]. Pagrindinė antenos spinduliavimo kryptis, kuria išspinduliuojama daugiausiai energijos vadinama pagrindiniu antenos lapeliu. Nors antena yra kryptinė, jos spinduliavimo diagrama dažniausiai turi ir šoninius lapelius – lokalius spinduliavimo diagramos maksimumus nepagrindine kryptimi. Lapelio plotis – tai kampas tarp kryptingumo diagramos stiprinimo lygių, 3 dB mažesnių už maksimalų (t.y. esant pusei maksimalios spinduliavimo galios). Iš čia kyla dar vienas parametras – pagrindinio lapelio (arba spindulio) efektyvumas  $BE$  (angl. beam efficiency). Tai yra santykis pagrindinio lapelio išspinduliuojamos galios ir suminės antenos išspinduliuojamos galios [14]. Siekiama, kad šis santykis būtų kuo artimesnis vienetui, kadangi šalutiniai lapeliai yra nepageidaujami.

Antenos spinduliavimo galia – tai negrįžtamai išspinduliuojamos radijo bangos aktyvinė galia [13]. Šios galios vertė randama tolimojoje zonoje suintegrus Pointingo vektorių uždaru paviršiumi:

$$P_s = \oint_S \Pi dS \quad (1)$$

Tolimoji zona, tai tokia zona, kai tenkinama sąlyga  $d \ll \lambda \ll r$ , t.y. antenos matmenys  $d$  žymiai mažesni už bangos ilgį, o bangos  $\lambda$  ilgis žymiai mažesnis, negu atstumas  $r$ , kuriuo nutolęs yra imtuvas [15]. Artimoji zona aprašoma, kai tenkinama sąlyga  $d \ll r \ll \lambda$ .

Antenos spinduliavimo varža yra spinduliuojamosios galios koeficientas [13]. Šis parametras nėra traktuojamas kaip rezistyvinių elemento parametras. Antenos spinduliuojamoji galia ir tekanti srovė yra susiejamos tokiu dėsnio, kur  $R_s$  ir yra spinduliavimo varža:

$$P_s = \frac{R_s I^2}{2} \quad (2)$$

Antenos juostos plotis – dažnių ruožas, kuriame antena gali veikti pageidaujama parametrais [14]. Antenos poliarizacija nusako, kaip poliarizuotas bangas duotoji antena gali priimti ir spinduliuoti. Esant radijo bangos ir imtuvo antenos poliarizacijos tipo neatitikimui, priimant bus patirti poliarizacijos nuostoliai.

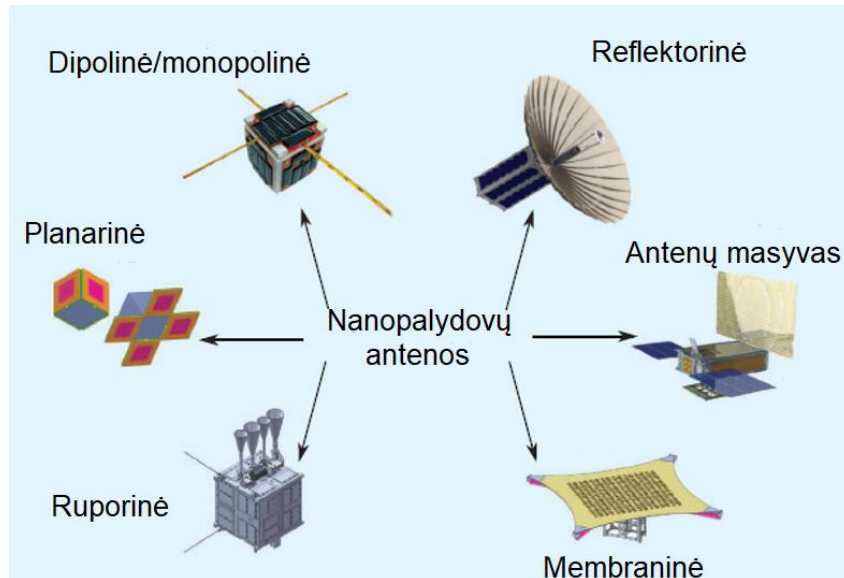
### 1.3. Nanopalydovų antenos

Išskirsime pagrindinius iššūkius kuriant mažųjų palydovų antenas, kuriais ir remsimės nagrinėdami įvairius antenų tipus ir galimus jų pritaikymus [16]:

- Antena turi būti itin didelio patikimumo, nes pakeisti ją palydovui esant orbitoje dažniausiai nėra galimybės.
- Antena turi būti labai mažų matmenų (atsižvelgiant į nanopalydovo standartą). Didinant duomenų perdavimo spartą, reikalingos didesnio stiprinimo antenos. Antenos dydis yra proporcingas antenos stiprinimui, todėl projektuojant antenas mažiems palydovams būtina rasti kompromisą tarp kokybės ir dydžio bei svorio standartų [5].
- Antena turi būti mažos masės, didelio efektyvumo, mažos kainos.
- Antena turi būti mechaniškai atspari atsitiktinėms vibracijoms, mechaniniams smūgiams palydovo paleidimo metu.
- Turi būti įvertintos antenos terminės savybės, tipiškai yra kuriamos tokios antenos, kurios veikia  $[-150^{\circ}\text{C}; +150^{\circ}\text{C}]$  intervale.
- Antena turi būti atspari kosmoso sąlygoms, tokioms kaip jonizuojanti spinduliuotė, kosminė spinduliuotė.
- Žemos orbitos (LEO, angl. *Low Earth Orbit*) misijose, turi būti atkreiptas dėmesys į atsparumą atominiam deguoniui.
- Antena turi gerai veikti vakuumo ir mikrogravitacijos sąlygomis.
- Antena neturi kelti trukdžių palydovo krovinių ir kitų posistemų veikimui. Taip pat ir atvirkščiai, reikia būti įsitikinusi, jog kitos posistemės netrukdo sklandžiam antenos veikimui. Todėl projektuojant svarbu anteną patalpinti palydovo išorėje ir kaip įmanoma toliau nuo kitų posistemų.
- Jei antena išsilankstanti, ji turi išsilankstyti ne per anksti (tuomet palydovas gali užstrigti paleidimo mechanizme) ir ne per vėlai (gali sutrikti ryšio užmezgimas su palydovu).



Nanopalydovuose naudojamos dipolinės/monopolinės, ruporinės, parabolinės, planarinės, membraninės antenos, plyšinės (3 pav.). Vis dėlto, verta pažymėti, jog dažnas tokių antenų dizainas jau yra siūlomas rinkoje, dar net išbandžius realiomis kosmoso sąlygomis, todėl visuomet lieka klausimas ar pasiūlyti dizainai iš tiesų bus tinkami naudojimui [17].



3 pav. Nanopalydovų komunikacijai naudojamų antenų pavyzdžiai [17]

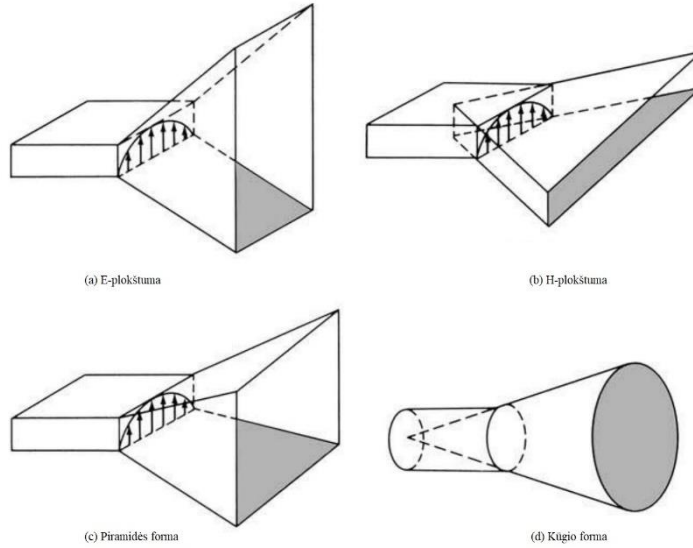
Dipolinės ir monopolinės antenos nanopalydovuose yra dažnai naudojamos, nes yra pigios, paprasto dizaino, kompaktiškos. Tačiau pritaikomos paprastai VHF ir UHF dažnių juostose, o spinduliavimo diagramos yra mažo kryptingumo, taip pat nedidelis ir stiprinimas [5], [19]. Spiralinės antenos yra dažnai naudojamos orų nustatymo, GPS, radijo teleskopų, Žemės stočių palydovų sekimui sistemose [18], šios antenos keliavo ir į Mėnulį bei Marsą. Tokios antenos yra apskritiminės arba artimos jai poliarizacijos, su palyginti dideliu stiprinimu ir paprasta gamyba. Ruporinės antenos dažnai montuojamos mažuosiuose palydovuose, kurie veikia aukštais dažniais (mikrobangų srityje). Jie pasižymi paprasta konstrukcija, sužadinimo paprastumu, dideliu stiprinimu ir kryptingumu, efektyviu veikimu [14].

#### 1.4. Ruporinė antena

Ruporinė antena iš esmės yra bangolaidis išplatintu galu (apertūrinė antena). Tokios antenos dažnai pasižymi geru kryptingumu, dideliu stiprinimu ir yra plačiai pritaikomos mikrobangų diapazone. Taip pat patraukli paprasta jų konstrukcija. 4 pav. pavaizduotos pagrindinės ruporinės antenos formos. Naudojant stačiakampį bangolaidį, išplatėjimas gali būti elektrinio lauko plokštumos kryptimi (a), magnetinio lauko plokštumos kryptimi (b) arba abiem kryptimis (c). Naudojant apvalųjį bangolaidį, ruporinė antena yra kūgio formos (d).

Kūginė ruporinė antena gali būti tiesiogiai žadinama apvaliuoju bangolaidžiu. Elektromagnetiniai tokios antenos laukai buvo išvesti [43]. Modų pasiskirstymas yra randamas naudojant sferinę koordinačių sistemą ir aprašomas Beselio funkcijomis ir Ležandro polinomais. Pagrindiniai tokios antenos geometriniai parametrai yra žadinančiojo bangolaidžio spindulys  $r_b$ , antenos spindulys  $r$  ir antenos ilgis  $L$ .





4 pav. Ruporinės antenos formos [14]

Apvaliuoju bangolaidžiu sklindančių modų atkirtos dažniai yra randami naudojant Beselio funkcijas [41]:

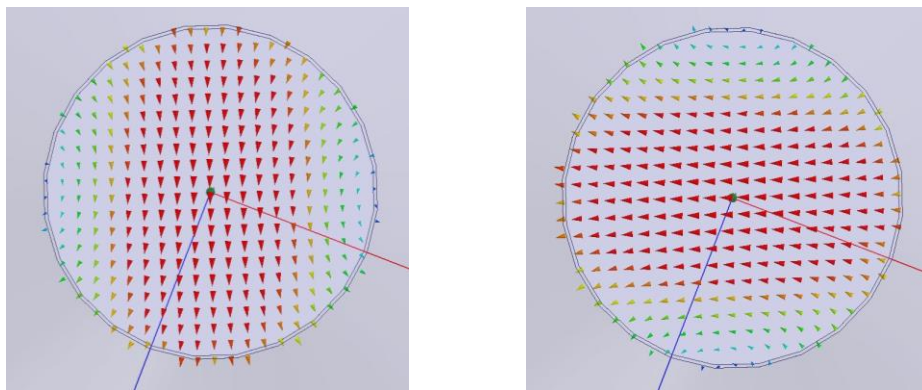
$$f_{c,mn} = \frac{v}{2\pi} \beta_{c,mn} \quad (3)$$

kur  $v$  – bangos sklidimo greitis (kosmose – šviesos greitis),  $\beta_{c,mn}$  – atkirtos fazės konstanta, kuri yra apskaičiuojama:

$$\beta_{c,mn} = \frac{\chi'_{mn}}{r_b}, \text{ TE modoms,} \quad (4)$$

$$\beta_{c,mn} = \frac{\chi_{mn}}{r_b}, \text{ TM modoms.} \quad (5)$$

kur  $r_b$  – apvaliojo bangolaidžio spindulys,  $\chi_{mn}$  – Beselio funkcijos šaknis.

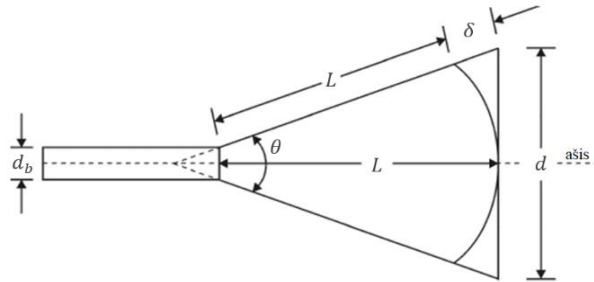


5 pav. TE<sub>11</sub> ir TM<sub>01</sub> modų elektrinio lauko pasiskirstymas bangolaidžio gale

Beselio funkcijų šaknų vertės yra pateiktos 1 Priede. Be to, svarbu atkreipti dėmesį į tai, jog norint užtikrinti gerą perdavimą, reikia kontroliuoti susidarančių elektromagnetinių bangų modų skaičių. Siekiama, jog bangolaidžiu sklistų tik pagrindinės modos, o šalutinės modos

nesusidarytų. Dominuojanti apskritojo bangolaidžio moda yra  $TE_{11}$ , antroji yra  $TM_{01}$  (5 pav.) [42]. Tokiu atveju žadinančiojo bangolaidžio diametras  $d_b$  turėtų būti lygus  $(0,5 - 1)\lambda$  [18].

Projektuojant ruporinę anteną, yra pritaikomas Ferma principas, tačiau ne taip griežtai. Reikalavimas išlaikyti pastovią fazę išilgai ruporo yra keičiamas reikalavimu, jog fazė gali svyruoti, tačiau ne daugiau nei nustatytas  $\delta$  parametras (6 pav.), kuris yra lygus kelių, kuriuos nueina banga keliaujanti palei ruporo sienelę ir banga, keliaujanti išilgai ruporo ašies, skirtumui. Jei šio parametro vertė pakankamai maža, laikoma jog fazė yra beveik vienoda išilgai visos ruporo apertūros.



6 pav. Ruporinės antenos skersinis pjūvis ir analizėje naudojami geometriniai parametrai [44]

Iš ruporo geometrijos (6 pav.), galime užrašyti:

$$\begin{aligned} \cos \frac{\theta}{2} &= \frac{L}{L+\delta} \\ \sin \frac{\theta}{2} &= \frac{d}{2(L+\delta)} \\ \tan \frac{\theta}{2} &= \frac{a}{2L} \end{aligned} \quad (6)$$

kur  $\theta$  – ruporo skėsties kampas,  $L$  – ilgis ašies kryptimi,  $d$  – diametras.

Ferma principui patenkinti, siekiama jog  $\delta$  parametro vertė būtų kaip įmanoma mažesnė, tačiau tokiu atveju ruporo ilgis  $L$  būtų labai didelis. Praktiniuose pritaikymuose siekiama, kad ruporo ilgis būtų kuo mažesnis (užimtų kuo mažiau tūrio), tad reikalinga rasti optimalius geometrinius parametrus.

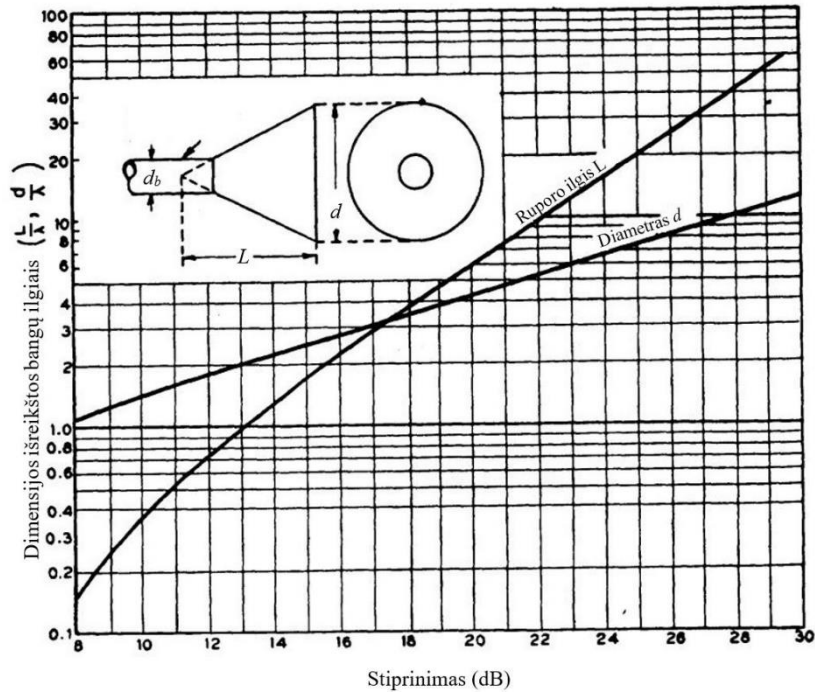
Jei ruporo ilgis  $L$  yra fiksuotas, didinant skėsties kampą  $\theta$  (ir tuo pačiu ruporo diametrą  $d$ ), antenos kryptingumas didėja. Visgi, toliau didinant skėsties kampą  $\theta$ , apertūros krašte elektromagnetinio lauko fazė tampa priešinga ir dėl to kryptingumas pradeda mažėti [18]. Optimali ruporo geometrija apskaičiuojama iš šios sąlygos (iš (6)):

$$L = \frac{\delta_0 \cos \frac{\theta}{2}}{1 - \cos \frac{\theta}{2}} \quad (7)$$

Paprastai  $\delta_0$  vertė patenka į  $(0,1 - 0,4)\lambda$  diapazoną (laisvoje erdvėje) [18]. Tinkamiausia  $\delta_0$  vertė taip pat gali skirtis priklausomai nuo ruporinės antenos tipo. Kūginei ruporinei antenai paprastai  $\delta_0 = 0,32\lambda$ .

7 pav. pavaizduotos ruporo ilgio  $L$  ir diametro  $d$  priklausomybės nuo norimo antenos stiprinimo. Pavyzdžiui, jei norima suprojektuoti 20 dB stiprinimo pagrindine kryptimi kūginę ruporinę anteną, turime pasirinkti tokius parametrus, jog  $\frac{L}{\lambda} = 6,0$ ;  $\frac{d}{\lambda} = 4,3$ . Projektuojant ruporinę

antena patariama vadovautis šiuo grafiku, nes naudodami pateiktas vertes pasieksime kompaktiškumo ir stiprinimo maksimumą [42].



7 pav. Optimalių kūginės ruporinės antenos parametrų priklausomybė nuo antenos stiprinimo [42]

Spindulio plotis  $\phi$  (išreikštas laipsniais) tarp -3 dB taškų spinduliavimo diagramoje yra [42]:

$$\phi_M \approx \frac{70}{\left(\frac{d}{\lambda}\right)} \text{ (magnetinio lauko plokštumoje)} \quad (8)$$

$$\phi_E \approx \frac{60}{\left(\frac{d}{\lambda}\right)} \text{ (elektrinio lauko plokštumoje)} \quad (9)$$

Spindulio plotis būtų vienodas elektrinio ir magnetinio lauko plokštumose, jei apertūra būtų elipsės formos.

### 1.5. Origami ir išsilankstančių struktūrų inžinerija

Žodis „origami“ yra kilęs iš japonų kalbos, tiesiogiai išvertus šį sudurtinį žodį gautume „lankstyti popierių“ [20]. Nėra žinoma, kur tiksliai origami atsirado, tačiau geriausiai šio meno istorija buvo fiksuojama Japonijoje. Daugelį amžių origami buvo traktuojama tik kaip meno rūšis. Modernus origami menas pradėjo vystytis XX a. pradžioje-viduryje ir įkvėpė ne tik menininkus, tačiau ir mokslininkus bei inžinierius [37]. Darbas, kurį galėtume laikyti pirmuoju indėliu į origami matematinį nagrinėjimą buvo išleistas 1936 m. Šiame Margherita Piazzolla Beloch darbe origami nagrinėjamas remiantis tam tikrų aksiomų rinkiniu kaip geometrinės konstrukcijos [20]. Bėgant metams susiformavo ir kelios origami kryptys [21]:

- Orimetrika – lankstymo pritaikymas sprendžiant inžinerijos problemas.

- Griežtas origami – medžiaga tarp lenkimo vietų turi būti nedeformuota.
- Veikimo origami – nagrinėja jau sulankstyto origami judėjimo ypatumus, laisvės laipsnius.
- Kinematikos origami – nagrinėja judėjimą tarp sulankstyto ir judinamo origami komponentų.
- Kirigami – šiek tiek nukrypsta nuo tradicinio origami meno, leidžiant įpjuvas kartu su lenkimais, taip labiau pritaikant šią techniką inžinerijai.

Pradėjus matematiškai nagrinėti origami meną, netrukus pradėta galvoti ir apie pritaikymus inžinerijoje. Šiandien daugelyje sričių, tokių kaip kosmoso technologijos, medicina [24], [25], [26], robotika [27], [28], architektūra [27], [28], [29], [30], ryšių technika, aviacija, elektronika ir kitų, galime rasti origami raštais paremtų mechanizmų tyrimų bei idėjų [24].

Origami struktūros, tinkamos naudoti kosmoso technologijose, paprastai yra sudaromos iš rašto, kurį sudaro daug kartų pasikartojantis paprastas elementas. Šie fundamentiniai elementai yra priklausomi vienas nuo kito, taigi atliekant išsilankstymo transformaciją viename taške, paveikiami ir kiti struktūros taškai. Galutinė struktūra turi išsilankstyti paprastu, nenutrūkstamu judesiu [22]. Matematiškai origami struktūros yra skirstomos pagal lenkimo viršūnių išsidėstymą, gali būti tiesinė grandinė, šakotoji medžio pavidalo, vienmatė periodinė, dvimatė periodinė, arba neperiodinė struktūros [23]. Šiame darbe daugiausia nagrinėsime dvimates periodines struktūras.

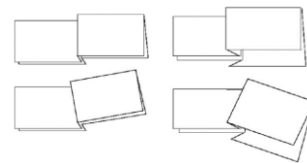
Išsilankstančios struktūros yra dažnai naudojamos kosmoso technologijų pritaikymuose [17]. Origami technika čia sulaukė nemažai dėmesio, kadangi svarbu taupyti tūrį keliančiose raketose, o reikalingą dydį struktūros pasiekia jau išleistos į orbitą [17]. Kosmoso misijos dažniausiai nepavyksta dėl klaidų paleidimo, pasiruošimo veikimui metu, tačiau praėjus šiai fazei dažniausiai klaidų yra išvengiama [31], todėl itin svarbus sklandus išsiskleidimo procesas [22]. Pagrindiniai dizaino kriterijai yra: kompaktiškumas, galimų dimensijų paisymas, išsilanksčiusios struktūros tvirtumas, išsilankstymo paprastumas, ilgaamžiškumas, patvarumas, kaina [17]. Svarbu, jog lenkimo linijos nepažeistų lankstinio medžiagos ir nepablogintų išlankstytos struktūros savybių [22]. Dažni kosminių įrenginių išskleidžiamų struktūrų pavyzdžiai yra fotoelektriniai elementai [17], antenos, reflektoriai, stiebai [17], Saulės burės [33], [34], [35] ir kt. [32].

## 1.6. Origami matematikos pagrindai

Origami pagalba galime sukurti bet kokį daugiabriaunį, naudodami plokščią dvimatį lankstų objektą, tradiciniu variantu tai yra popierius, tačiau dabar naudojamos ir kitos medžiagos. Origami nagrinėjime naudojami pagrindiniai terminai [21]:

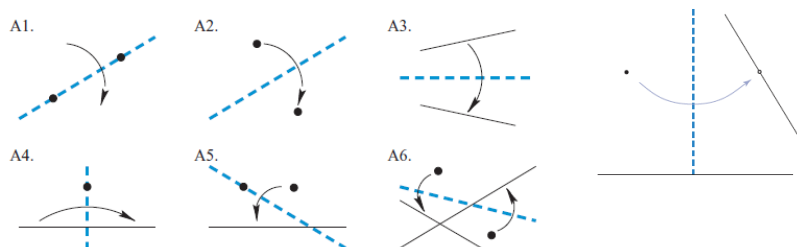
1. Lenkimas arba žymė – plastinis lenkiamos medžiagos deformavimas tiesia linija, gali būti išgaubtas (ketera) arba įgaubtas (slėnis). Taip pat linija gali būti ir popieriaus kraštas.
2. Lenkimo linijos sudaro lenkimo struktūrą (rašą).

3. Viršūnė yra taškas, kuriame susikerta dvi lenkimo linijos.
4. Viršūnės laipsnis yra lenkimo linijų, išeinančių iš viršūnės, skaičius.
5. Sulenktoji būseną yra lenkimo judesio rezultatas.
6. Klostė yra lenkimas, sukuriantis šalia esančius kalno ir slėnio lenkimus.
7. Raukšlė yra lenkimas, sukuriantis simetriškus kalno ir slėnio lenkimus (8 pav.).



8 pav. Vadinamasis "raukšlės" lenkimo tipas [21]

1985 m. Humiaki Huzita įvedė į origami meną matematinio aiškumo: jis pristatė šešias origami konstravimo aksiomas (9 pav.), kurios iš esmės atitinka pagrindines simetrijos geometrijoje taisykles.



9 pav. Septynios Huzita-Hatori aksiomos (nepertraukiamos linijos vaizduoja jau esančius lenkimus, o punktyrinės linijos vaizduoja naujus) [20]

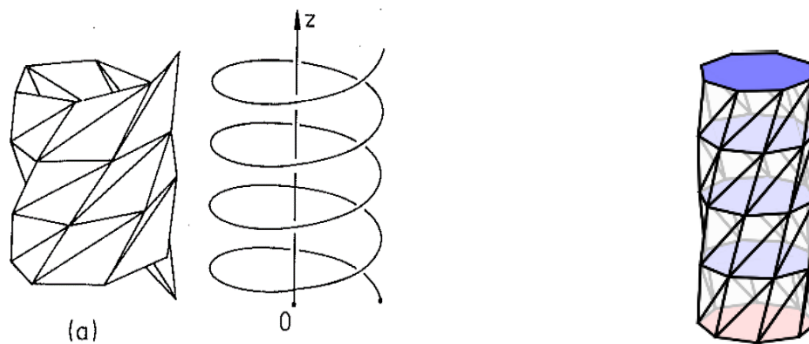
- A1. Turint du taškus, lenkiant galima sukurti žymę, einančią per tuos du taškus;
- A2. Turint du taškus, lenkimo judesiu juos sujungus, žymė eis statmenai linijai, jungiančiai tuos du taškus ir dalins šią liniją pusiau;
- A3. Turint dvi linijas ir lenkiant taip, kad jos sutaptų, žymė bus simetrijos linija;
- A4. Turint tašką ir liniją, lenkiant taip, jog lenkimo linija kirstų tašką, ir linija sutaptų pati su savimi, žymė eis statmenai linijai;
- A5. Turint du taškus ir liniją, galima atlikti lenkimą taip, jog žymė kirstų vieną tašką, o kitas taškas sutaptų su linija;
- A6. Turint du taškus ir dvi linijas, galima atlikti tokį lenkimą, kad vienas taškas sutaptų su viena linija, o kitas taškas sutaptų su kita.

Šias šešias aksiomas vėliau papildė ir septintoji, kurią pasiūlė Hatori 2004 m.:

- A7. Turint vieną tašką ir dvi linijas, galima atlikti lenkimą, kuris būtų statmenas vienai linijai, o taškas ir kita linija sutaptų (9 pav.).

## 1.7. Kresling origami geometrija

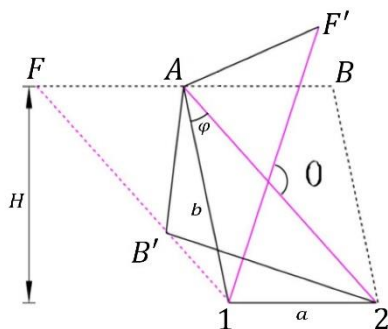
Cilindrinę origami struktūrų išsiskleidimo principas gali būti tik dėl ašinės apkrovos (Miura ori principas) arba struktūrai suteikiant sukimo deformaciją. Tokia yra Guest ir Pellegrino pasiūlyta struktūra [45], kur struktūros atitinkmuo yra spiralė (10 pav.).



10 pav. a) Guest ir Pellegrino cilindrinė origami struktūra ir jos pagrindas [45]; b) Kresling origami cilindras [46]

Prancūzų architektė B.Kresling pasiūlė šiek tiek modifikuotą Guest ir Pellegrino origami struktūrą [47], kur elementų juostos yra išdėstytos „aukštais“, kurie sudaro lygiagrečius daugiakampius, o struktūros paviršius yra sudarytas iš vienodų matmenų trikampių (10 pav. b). Išvesime pagrindinius tokios struktūros parametrus, apibūdinančius struktūros geometrinį dizainą.

11 pav. atvaizduotas Kresling struktūros bazinis elementas ir struktūros viršūnių poslinkis suskleidus struktūrą ( $F$  ir  $B$  pakeičia poziciją į  $F'$  ir  $B'$  atitinkamai). Trikampio  $\Delta A01$  kampų suma:



11 pav. Kresling origami struktūros bazinis elementas (adaptuota iš [48])

$$\angle A01 + \angle 0A1 + \angle 01A = \pi \quad (10)$$

$$\angle A01 = \angle F'02 = \pi - 2\varphi \quad (11)$$

Kampas  $\angle F'02$  taip pat gali būti išvestas taip:

$$\begin{aligned} \angle F'02 &= \pi - \angle F'0A = [\text{nes kampas } \angle A02 = \pi] \\ &= \angle F'A0 + \angle AF'0 = [\text{likusių dviejų trikampio } \Delta AF'0 \text{ kampų suma}] \\ &= \angle F'A0 + \angle 120 = [\text{priešingi lygiagrečio FA21 kampai lygūs}] \\ &= \angle F'A0 + \angle 2AB = [\text{priešingi kampai lygūs}] \end{aligned} \quad (12)$$

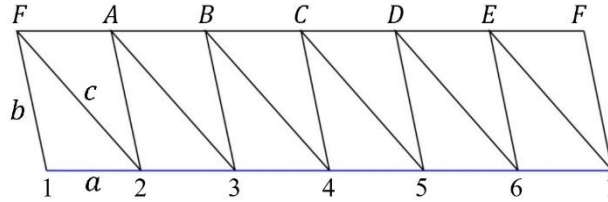
$$= \angle F'A2 + \angle 2AB' = \angle F'AB' \text{ [lygus } n\text{-kampio (10 pav. b), violetinė spalva) kampui]}$$

$n$ -kampio vidinių kampų sumos formulė:

$$n \cdot \alpha = (n - 2)\pi \quad (13)$$

Iš (11), (12), (13) gauname sąlygą:

$$n \cdot (\pi - 2\varphi) = (n - 2)\pi \quad (14)$$

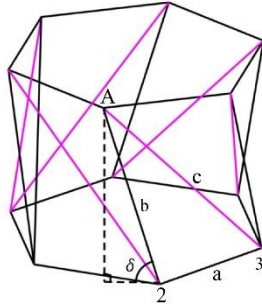


12 pav. Vieno struktūros aukšto dvimatis vaizdas, kai  $n=6$  (adaptuota iš [48])

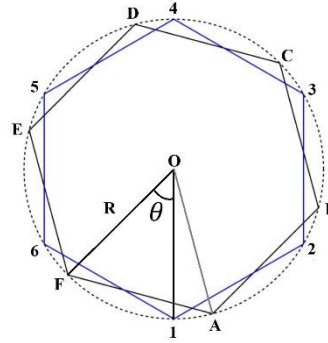
$$\varphi = \frac{\pi}{n} \quad (15)$$

Vieno aukšto daugiakampio perimetras  $L$  (12 pav.) bus lygus:

$$L = an \quad (16)$$



a)



b)

13 pav. Struktūros aukšto viršutinio ir apatinio daugiakampių poslinkis vienas kito atžvilgiu išsiskleidimo metu (adaptuota iš [48])

$\delta$  kampas (13 pav. a) apibūdina struktūros išsiskleidimą, esant  $\delta = 0$ , cilindras yra pilnai suskleistas ir kampai didėjant struktūra išsiskleidžia ir jos aukštis  $H$  didėja:

$$H = b \sin \delta \quad (17)$$

Centrinio daugiakampio kampo dydis yra (13 pav. b):

$$\angle FOA = \frac{2\pi}{n} \quad (18)$$

Apibrėžto apskritimo spindulys  $R$  bus lygus:

$$R = \frac{a/2}{\sin(\pi/n)} \quad (19)$$

Rasime daugiakampių pasisukimo tarpusavio atžvilgiu kampo  $\theta$  (13 pav. b) sąryšį su išsiskleidimo kampu  $\delta$ . Kai  $\delta = 0$ , daugiakampiai yra pilnai persikloję, todėl iš (18):

$$\theta_0 = \angle FOA = \frac{2\pi}{n} \quad (20)$$



Cilindrui skleidžiantis,  $\theta$  kampo vertė mažėja, didėjant kampui  $\angle 10A$ :

$$\theta = \theta_0 - \angle 10A \quad (21)$$

$$\angle 10A = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{\frac{1A}{2}}{R}\right) = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{b \cos \delta}{2R}\right) \quad (22)$$

Iš (20), (21) ir (22) gauname:

$$\theta = \frac{2\pi}{n} - 2 \cdot \arcsin\left(\frac{b \cos \delta}{2R}\right) \quad (23)$$

Iš (23) matome, jog turi būti tenkinama sąlyga:

$$\frac{b \cos \delta}{2R} \leq 1 \quad (24)$$

Irašome (19) į (24):

$$\frac{\frac{b \cos \delta}{2 \frac{a/2}{\sin(\pi/n)}}}{2 \frac{a/2}{\sin(\pi/n)}} \leq 1 \quad \rightarrow \quad \frac{b}{a} \leq \frac{1}{\cos \delta \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} \quad (25)$$

Pilnai suskleistoje konfigūracijoje  $\cos \delta = 1$ , todėl perrašome (25):

$$\frac{b}{a} \leq \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{n}\right)} \quad (26)$$

Tarkime, jei  $n = 6$ , tai turi būti tenkinama sąlyga  $\frac{b}{a} \leq 2$ .

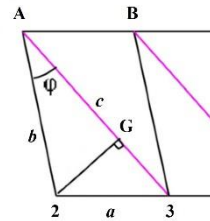
Rasime  $c$  ilgį, arba atstumą tarp taškų A ir 3 (13 pav. a), pasinaudami atstumo tarp koordinatinių cilindrinėje koordinatinių sistemoje formule:

$$d^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) + (z_1 - z_2)^2 \quad (27)$$

A taško koordinatės yra  $(R; \theta; b \sin \delta)$ , o 3 –  $(R; \frac{4\pi}{n}; 0)$ :

$$\begin{aligned} c(\delta) = A3 &= \sqrt{R^2 + R^2 - 2R^2 \cos\left(\frac{4\pi}{n} - \theta\right) + (0 - b \sin \delta)^2} = [\text{įrašome (23)}] \quad (28) \\ &= \sqrt{2R^2 - 2R^2 \cos\left(\frac{4\pi}{n} - \frac{2\pi}{n} + 2 \cdot \arcsin\left(\frac{b \cos \delta}{2R}\right)\right) + (b \sin \delta)^2} = \\ &= \sqrt{2R^2 \left[1 - \cos\left(\frac{4\pi}{n} - \frac{2\pi}{n} + 2 \cdot \arcsin\left(\frac{b \cos \delta}{2R}\right)\right)\right] + (b \sin \delta)^2} = \\ &= \sqrt{\left[2R \sin\left(\frac{\pi}{n} + \arcsin\left(\frac{b \cos \delta}{2R}\right)\right)\right]^2 + (b \sin \delta)^2} \end{aligned}$$

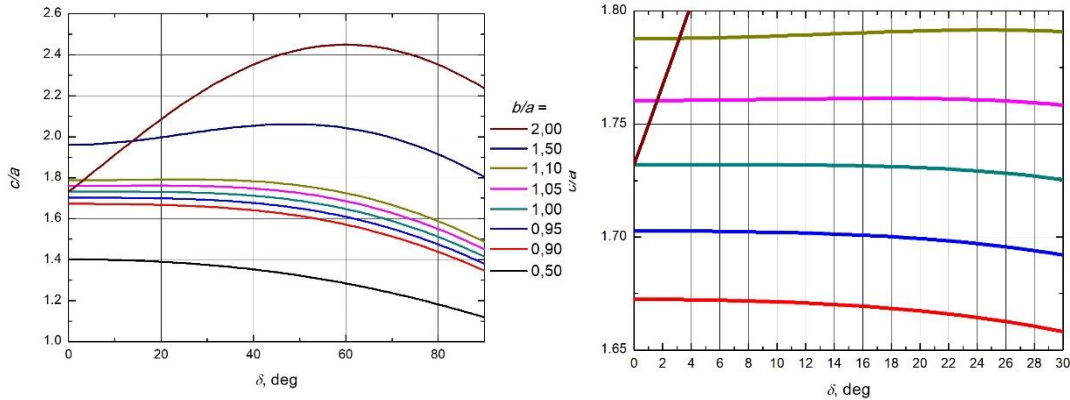
Kadangi (28) formulė išreiškia trumpiausią atstumą tarp struktūros mazgų koordinatinių, tai reiškia, jog tuo atveju, jei struktūra deformuojasi (tiesės  $a, b, c$  išlinksta), atstumas tarp koordinatinių sumažėja ir ši išraiška nebetinka aprašyti  $c$  ilgiui. Naudojant lanksčias medžiagas tokias kaip popierius, tai nėra problema, tačiau naudojant kietas medžiagas, pavyzdžiui metalines plokšteles kaip bazinį struktūros elementą galioja sąlyga, jog atstumas tarp struktūros mazgų koordinatinių turi visada būti lygus  $a, b, c$  ilgiams.  $c$  ilgį galime rasti ir kitu būdu, pagal 14 pav.:



14 pav. Bazinio elemento geometrija (adaptuota iš [48])

$$c(0) = AG + G3 = b \cos \varphi + \sqrt{a^2 - (b \sin \varphi)^2} \quad (29)$$

Grafike 15 pav. pavaizduota (28) priklausomybė. Maksimalus išsiskleidimo kampas  $\delta$  randamas ties tuo tašku, kur  $c \neq c(0)$ , nes pradėdant šiuo tašku struktūra pradeda deformuotis. Iš grafiko galime matyti, kad didžiausias išsiskleidimo kampas yra pasiekiamas, kai  $b/a \approx 1$ .

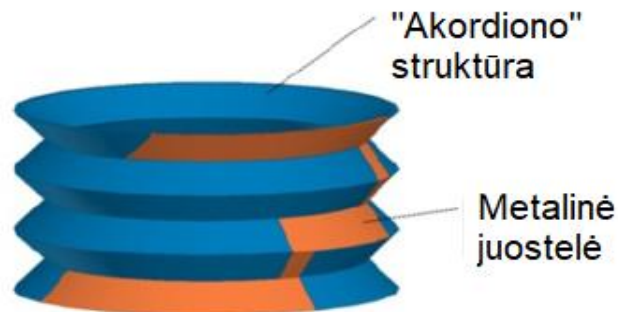


15 pav. Santykių bazinio struktūros elemento matmenų priklausomybė nuo išsiskleidimo kampo, kai  $n = 6$

### 1.8. Origami antenų prototipų apžvalga

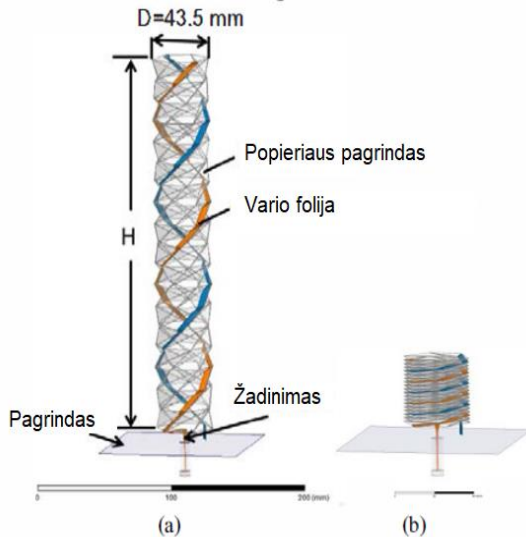
Origami pagrindu gali būti konstruojamos įvairių tipų ir dažnių antenos. Aptarsime kelis jau pasiūlytus modelius, jų privalumus ir trūkumus. Keli darbai šia tema buvo atlikti Floridos tarptautiniame universitete.

Akordiono principu grįsta popierinė (arba bet kokios kitos dielektrinės medžiagos) struktūra su pritvirtinta metaline juostele, formuojančia anteną, gali būti sulankstyta ir išlankstyta pailgėjimo principu [36]. Tokia antenos struktūra yra tuščiavidurė, todėl viduje galima talpinti kitus komponentus (16 pav.). Antenos aukštis yra kontroliuojamas teleskopiniu mechanizmu. Eksperimentiniu būdu [36] buvo parodyta, jog išskleidžiant anteną ir taip keičiant antenos ilgį nuo

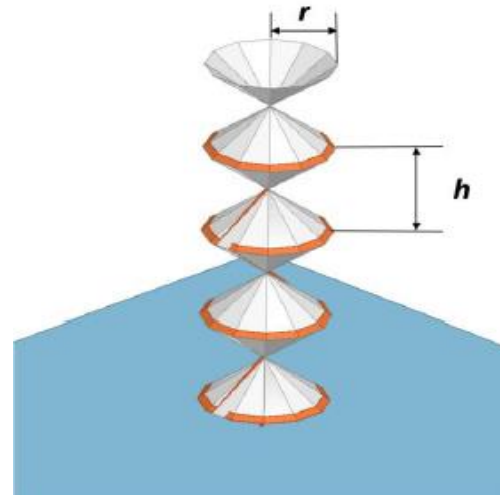


16 pav. Akordiono principu sumodeliuotos origami antenos pavyzdys [36]

2 mm iki 10 mm, antenos spinduliavimo rezonansinis dažnis pasikeitė nuo 2580 MHz iki 2390 MHz. Taip pat apie 5 dB intervale keitėsi ir antenos stiprinimas.



18 pav. Simuliuotas spiralinės origami antenos modelis išskleistoje (a) ir suskleistoje (b) būsenose [38]



18 pav. Jeff Beynon origami spyruoklės principu sumodeliuota antenna [37]

Spiralinės origami antenos yra labai tinkamos oro ir kosmoso komunikacijoms tiek dėl savo elektromagnetinių savybių, tiek dėl išlankstymo galimybės. [38] parodytas spiralinio tipo antenos prototipas, naudojant kitokį (Nejiri-ori) origami lankstymo metodą ir pritvirtinant laidininko (vario) foliją tokiu būdu, kad susidarytų spiralinio tipo antena (18 pav.). Šiuo atveju, išskleistos antenos ilgis yra didesnis apie 6,7 karto, nei suskleistos. Čia nagrinėjami tik du atvejai – esant antenai suskleistoje iš išskleistoje būsenose. Išskleistoje būsenoje antenos rezonansinis dažnis yra 860 MHz, o suskleistoje būsenoje 1,82 GHz arba 2,14 GHz, t.y. dažnis keičiasi daugiau nei du kartus. Šiame darbe nenagrinėjamas savaiminio išsiskleidimo mechanizmas.

Disertacijoje [37] buvo išbandyti dar keli origami antenų prototipai, pavyzdžiui spyruoklės tipo (18 pav.). Origami spyruoklės lankstymo būdą sukūrė Jeff Beynon [39], šis būdas pasižymi išsilankstymo paprastumu, tačiau dėl didelio lenkimo linijų kiekio tokia struktūra lengvai degraduoja.

## 2. Tyrimo metodika

Norint įvertinti antenos dizaino tinkamumą pritaikymui, reikalinga iširti jos spinduliavimo charakteristikas. Pagrindiniai nagrinėjami parametrai yra  $S_{11}$  parametras, skaitiškai išreiškiantis dėl vidinių atspindžių patiriamus nuostolius ir spinduliavimo diagrama.

Antenų simuliacijos yra atliktos Ansys HFSS programine įranga, skirta antenų, antenų masyvų, radijo, mikrobangių ir kitų elektronikos komponentų prototipų kūrimui ir jų veikimo simuliacijoms [49].

Šioje programinėje įrangoje antenų modelių veikimas yra simuliuojamas sprendžiant Maksvelo lygtis iteratyviu baigtinių elementų metodu [53]. Tai metodas, kai prieš sprendžiant lygtis, struktūra yra padalinama į daug mažų dalių (baigtinių elementų) ir struktūra tampa šių baigtinių elementų tinkleliu. Šis metodas iteratyvus, nes tinklelis kuriamas daugeliu skirtingu būdų tol, kol gaunamas tikslios elektromagnetinių laukų vertės. Elektrinis ir magnetinis laukai aplink struktūrą yra skaičiuojami pagal šias formules atitinkamai:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_r} \nabla \times \mathbf{E} \right) - k_0^2 \varepsilon_r \mathbf{E} = 0 \quad (30)$$

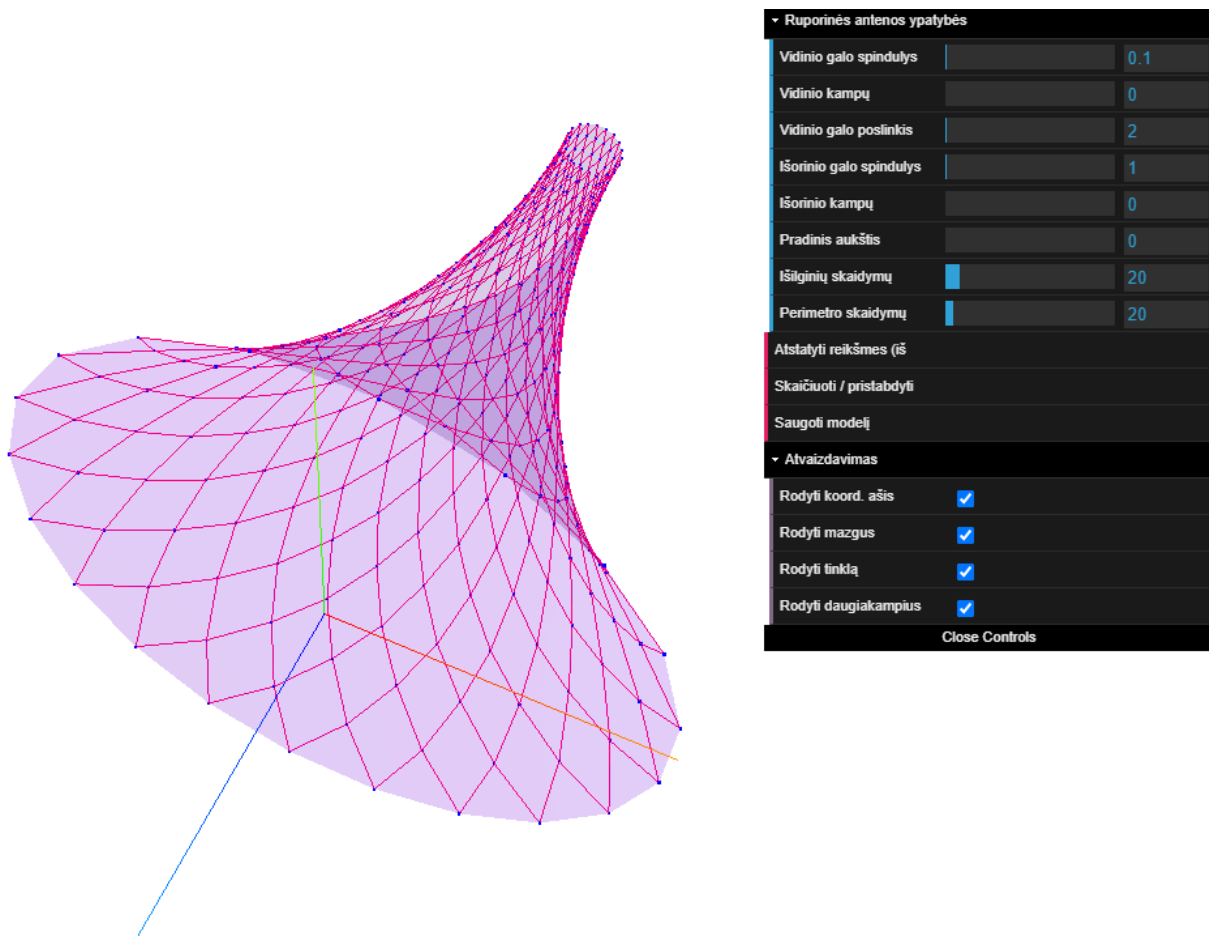
$$\mathbf{H} = \frac{j}{w\mu} \nabla \times \mathbf{E} \quad (31)$$

kur  $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$  – santykinė magnetinė skvarba,  $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$  – santykinė dielektrinė skvarba,  $k_0$  – bangos skaičius,  $w$  – kampinis dažnis.

Pagrindiniai žingsniai kuriant Ansys HFSS simuliaciją:

- 1) Modelio geometrijos kūrimas. Gali būti nubraižytas šios programinės įrangos aplinkoje arba įkeltas jau sukurtas išorinėje programoje;
- 2) Priskiriamos ribinės sąlygos (pvz., tobulas/baigtinis laidumas, varžos elementas, spinduliavimo erdvė). Šios sąlygos gali būti priskirtos elementui, tam tikram jo paviršiui, regionui aplink elementą;
- 3) Priskiriamas sužadavimo tipas. Šiame darbe buvo naudojami bangų sužadavimo įvadai;
- 4) Sukuriama sprendimo konfigūracija. Pasirenkamas antenos veikimo dažnis, norimas konvergavimo kriterijus, dažnių ruožas, sprendimo metodas;
- 5) Simuliacija. Pagal parinktus kriterijus skaičiuojamas elektromagnetinis laukas ir struktūros parametrai;
- 6) Rezultatų nagrinėjimas.  $S$ ,  $Y$ ,  $Z$  parametrų, spinduliavimo diagramų įvertinimas ir nagrinėjimas, elektromagnetinių laukų atvaizdavimas.

3.1 skyrelyje suprojektuota ruporinė antena buvo braižoma Ansys HFSS aplinkoje. Lanksčiojo ruporo geometrinio modelio kūrimui (3.2 skyrelis) buvo parašyta originali programa (19 pav.). Programa sukurta darbo vadovo, bendarabiaujant su darbo autore. Programa leidžia keisti įvairius lanksčiojo ruporo parametrus (galų forma, tinklo smulkumas, kreivis ir kt.). Programa modelį eksportuoja STL formatu, kuris vėliau buvo įkeliamas į Ansys HFSS programą.



19 pav. Ruporo formos tinklelio modeliavimo programos ekrano kopija

Ruporinės antenos parametrai buvo apskaičiuoti pagal 1.4 skyrelyje išdėstytą teoriją, o origami cilindro parametrai – pagal 1.7 skyrelyje išvestas sąlygas.

### 3. Tyrimo rezultatai

#### 3.1. K-dažnių juostos kūginė ruporinė antena

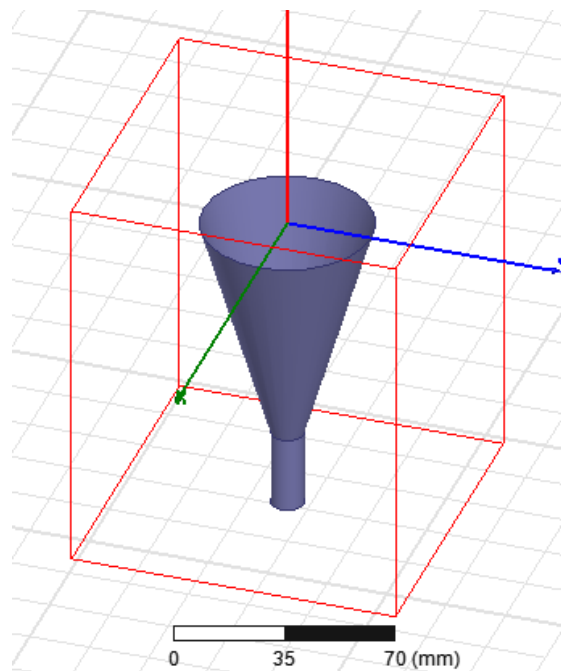
Pirmoji iškelta užduotis buvo sumodeliuoti įprasto dizaino kūginę ruporinę anteną, kuri pasižymėtų norimais parametrais – didelis stiprinimas, matmenys atitinka nanopalydovo standartą. Tai reikalinga tam, jog kuriant origami dizainą žinotume reikalingus matmenis bei galėtume palyginti origami dizaino antenos savybes su tradicinės ruporinės antenos savybėmis. Šios kūginės ruporinės antenos paskirtis yra tarppalydovinis ryšys K-dažnių juostoje, dažnis parinktas pagal tarptautinę dažnių skirstymo lentelę [12].

Centrinis dažnis:  $f = 22,85 \text{ GHz}$

Bangos ilgis:  $\lambda = 13,12 \text{ mm}$

Užduodame antenos stiprinimą lygų 20 dB ir pagal 7 pav. parenkame ruporo geometrinius parametrus:

$$L = 6 \cdot 13,12 \text{ mm} = 78,72 \text{ mm}$$



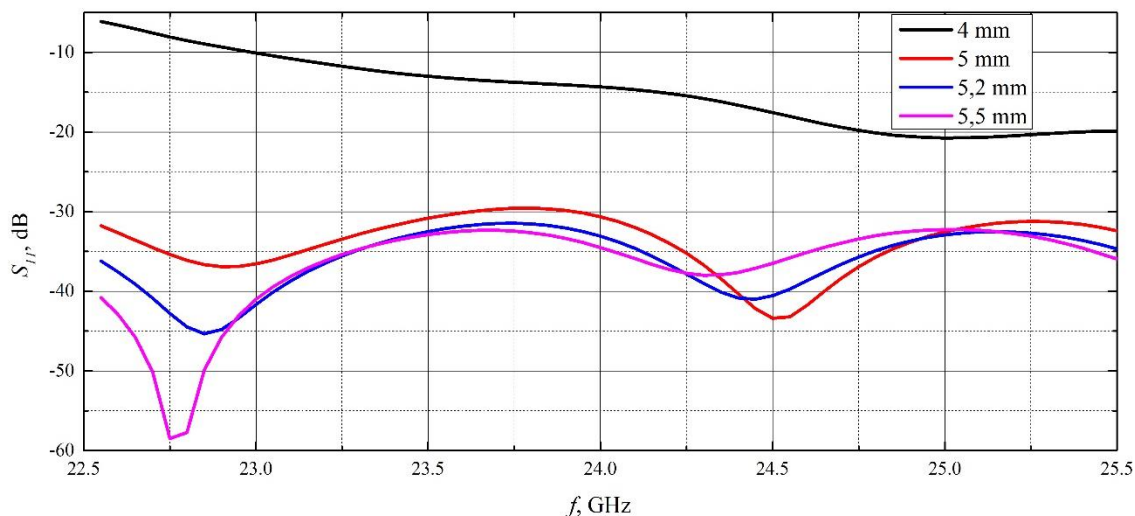
20 pav. Kūginės ruporinės antenos modelis

$$D = 4,3 \cdot 12,12 \text{ mm} = 56,42 \text{ mm (tinkamas dydis 1U sienelei)}$$

Žadinančiojo bangolaidžio minimalūs matmenys, reikalingi tam tikroms modams susidaryti:

$$r_{TE11} = \frac{c}{2\pi \cdot 22,85 \cdot 10^9} \cdot 1,841 = 3,84 \text{ mm}$$

$$r_{TM01} = \frac{c}{2\pi \cdot 22,85 \cdot 10^9} \cdot 2,405 = 5,02 \text{ mm}$$



21 pav.  $S_{11}$  parametro priklausomybė nuo spinduliavimo dažnio skirtingiems žadinančio bangolaidžio spinduliams  $r_b$

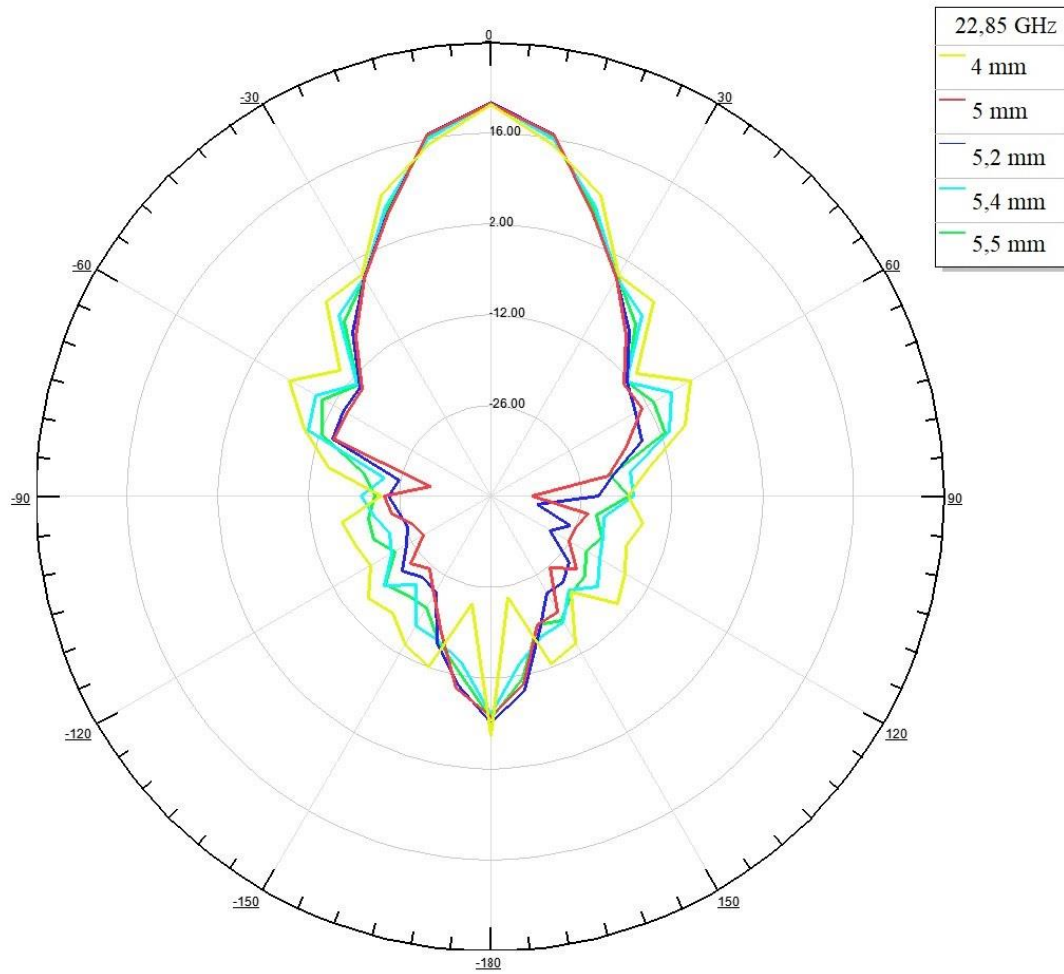
Sumodeliuotos antenos geometrija pavaizduota 20 pav. Sukuriame simuliaciją visam K-juostos, tinkamos tarppalydoviniam ryšiui, dažnių ruožui (22,55-25,50 GHz). Buvo atlikti skaičiavimai su skirtingais žadinančiojo bangolaidžio diametrais, kad įvertintume šio parametro įtaką antenos spinduliavimo charakteristikoms.  $S_{11}$  parametro grafikas (21 pav.  $S_{11}$  parametro priklausomybė nuo spinduliavimo dažnio skirtingiems žadinančio bangolaidžio spinduliams  $r_b$ ) turi du ryškius minimumus bangolaidžio spinduliui esant daugiau negu 4 mm. Ties minimumais antena patirs mažiausiai vidinių atspindžių ( $S_{11}$  parametras apibūdina nuostolius dėl vidinių atspindžių).

Taip pat iš 21 pav. atvaizduoto grafiko matome, jog didinant bangolaidžio diametrą mažėja vidinių atspindžių ir todėl daugiau į anteną paduotos energijos yra išspinduliuojama. Visgi, negalime per daug padidinti bangolaidžio diametro, kadangi bus sužadintos nepagrindinės, aukštesnių eilių modos, kas atsispindės spinduliavimo diagramoje.

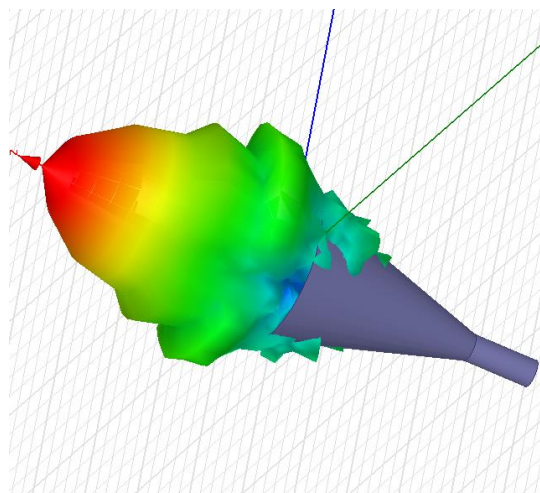
23 pav. pavaizduota polinė spinduliavimo diagrama naudojant skirtingo spindulio žadinančius bangolaidžius, kai spinduliavimo dažnis yra  $f = 22,85$  GHz. Maksimali stiprinimo vertė  $G_{max} = 20,8$  dB, o pagrindinio lapelio plotis  $12,3^\circ$ . Ši vertė nepriklauso nuo žadinančio bangolaidžio pločio. Mažiausias spinduliavimas šalutinėmis kryptimis, kai  $r_b = 5$  mm.

22 pav. atvaizduota trimatė antenos kryptingumo diagrama. Pagrindinė antenos spinduliavimo kryptis sutampa su antenos simetrijos ašimi.





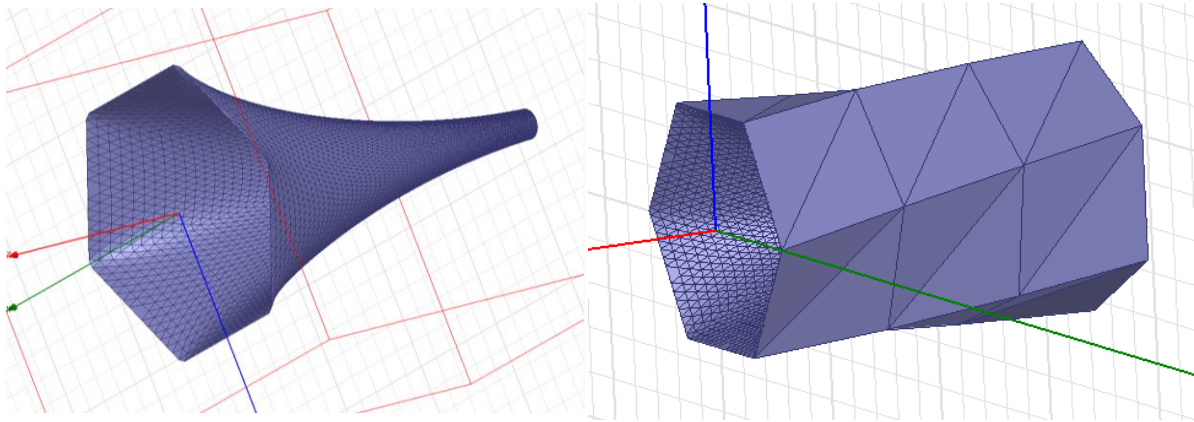
22 pav. Polinė kūginės ruporinės antenos spinduliavimo diagrama, esant skirtingo pločio sužadavimo bangolaidžiams



23 pav. 22,85 GHz antenos trimatė kryptingumo diagrama ( $r_b = 5 \text{ mm}$ )

### 3.2. K-dažnių juostos origami ruporinė antena

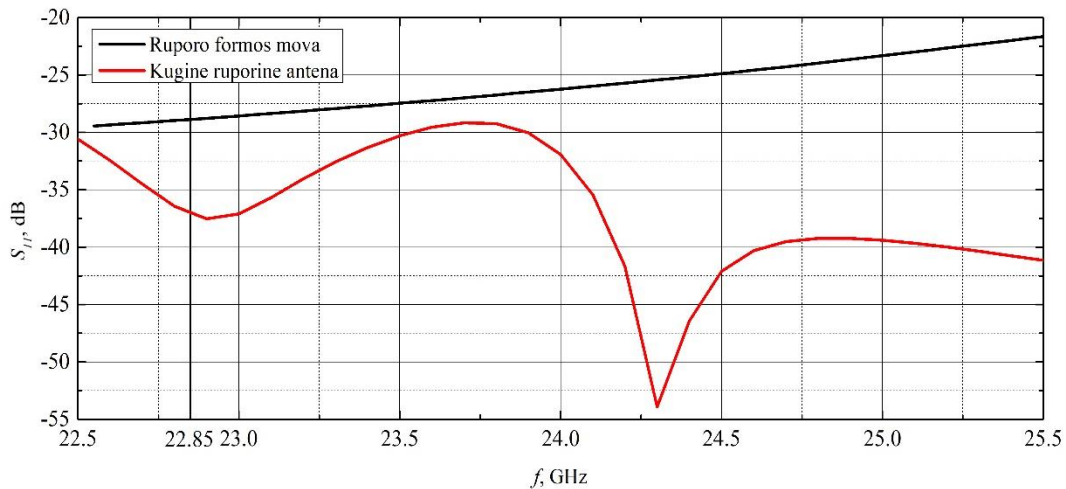
Origami pagrindu išsilankstanti ruporinė antena susidaro iš dviejų komponentų: ruporą atitinkanti lanksti vidinė mova (24 pav. kairėje) ir išorinis standus Kresling origami cilindras (24 pav. dešinėje). Išsiskleidžiant išorinei konstrukcijai, vidinė dalis įsitempia įgaudama ruporo formą. Pirmiausia nagrinėsime vidinės movos spinduliavimo charakteristikas ir palyginsime jas su įprastos formos ruporinės antenos charakteristikomis. Origami cilindro matmenys, pagal 13 pav. a:  $a = 30 \text{ mm}$ ,  $b = 30,6 \text{ mm}$ ,  $n = 6$ , yra tenkinama (25) sąlyga  $b/a \leq 2$  ir taip pat pagal 15 pav.



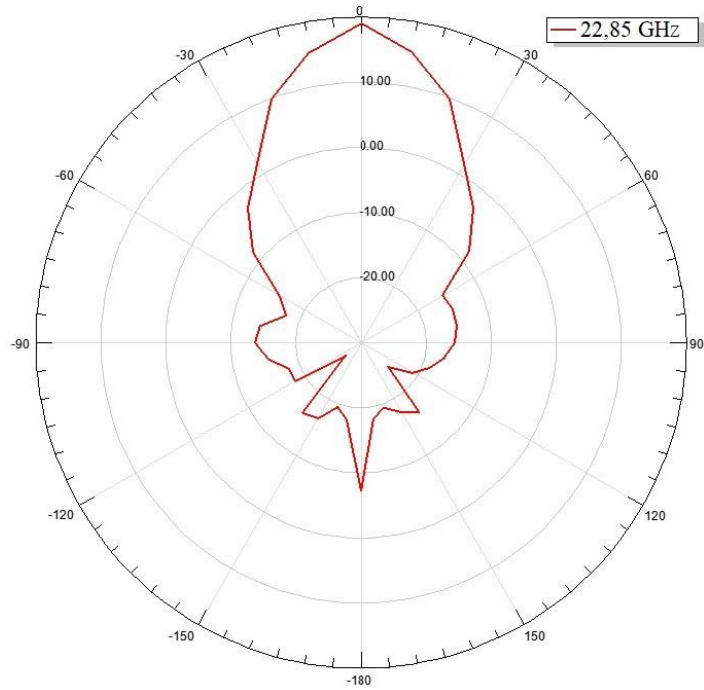
24 pav. Ruporinę anteną atitinkanti vidinė mova (kairėje) ir išorinis origami cilindras (dešinėje) parinkti tokie matmenys, kad būtų tenkinama sąlyga  $b/a \approx 1$ .

$S_{11}$  parametro grafikas rodo, jog nagrinėjamame dažnių ruože ruporo formos mova neturi minimumo. Vis dėlto, vertės kinta  $[-20;-30]$  dB ruože, kas reiškia, jog yra sudaromos tinkamos sąlygos spinduliavimui.

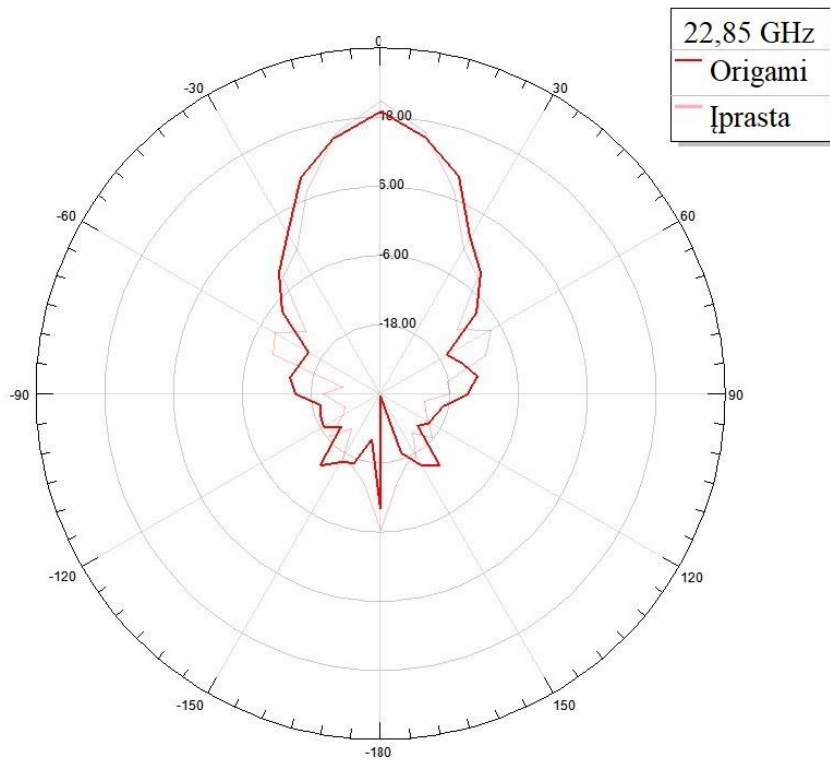
26 pav. atvaizduota ruporo formos movos spinduliavimo diagrama, kur  $G_{max} = 19,1 \text{ dB}$ . Stiprinimo vertė šiek tiek prastesnė, nei įprastos kūginės ruporinės antenos, tačiau skirtumas yra tik 1,7 dB, todėl galima daryti išvadą, jog toks dizainas yra tinkamas tolimesniam projektavimui.



25 pav.  $S_{11}$  parametro priklausomybė nuo spinduliavimo dažnio skirtingos formos ruporams

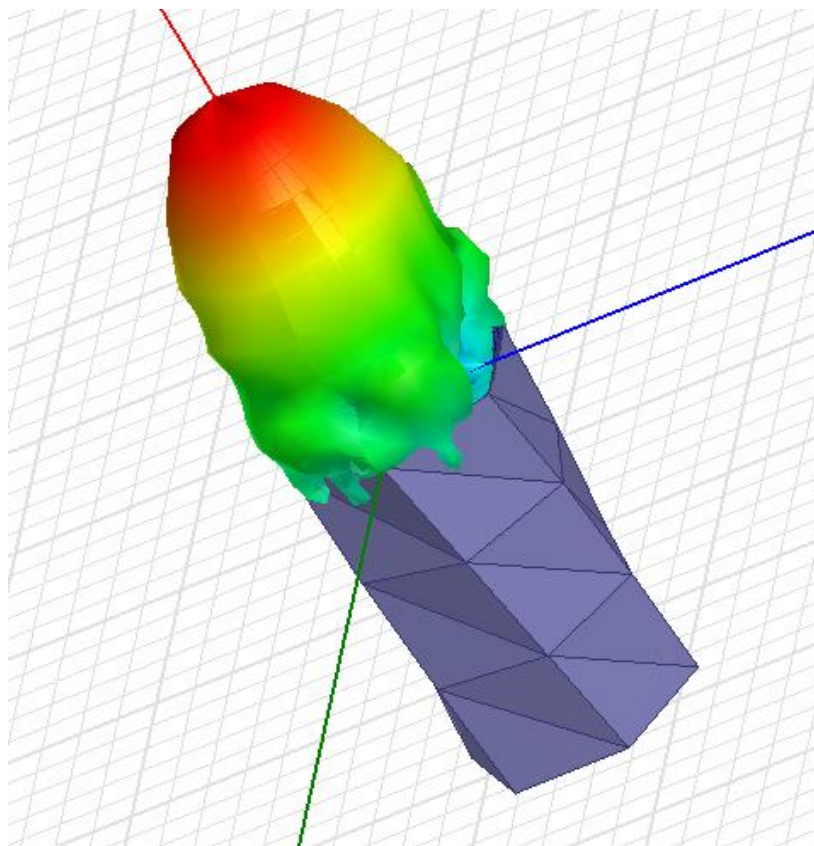


27 pav. Polinė ruporo formos movos antenos spinduliavimo diagrama



26 pav. Polinė origami struktūros su ruporo formos mova spinduliavimo diagrama

27 pav. palyginę su 26 pav., galime daryti išvadą, jog išorinis origami cilindras neprastina ruporinės antenos spinduliavimo charakteristikos. Nežymiai pakito tik spinduliavimas nepagrindine kryptimi. Stiprinimas pagrindine kryptimi išliko lygus  $G_{max} = 19,1$  dB, o pagrindinio lapelio plotis yra  $15,3^\circ$ . Dėl šių piežasčių, toks ruporinės antenos dizaino variantas gali būti siūlomas pritaikymams nanopalydovų ryšio sistemoms mikrobangų diapazone. 28 pav. atvaizduota trimatė antenos spinduliavimo diagrama. Matome, jog pagrindinė spinduliavimo kryptis sutampa su ruporinės antenos simetrijos ašimi.



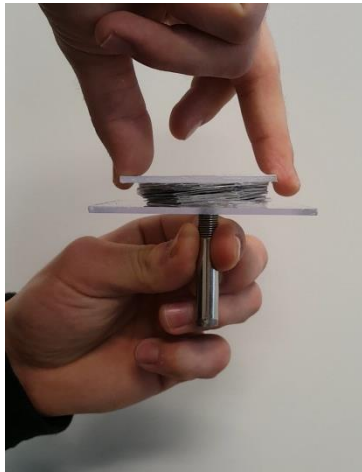
28 pav. Trimatė origami ruporinės antenos spinduliavimo diagrama

### 3.3. Origami antenos prototipavimas

Buvo kuriamas origami antenos prototipas, jo tikslas buvo iširti sukurtos origami antenos išsiskleidimo mechanizmo ir spinduliavimo savybes realiomis sąlygomis.

Pirminėje prototipavimo stadijoje, buvo siekiama iširti Kresling origami geometrijos lankstinio savybes bendruoju atveju realiomis sąlygomis (suskleistos/išskleistos struktūros aukštis, pailgėjimas, išsiskleidimo sąlygos). Buvo pagamintas lankstinio pavyzdys pritvirtinant origami pagrindinio elemento formos aliuminio plokšteles prie lankstaus paviršiaus (plastmasinės plėvelės). Struktūros išsiskleidimo dinamika pavaizduota 29 pav. Išmatuoti gautos struktūros geometriniai parametrai:

- 1) Plastiko storis: 0,03 mm;
- 2) Aliuminio plokštelės storis: 0,16 mm;
- 3) Lankstinio „aukštų“ skaičius: 5;
- 4) Suskleistos struktūros aukštis storičiausioje vietoje: 5,96 mm;
- 5) Suskleistos struktūros aukštis ploniausioje vietoje: 4,30 mm;
- 6) Pilnai išskleistos struktūros aukštis: 137,0 mm;
- 7) Pailgėjimas: 23 kartai.



1)



2)



3)



4)

29 pav. Kresling origami cilindro išskleidimas

Dėl Lietuvos Respublikoje paskelbto visuotinio karantino nepavyko pagaminti ir ištirti galutinio 3.2 skyrelyje sukurtos origami antenos prototipo.

## Išvados

1. Atlikta analizė parodė, kad išskleidžiančioms nanopalydovų ruporinėms antenoms pagaminti yra tinkami origami metodai.
2. Pasiūlytas dviejų dalių origami antenos dizainas: vidinę dalį sudaro lanksčioji ruporo formos mova, o išorinę dalį sudaro standus išsilankstymo mechanizmas – Kresling origami cilindras. Išsiskleidžiant išorinei konstrukcijai, vidinė dalis įsitempia įgaudama ruporo formą.
3. Apskaičiuotas origami ruporinės antenos stiprinimas pagrindine kryptimi yra lygus  $G_{max} = 19,1$  dB, o pagrindinio lapelio plotis yra  $15,3^\circ$ .
4. Atlikti išorinio origami cilindro sąveikos su ruporine antena skaičiavimai neparodė neigiamos įtakos ruporinės antenos spinduliavimo charakteristikoms.



## Literatūros šaltinių sąrašas

- [1] NASA. CubeSat 101. Basic Concepts and Processes for First-Time Cubesat Developers. 2017  
[\[https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa\\_csli\\_cubesat\\_101\\_508.pdf\]](https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_csli_cubesat_101_508.pdf)  
[žiūrėta 2020-05-28].
- [2] Debra Werner. Kepler reviews plan for constellation architecture. September 13, 2019.  
[\[https://spacenews.com/kepler-reviews-plan-for-constellation-architecture/\]](https://spacenews.com/kepler-reviews-plan-for-constellation-architecture/) [žiūrėta 2020-05-28].
- [3] CalPoly. Cubesat design specification Rev. 13. The CubeSat Program, California Polytechnic State 8651(June 2004), 22 (2009).
- [4] Secondary payload. Wikipedia. [\[https://en.wikipedia.org/wiki/Secondary\\_payload\]](https://en.wikipedia.org/wiki/Secondary_payload)  
[žiūrėta 2020-05-28].
- [5] Yahya Rahmat-Samii, Vignesh Manohar, Joshua M. Kovitz. For Satellites, Think Small, Dream Big A review of recent antenna developments for CubeSats. IEEE Antennas & Propagation Magazine, April 2017.
- [6] Otto F. Koudelka. Nanosatellites for Technological and Science Missions. Institute of Communication Networks and Satellite Communications, 2017.  
[\[http://www.unoosa.org/documents/pdf/psa/activities/2017/GrazSymposium/presentations/Tuesday/Presentation11.pdf\]](http://www.unoosa.org/documents/pdf/psa/activities/2017/GrazSymposium/presentations/Tuesday/Presentation11.pdf) [žiūrėta 2020-05-28].
- [7] Alen Space. A Basic Guide to Nanosatellites. [\[https://alen.space/basic-guide-nanosatellites/\]](https://alen.space/basic-guide-nanosatellites/) [žiūrėta 2020-05-28].
- [8] ITU. Handbook. Earth Exploration-Satellite Service. Radiocommunication Bureau, 2011.
- [9] ITU. Handbook on Space Research and Communication. Radiocommunication Bureau, 2014.
- [10] Hiber company website. [www.hiber.global](http://www.hiber.global) [žiūrėta 2020-05-28].
- [11] Lacuna Space kompanijos internetinė svetainė. [www.lacuna.space](http://www.lacuna.space). [žiūrėta 2020-05-28].
- [12] ITU Radio Regulations, 2016  
<http://search.itu.int/history/HistoryDigitalCollectionDocLibrary/1.43.48.en.101.pdf>  
[žiūrėta 2020-05-28].
- [13] K.Paulauskas. Antenos ir mikrobangų įtaisai. Leidykla „Mokslas“, 1985. 4, 65 p.
- [14] Constantine A. Balanis. Antenna Theory, Analysis and Design. Wiley & Sons, 3<sup>rd</sup> edition, 2005.
- [15] A. Matulis. Elektrodinamika. Ciklonas, 2001. 239 p.
- [16] S.Gao ir kiti. Antennas for Modern Small Satellites. IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 51, No.4, August 2009.
- [17] Gökhan Kiper, Eres Söylemez. Deployable Space Structures. 4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 2009.
- [18] John D. Kraus, Ronald J. Marhefka, Ahmad S. Khan. Antennas and Wave Propagation. Tata McGraw Hill Education Private Limited, 4th edition, 2002.
- [19] Joseph Costantine ir kiti. CubeSat Deployable Antenna Using Bistable Composite Tape-Springs. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol.11, 2012.
- [20] Erik D.Demaine, Joseph O'Rourke. Geometric Folding Algorithms. Linkages, Origami, Polyhedra. Cambridge University Press, 2007.



- [21] Nicholas Turner, Bill Goodwine, Mihir Sen. A review of origami applications in mechanical engineering. *Journal of Mechanical Engineering Science* 2016, Vol. 230(14) 2345–2362.
- [22] Koryo Miura. Method of Packaging and Deployment of Large Membranes in Space. The Institute of Space and Astronautical Science Report No.618, December 1985.
- [23] Landen A. Bowen. A Study of Action Origami as Systems of Spherical Mechanisms. Master thesis, Brigham Young University, 2013.
- [24] E. T. Filipov, G. H. Paulino, T. Tachi. Origami tubes with reconfigurable polygonal cross-sections. *Proc.R. Soc. A* 472: 20150607.
- [25] B.Jaffray. Minimally invasive surgery. *Arch Dis Child* 2005.
- [26] Christina L. Randall, Evin Gultepe, David H. Gracias. Self-folding devices and materials for biomedical applications. *Trends in Biotechnology* March 2012, Vol. 30, No. 3
- [27] Cagdas D. Onal ir kiti. Origami-Inspired Printed Robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014.
- [28] E. Hawkes ir kiti. Programmable matter by folding. *PNAS* July 13, 2010 107 (28) 12441-12445.
- [29] 15 Spectacular Buildings Where Origami Meets Architecture. November 26, 2019. [<https://freshome.com/2013/02/12/origami-inspired-buildings-architecture/>] [žiūrēta 2020-05-28].
- [30] A.E.Del Grosso, P.Basso. Adaptive building skin structures. *Smart Mater. Struct.* 19 (2010) 124011.
- [31] M. Salama, M. Lou, H. Fang. Deployment of Inflatable Space Structures: A Review of Recent Developments. AIAA-2000-1730.
- [32] Mark Schenk. Deployable Space Structures. Prezentacija. [<https://www.bristol.ac.uk/media-library/sites/composites/documents/Mark%20Schenk%20AM%20Talk.pdf>] [žiūrēta 2020-05-28].
- [33] Les Johnson. Solar Sails for Spacecraft Propulsion. NASA George C. Machall Space Flight Center, 2016. [<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20160005683.pdf>] [žiūrēta 2020-05-28].
- [34] Les Johnson ir kiti. Status of solar sail technology within NASA. *Advances in Space Research* 48 (2011) 1687–1694.
- [35] Christoph Sickinger, Lars Herbeck, Elmar Breitbach. Structural engineering on deployable CFRP booms for a solar propelled sailcraft. *Acta Astronautica* 58 (2006) 185 – 196.
- [36] Shun Yao, Xueli Liu, Stavros V. Georgakopoulos. A Novel Tunable Origami Accordion Antenna. *IEEE Antennas and Propagation Society*, 2014.
- [37] Shun Yao. Origami Reconfigurable Electromagnetic Systems. Dissertation of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering. Florida International University, 2017.
- [38] Xueli Liu ir kiti. Reconfigurable Helical Antenna Based on an Origami Structure for Wireless Communication System. *Microwave Symposium (IMS), 2014 IEEE MTT-S International*, At Tampa, FL.
- [39] B. Trumbore. Spring Into Action. [<http://trumbore.com/spring/>] [žiūrēta 2020-05-28].

- [40] Caleb Henry. SpaceX launches second batch of Starlink broadband satellites. <https://spacenews.com/spacex-launches-second-batch-of-starlink-broadband-satellites/> [žiūrėta 2020-05-27]
- [41] Circular waveguides. <https://www.qwed.eu/CircularWaveguides.pdf> [žiūrėta 2020-05-27]
- [42] A.P.King. The Radiation Characteristics of Conical Horn Antennas. Proc. IRE, vol. 38, no. 3, pp. 249–251, Mar. 1950.
- [43] Marvin G. Schorr, Fred J. Beck Jr. Electromagnetic Field of the Conical Horn. Journal of Applied Physics 21, 795 (1950).
- [44] Horn antenna. Electronics club. <https://electronicsclub.co.in/horn-antenna/> [žiūrėta 2020-05-27]
- [45] S.D.Guest, S.Pellegrino. The Folding of Triangulated Cylinders, Part I: Geometric Considerations. Journal of Applied Mechanics. December 1994, Vol. 61/773.
- [46] N. Kidambi, K.W.Wang. On the Dynamics of Kresling Origami Deployment. Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA. 2020.
- [47] Biruta Kresling. Natural twist buckling in shells: from the hawkmoth's bellows to the deployable Kresling-pattern and cylindrical Miura-ori. Proc. International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures IASS-IACM 2008.
- [48] Cai Jianguo ir kiti. Bistable Behaviour of the Cylindrical Origami Structure With Kresling Pattern. Journal of Mechanical Design, June 2015, Vol. 137/061406-1.
- [49] 3D Electromagnetic Field Simulator for RF and Wireless Design. <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss> [žiūrėta 2020-05-28].
- [50] Gerard J. Hayes ir kiti. Self-Folding Origami Microstrip Antennas. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 62, No. 10, October 2014.
- [51] Syed Imran Hussain Shah ir kiti. A Deployable Quasi-Yagi Monopole Antenna using Three Origami Magic Spiral Cubes. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 1536-1225 (c) 2018.
- [52] Dongju Lee ir kiti. Dipole and Loop-mode Switchable Origami Paper Antenna. Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 58, No. 3, March 2016.
- [53] An Introduction to HFSS: Fundamental Principles, Concepts, and Use. 2009 Ansoft, LLC.

# Summary

Rolanda Blinovaitė

## INVESTIGATION OF SATELLITE ORIGAMI TYPE ANTENNA

**The objective of this Master thesis is to design and investigate deployable horn antenna suitable for use in nanosatellites using origami engineering techniques.**

The nanosatellite market is quite recent (currently it is about 20 years old [1]), however it grows extremely fast. Nanosatellites were designed firstly for research purposes, though later they found their place in commercial sphere as well. For example, nanosatellites are used for various purposes, such as Earth observation, research on natural phenomena and human endeavours, Internet of things and other. Such fast growth is based on many advantages over big satellites, such as lower cost, less designing, smaller preparation time, possibility of short missions (suitable for technology demonstrations).

Though nanosatellites have very big potential, they have disadvantages as well. One of the main drawbacks is that nanosatellites are constrained by mass and size standard [3]. This standard is mostly important while launching the nanosatellite because of the standardized rack size in the launch rocket [4]. The primary payload often is geostationary satellites and nanosatellites take the free space which is left. When nanosatellite is already in the orbit, mass and size standard does not have such great importance anymore, thus nanosatellite could have deployable structures which transform into their final form after placing nanosatellite in orbit. One of these structures are antennas.

While designing deployable structure, it is important to take into account two aspects. First of all, the aim is to from as small size as possible transform the structure into as big size, as possible. The second aspect is that the deployed structure has to be as firm as possible. The firmness is characterized both by the material used (the material is critical in the space technologies) and the firmness of crease lines because often these places are more vulnerable to stress.

Lately, engineers started to think of origami art as the matter of technology and science. After studying origami structures mathematically it became clear that these structures have good firmness, deployability features. They are also very compact [37]. The literature review showed that there are prototypes of origami dipole/monopole and helical antennas which are suitable for space application in lower frequency bands (VHF, UHF, S-band). Also, there are other simple solutions for deployment of such types' antennas. However, as the requirements for data transmission speed and volumes grow very fast, there is a need for microwave wide bandwidth deployable antennas as well (X, K bands). This Master thesis shows that a high gain horn antenna could be designed as a deployable origami structure.

Keywords: origami antenna, origami engineering, nanosatellite, deployable antenna, horn antenna.

## 1 Priedas. Beselio funkcijų vertės.

1 lentelėje pateikiamos Beselio funkcijų ir jų išvestinių vertės, reikalingos norint apskaičiuoti apvaliojo bangolaidžio atkirtos dažnius norimoms modoms, arba esant užduotam atkirtos dažniui, apvaliojo bangolaidžio spindulį.

1 lentelė. Beselio funkcijų ir jų išvestinių vertės

Funkcijos numeris $m$	Funkcijos numeris $n$	Beselio funkcijos $J_m$ šaknis $\chi_{mn}$	Beselio funkcijos išvestinės $J'_m$ šaknis $\chi'_{mn}$
0	1	2,405	3,832
0	2	5,520	7,016
0	3	8,654	10,173
1	1	3,832	1,841
1	2	7,016	5,331
2	1	5,136	3,054
2	2	8,417	6,706
3	1	6,380	4,201