ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
TECHNICAL SCIENCE

CENTRAL ASIAN SCIENTIFIC JOURNAL
ISSN 3135-3061
2026. №4 (32), 2-том. 146–152 б.
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.23978480
Журнал сайты: https://cajournal.kz

ӘОЖ 621.396.67:681.5

CAD ЖҮЙЕСІНДЕ МОДЕЛЬДЕУДІ ЖӘНЕ 3D БАСЫП ШЫҒАРУДЫ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП АНТЕННАНЫ БАСҚАРУҒА АРНАЛҒАН АППАРАТТЫҚ КЕШЕНДІ ӘЗІРЛЕУ

Н.Ә. Дәндібай
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Дәндібай Нұрай Әділдинқызы — магистрант, Физика-техникалық ғылымдар институты, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан.

Ғылыми жетекші: Сыздыков Арман Базарбаевич — аға оқытушы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан.

© Н.Ә. Дәндібай, 2026

Аңдатпа: Мақалада бағытталған антеннаны азимут және бұрыштық биіктік бойынша бағыттауға арналған екі осьті аппараттық кешенді әзірлеу нәтижелері ұсынылған. Кешеннің механикалық бөлігі CAD жүйесінде параметрлік модельдеу әдісімен жобаланып, FDM технологиясы бойынша PETG материалынан 3D басып шығару арқылы дайындалды. Жетек ретінде NEMA 17 қадамдық қозғалтқыштары мен өздігінен тежелетін червякты беріліс қолданылды, ал осьтердің бұрыштық орны AS5600 магниттік кодерлері арқылы бақыланады. Басқару блогы ESP32 микроконтроллері негізінде құрылып, Hamlib кітапханасының rotctld қызметімен Easycomm II протоколы бойынша үйлесімді етіп жасалды, бұл Gpredict бағдарламасы арқылы төмен орбиталы жер серіктерін автоматты түрде сүйемелдеуге мүмкіндік береді. Бұрыштық ажырату қабілеті, айналу жылдамдығы, жүктеме моменттері және тісті доңғалақ тістерінің кернеуі есептелді. Есептеулер шығыс біліктегі момент 3,31 Н·м болғанда момент бойынша қор коэффициенті биіктік осі үшін 1,68, азимут осі үшін 2,19 құрайтынын көрсетті. Ұсынылған шешім жоғары оқу орындарының зертханалары мен студенттік жер станциялары үшін арзан әрі қайталануы оңай құрал бола алады.

Түйін сөздер: антенна айналдырғыш, CAD жүйесі, 3D басып шығару, FDM, қадамдық қозғалтқыш, червякты беріліс, ESP32, Hamlib, жер серігін сүйемелдеу.

Кіріспе

Соңғы онжылдықта шағын ғарыш аппараттарының, әсіресе CubeSat форматындағы наноспутниктердің саны күрт өсті, бұл жер үсті басқару және қабылдау станцияларына деген қажеттілікті арттырды. Төмен орбиталы (LEO) жер серіктері бақылаушының көкжиегінен бірнеше минут ішінде өтетіндіктен, олармен тұрақты радиобайланыс орнату үшін бағытталған антеннаны азимут пен бұрыштық биіктік бойынша үздіксіз бұрып отыру қажет [1, 3]. Бұл міндетті антенна айналдырғыш құрылғылар (ротаторлар) атқарады.

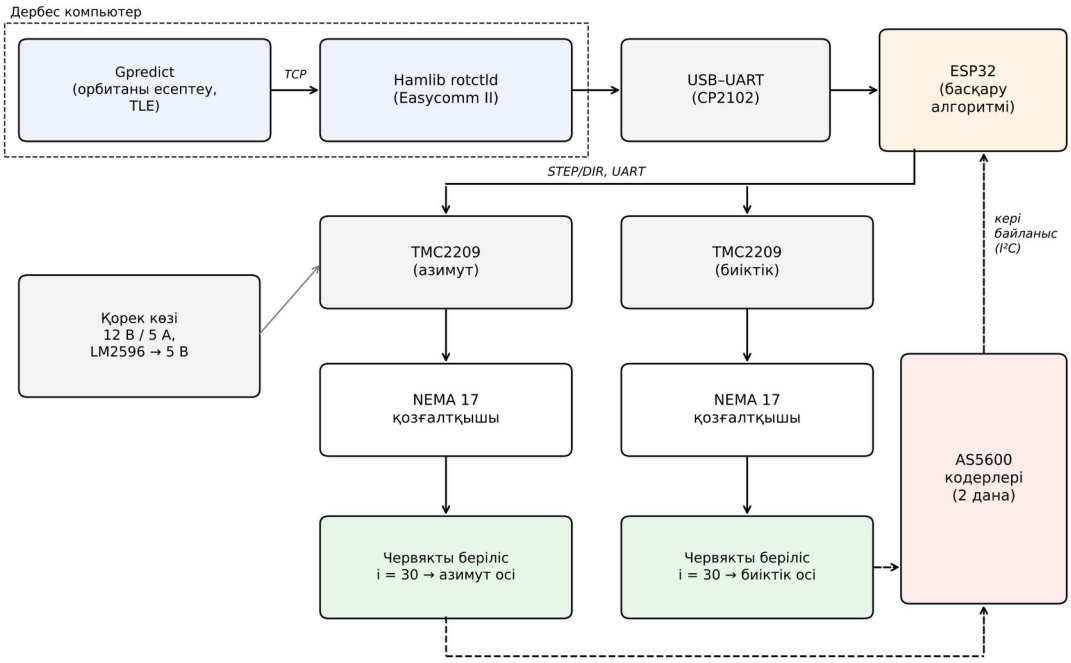
Нарықтағы коммерциялық екі осьті айналдырғыштар (мысалы, Yaesu G-5500, SPID RAS) сенімді болғанымен, олардың құны жоғары, ал конструкциясы жабық болғандықтан оқу және зерттеу мақсатында түрлендіруге қолайсыз. Сонымен қатар ашық бастапқы кодты жобалардың, атап айтқанда SatNOGS жобасының тәжірибесі [9] аддитивті технологиялар арқылы дайындалған тетіктерден жұмысқа қабілетті айналдырғыш жасауға болатынын көрсетті.

Автоматтандырылған жобалау (CAD) жүйелері мен FDM (Fused Deposition Modeling) технологиясы бойынша 3D басып шығарудың қолжетімділігі прототиптеу циклін бірнеше аптадан бірнеше күнге дейін қысқартуға, тетіктердің геометриясын нақты міндетке бейімдеуге және өнімнің өзіндік құнын едәуір төмендетуге мүмкіндік береді [4, 5]. Алайда басылған полимер тетіктердің беріктігі басып шығару параметрлеріне, тетіктің бағдарына және материалға тікелей тәуелді [6], сондықтан мұндай конструкцияларды жобалау кезінде беріктік пен жетек сипаттамаларын алдын ала есептеу маңызды.

Зерттеудің мақсаты – CAD жүйесінде модельдеу мен 3D басып шығару технологиясын қолдана отырып, антеннаны азимут және бұрыштық биіктік бойынша бағыттауға арналған арзан, қайталануы оңай аппараттық кешенді әзірлеу. Мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды: кешеннің құрылымдық сұлбасын әзірлеу; механикалық бөліктің параметрлік 3D моделін құру; жетек пен беріліс параметрлерін есептеу; басқару блогы мен бағдарламалық қамтамасыз етуді әзірлеу; кешеннің сипаттамаларын бағалау.

Зерттеу материалдары мен әдістері

Зерттеуде CAD жүйесінде параметрлік модельдеу, машина бөлшектерін инженерлік есептеу әдістері [7, 8], аддитивті өндіріс үшін жобалау қағидаттары [4, 14], сондай-ақ дайын прототипті зертханалық сынау әдістері қолданылды. Әзірленген кешен үш негізгі ішкі жүйеден тұрады: механикалық айналдырғыш, электрондық басқару блогы және дербес компьютердегі бағдарламалық қамтамасыз ету (1-сурет).



Сурет 1 – Антеннаны басқаруға арналған аппараттық кешеннің құрылымдық сұлбасы

Компьютерде орындалатын Gpredict бағдарламасы [11] жер серігінің орбиталық элементтері (TLE) негізінде оның ағымдағы азимуты мен бұрыштық биіктігін есептеп, Hamlib кітапханасының rotctld қызметіне [10] TCP арқылы жібереді. rotctld командаларды Easycomm II протоколына түрлендіріп, USB–UART интерфейсі арқылы басқару блогына береді. Микроконтроллер мақсатты бұрыштарды кодерлерден оқылған нақты бұрыштармен салыстырып, қадамдық қозғалтқыштардың драйверлеріне басқару импульстерін жібереді. Кешеннің негізгі компоненттері 1-кестеде келтірілген; оларды таңдау кезінде қолжетімділік, құн және ашық кітапханалармен үйлесімділік ескерілді.

Кесте 1 – Аппараттық кешеннің негізгі компоненттері

Компонент	Түрі / маркасы	Атқаратын қызметі

Микроконтроллер	ESP32-WROOM-32	Басқару алгоритмін орындау, Easycomm II командаларын өңдеу
Қадамдық қозғалтқыштар (2 дана)	NEMA 17, 17HS4401 (1,8°; 0,40 Н·м)	Азимут және биіктік осьтерінің жетегі
Драйверлер (2 дана)	TMC2209	Микроқадамды басқару (1/16), орам тогын реттеу
Кодерлер (2 дана)	AS5600 (12 бит)	Шығыс біліктердің бұрыштық орнын өлшеу
Беріліс (2 дана)	Червякты, m = 2 мм, i = 30	Моментті арттыру, өздігінен тежелу
Подшипниктер	608ZZ	Біліктердің айналуын қамтамасыз ету
Қорек көзі	12 В, 5 А; LM2596 түрлендіргіші	Қозғалтқыштар мен электрониканы қоректендіру
Корпус және тетіктер	PETG, FDM 3D басып шығару	Механикалық құрылым

Механикалық бөлікті CAD жүйесінде модельдеу

Айналдырғыштың механикалық бөлігі Autodesk Fusion 360 жүйесінде параметрлік модельдеу тәсілімен жобаланды. Модельдің негізгі өлшемдері (червяк модулі, тістер саны, білік диаметрі, подшипник ұяларының өлшемдері, отырғызу саңылаулары) жеке параметрлер кестесіне шығарылды, бұл бір өлшем өзгергенде бүкіл жинақтың геометриясын автоматты түрде жаңартуға мүмкіндік береді. Мұндай тәсіл әр түрлі антенналарға (Яги-Уда, спиральдық, шағын параболалық) бейімделген нұсқаларды жылдам алуға жағдай жасайды.

Конструкция екі модульден тұрады: төменгі – азимут модулі, жоғарғы – бұрыштық биіктік модулі. Әр модульде қадамдық қозғалтқыш, червякты жұп, шығыс білігі және кодер орналасқан. Кодердің диаметр бойынша магниттелген магниті шығыс біліктің ұшына орнатылады, сондықтан беріліс саңылауын (люфтін) айналып өтіп, антеннаның нақты орны тікелей өлшенеді. Модельдеу барысында тетіктердің өзара қиылысуы (интерференция) тексеріліп, жинау реттілігі пысықталды.

Тетіктердің геометриясы аддитивті өндіріс үшін жобалау (Design for Additive Manufacturing, DfAM) қағидаттарын ескере отырып әзірленді: асылып тұратын беттердің көлбеулігі 45°-тан аспайды, тісті доңғалақтар мен подшипник ұяларының осьтері басып шығару қабаттарына перпендикуляр бағытталады, бұрандалы қосылыстар үшін жылумен орнатылатын М3 жезқұймалар қарастырылған. Отырғызу орындары үшін 0,2–0,3 мм саңылау қабылданды.

Тетіктерді 3D басып шығару

Тетіктер FDM технологиясы бойынша PETG материалынан басып шығарылды. PETG PLA-мен салыстырғанда соққы тұтқырлығының жоғарылығымен, ылғалға төзімділігімен және шыны тәрізді күйге өту температурасының жоғарылығымен (шамамен 80 °C) ерекшеленеді, бұл құрылғыны ашық ауада пайдалану үшін маңызды [5]. Қабылданған басып шығару параметрлері 2-кестеде көрсетілген.

Кесте 2 – Тетіктерді 3D басып шығару параметрлері

Параметр	Мәні
Қабат биіктігі	0,2 мм
Сопло диаметрі	0,4 мм
Периметрлер саны	4 (тісті тетіктерде – 6)
Толтыру тығыздығы	40 % (корпус), 100 % (червяк, тісті доңғалақ)
Толтыру үлгісі	гироид
Сопло / үстел температурасы	240 °C / 80 °C
Басып шығару жылдамдығы	50 мм/с

FDM тетіктерінің механикалық қасиеттері анизотропты: қабаттар аралық бағыттағы беріктік қабат бойындағы беріктіктен едәуір төмен [6]. Сондықтан тісті доңғалақ тістері

қабат жазықтығында жататындай етіп басып шығарылды, ал жүктеме түсетін кронштейндер иілу кернеулері қабаттар бойымен әсер ететіндей бағдарланды.

Жетек пен берілісті есептеу

Бұрыштық ажырату қабілеті қадамдық қозғалтқыштың бір айналымдағы қадам санына (N = 200), микроқадам бөлуге (s = 16) және беріліс қатынасына (i = 30) тәуелді:

$$\theta = 360° / (N \cdot s \cdot i) = 360° / (200 \cdot 16 \cdot 30) = 0{,}00375°. \quad (1)$$

Іс жүзінде бағыттау дәлдігін механикалық ажырату емес, беріліс саңылауы мен кодердің ажырату қабілеті шектейді. 12 биттік AS5600 кодерінің ажырату қабілеті 360°/4096 ≈ 0,088° құрайды [13]. Бұл шама 2 м және 70 см диапазондарындағы Яги-Уда антенналарының сәуле шығару диаграммасының ені (ондаған градус) үшін жеткілікті [1, 2].

Червякты берілістің ПӘК-і червяктың көтерілу бұрышы γ мен үйкеліс бұрышы φ арқылы анықталады [7, 8]:

$$\gamma = \operatorname{arctg}(m \cdot z_1 / d_1), \quad \eta = \operatorname{tg}\gamma / \operatorname{tg}(\gamma + \varphi). \quad (2)$$

Модулі m = 2 мм, кіру саны $z_1 = 1$, бөлгіш диаметрі $d_1 = 20$ мм червяк үшін γ = 5,71°. Майланған PETG–PETG жұбы үшін үйкеліс коэффициентін f = 0,15 деп қабылдасақ, φ = arctg f = 8,53°, демек η ≈ 0,394. γ < φ шарты орындалатындықтан беріліс өздігінен тежеледі, яғни қозғалтқышқа қорек берілмеген кезде де антенна жел әсерінен бұрылмайды. Шығыс біліктегі айналу моменті:

$$T_{шығ} = T_қ \cdot i \cdot \eta, \quad (3)$$

мұндағы $T_қ$ – қозғалтқыштың жұмыс жылдамдығындағы моменті. 17HS4401 қозғалтқышы үшін 150 айн/мин жылдамдықта $T_қ \approx 0{,}28$ Н·м деп қабылданды, сонда $T_{шығ} = 0{,}28 \cdot 30 \cdot 0{,}394 \approx 3{,}31$ Н·м.

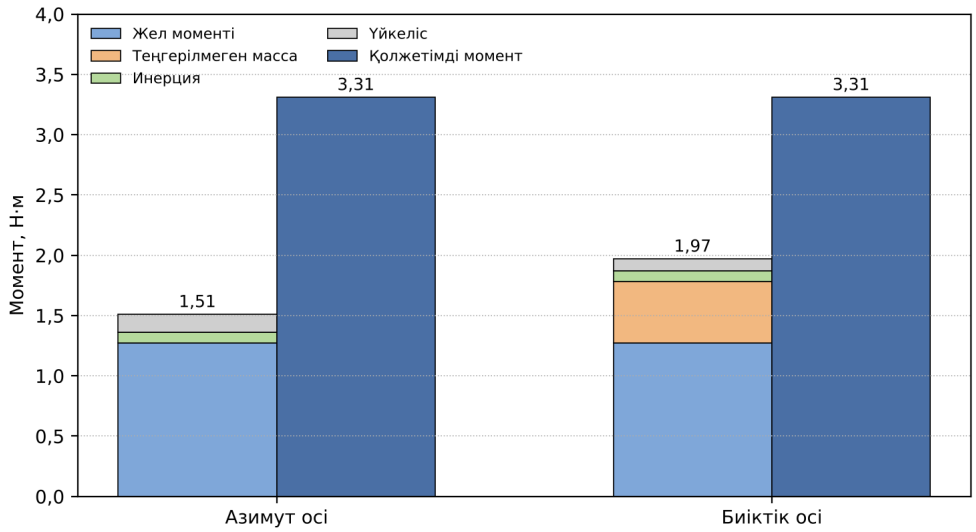
Жүктеме моментін бағалау үшін массасы 1,0 кг, траверса ұзындығы 1,0 м екі диапазонды Яги-Уда антеннасы қарастырылды. Жел жүктемесі мына өрнекпен анықталады:

$$F_ж = 0{,}5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_x \cdot A, \quad (4)$$

мұндағы ρ = 1,225 кг/м^3 – ауа тығыздығы, v = 12 м/с – есептік жел жылдамдығы, C_x = 1,2 – аэродинамикалық кедергі коэффициенті, A = 0,06 м^2 – антеннаның тиімді проекция ауданы. Сонда $F_ж \approx 6{,}35$ Н, ал қысым орталығының айналу осінен ығысуы r = 0,2 м болғанда жел моменті $M_ж \approx 1{,}27$ Н·м. Бұрыштық биіктік осі үшін бұған қарсы салмақпен толық теңгерілмеген массаның моменті ($M_g = 1{,}3 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}04 \approx 0{,}51$ Н·м), үдеу кезіндегі инерциялық момент ($M_j = J \cdot \varepsilon \approx 0{,}083 \cdot 1{,}05 \approx 0{,}09$ Н·м) және подшипниктердегі үйкеліс моменті (≈ 0,10 Н·м) қосылады. Есептеу нәтижелері 3-кестеде және 2-суретте келтірілген.

Кесте 3 – Айналдырғыштың есептік сипаттамалары

Сипаттама	Азимут осі	Биіктік осі
Шығыс біліктегі қолжетімді момент, Н·м	3,31	3,31
Жел моменті, Н·м	1,27	1,27
Теңгерілмеген масса моменті, Н·м	–	0,51
Инерциялық момент, Н·м	0,09	0,09
Үйкеліс моменті, Н·м	0,15	0,10
Қажетті жалпы момент, Н·м	1,51	1,97
Момент бойынша қор коэффициенті	2,19	1,68
Максималды айналу жылдамдығы, °/с	30	30
Бұрыштық ажырату (кодер бойынша), °	0,088	0,088



Сурет 2 – Осьтер бойынша қажетті және қолжетімді моменттерді салыстыру

Тісті доңғалақ тістерінің иілу кернеуі Льюис формуласы бойынша тексерілді [7]:

$\sigma = F_t / (b \cdot m \cdot Y), \quad F_t = 2 \cdot T_{шығ} / d_2, \qquad (5)$

мұндағы $d_2 = m \cdot z_2 = 60$ мм – доңғалақтың бөлгіш диаметрі, $b = 16$ мм – тіс ені, $Y = 0{,}358$ – $z_2 = 30$ үшін тіс пішінінің коэффициенті. Сонда $F_t \approx 110$ Н және $\sigma \approx 9{,}6$ МПа. PETG-нің созылу беріктігі шамамен 50 МПа екенін және FDM тетіктерінің анизотропиясын (төмендету коэффициенті 0,6) ескеріп, рұқсат етілген кернеуді $[\sigma] = 15$ МПа (қор коэффициенті 2) деп қабылдасақ, $\sigma < [\sigma]$ шарты орындалады.

Қажетті айналу жылдамдығын бағалайық. Биіктігі 400 км орбитадағы жер серігі зенит арқылы өткенде оның бақылаушыға қатысты бұрыштық жылдамдығы шамамен $v/h = 7{,}66$ км/с / 400 км ≈ 0,019 рад/с ≈ 1,1 °/с құрайды [3]. Қозғалтқыштың 150 айн/мин жылдамдығында шығыс білік 5 айн/мин, яғни 30 °/с жылдамдықпен айналады, бұл LEO жер серіктерін сүйемелдеуге жеткілікті қор береді. Бұл ретте қадам импульстерінің жиілігі $f = n \cdot N \cdot s/60 = 8000$ Гц құрайды, оны ESP32 микроконтроллерінің аппараттық таймерлері еркін қамтамасыз етеді. Тек зенитке жақын өтулерде азимут бойынша қажетті жылдамдық күрт өседі («кілт тесігі» әсері), бұл жағдай бағдарламалық деңгейде траекторияны алдын ала талдау арқылы өңделеді.

Электрондық басқару блогы және бағдарламалық қамтамасыз ету

Басқару блогы ESP32-WROOM-32 модулі негізінде құрылды. TMC2209 драйверлері UART арқылы бапталады: орам тогы, микроқадам бөлу және шусыз StealthChop режимі бағдарламалық түрде орнатылады [12]. Екі AS5600 кодерінің I²C мекенжайы бірдей (0x36) болғандықтан, олар ESP32-нің екі жеке аппараттық I²C шинасына қосылды [13]. Бастапқы орынды анықтау (homing) үшін әр осьте Холл датчигі қарастырылған.

Микробағдарлама Arduino ортасында C++ тілінде жазылды және келесі функцияларды орындайды: Easycomm II протоколының «AZ», «EL», «SA», «SE» командаларын талдау; қадамдық қозғалтқыштарды трапециялық жылдамдық профилімен басқару; кодер көрсеткіштері бойынша тұйық контурлы түзету (сезімсіздік аймағы 0,2°); ағымдағы координаталарды компьютерге қайтару; осьтердің шекті бұрыштарын (азимут 0–360°, биіктік 0–90°) бақылау. Компьютер жағында rotctld қызметі Easycomm II моделімен (Hamlib тізіміндегі 202 нөмірлі модель) іске қосылады, ал Gpredict бағдарламасы оған 4533 порты арқылы қосылады [10, 11].

Нәтижелер және талқылау

Кешеннің бағыттау дәлдігін бағалау үшін қателердің есептік бюджеті құрылды. Кодер шығыс білікке орнатылғандықтан, червякты берілістің саңылауы тұйық контурда өтеледі және жиынтық қатеге тікелей әсер етпейді. Негізгі қате көздері ретінде кодердің кванттауы, басқару алгоритмінің сезімсіздік аймағы, магниттің біліктегі эксцентриситеті және діңгекті

орнату қатесі қарастырылды; соңғы екеуі үшін әдеби деректер мен құрастыру тәжірибесіне сүйенген болжамды мәндер қабылданды. Өзара тәуелсіз кездейсоқ қателердің жиынтығы квадраттық қосынды түрінде анықталды:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{(\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2)}. \qquad (6)$$

Есептеу нәтижелері 4-кестеде келтірілген.

Кесте 4 – Бағыттау қатесінің есептік бюджеті

Қате көзі	Бағалау тәсілі	Мәні, °
Кодердің кванттауы (δ_1)	360°/4096 мәнінің жартысы	±0,044
Сезімсіздік аймағы (δ_2)	Микробағдарлама параметрі	±0,20
Магниттің эксцентриситеті (δ_3)	Қабылданған болжам	±0,30
Діңгекті көкжиек пен солтүстікке бағдарлау (δ_4)	Қабылданған болжам	±0,50
Жиынтық қате (δ_{Σ})	(6) өрнек бойынша	±0,62

Алынған ±0,62° жиынтық қате 2 м және 70 см диапазондарындағы шағын Яги-Уда антенналарының жартылай қуат деңгейіндегі сәуле шығару диаграммасының енінен (ондаған градус) екі ретке жуық кіші, сондықтан бағыттау қатесінен туындайтын күшейту шығыны іс жүзінде елеусіз [1, 2]. Жиынтық қатеге ең көп үлесті діңгекті орнату қатесі қосады, демек оны азайту үшін станцияны орнату кезінде солтүстікке бағдарлауды белгілі жер серігі немесе Күн бойынша калибрлеу тиімді. Бағыттау дәлдігін цифрлық инклинометр мен эталондық бұрыш өлшегіш арқылы тәжірибелік тексеру және Gpredict бағдарламасымен нақты жер серіктерін сүйемелдеу сынақтары зерттеудің келесі кезеңінде жоспарлануда.

Ұсынылған кешеннің негізгі артықшылықтары: коммерциялық аналогтармен салыстырғанда құнының айтарлықтай төмендігі; параметрлік модель есебінен басқа антенналарға тез бейімделуі; Hamlib және Gpredict сияқты кең таралған ашық бағдарламалармен тікелей үйлесімділігі; тетіктерді кез келген FDM принтерінде қайта басып шығару мүмкіндігі. Сонымен бірге бірқатар шектеулер анықталды. Біріншіден, полимер тетіктер тұрақты жүктеме кезінде сырғымалылыққа (ползучесть) ұшырайды, ал тістердің тозуы уақыт өте беріліс саңылауын арттырады. Екіншіден, Астана жағдайында қысқы температура −35 °C-қа дейін төмендейді, бұл PETG-нің морттығын арттырады, ал күн радиациясы материалдың ескіруін жеделдетеді.

Осы шектеулерді жою үшін келесі жетілдірулер ұсынылады: червякты металдан дайындап, оны басылған доңғалақпен жұптастыру; ашық ауада пайдаланылатын тетіктер үшін ультракүлгін сәулеге төзімді ASA материалын қолдану; электрониканы ылғалдан қорғалған корпусқа орналастыру; ESP32-нің Wi-Fi модулі арқылы қашықтан басқару мүмкіндігін енгізу.

Қорытынды

Жұмыста CAD жүйесінде параметрлік модельдеу мен FDM 3D басып шығару технологиясын қолдана отырып, антеннаны екі ось бойынша бағыттауға арналған аппараттық кешен әзірленді. Кешеннің құрылымдық сұлбасы және Hamlib/Gpredict бағдарламаларымен үйлесімді басқару архитектурасы ұсынылды; DfAM қағидаттары ескерілген механикалық бөліктің параметрлік 3D моделі құрылды; жетекті есептеу шығыс біліктегі момент 3,31 Н·м, момент бойынша қор коэффициенті 1,68 (биіктік) және 2,19 (азимут), максималды айналу жылдамдығы 30 °/с, кодер бойынша бұрыштық ажырату 0,088° екенін көрсетті; тісті доңғалақ тістеріндегі кернеу (9,6 МПа) рұқсат етілген мәннен төмен; бағыттау қатесінің есептік бағасы ±0,62° құрады, бұл антеннаның сәуле шығару диаграммасының енінен әлдеқайда кіші.

Әзірленген кешен жоғары оқу орындарының зертханаларында радиотехника, автоматтандыру және ғарыштық технологиялар бойынша оқу құралы ретінде, сондай-ақ студенттік жер станцияларында наноспутниктермен байланыс орнату үшін қолданылуы

мүмкін. Зерттеудің келесі кезеңінде бағыттау дәлдігін тәжірибелік тексеру, кешенді ұзақ мерзімді далалық сынақтан өткізу және оның климаттық төзімділігін арттыру жоспарлануда.

Әдебиеттер тізімі:

1. Balanis C.A. Antenna Theory: Analysis and Design. – 4th ed. – Hoboken: Wiley, 2016. – 1104 p.

2. Kraus J.D., Marhefka R.J. Antennas for All Applications. – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2002. – 938 p.

3. Vallado D.A. Fundamentals of Astrodynamics and Applications. – 4th ed. – Hawthorne: Microcosm Press, 2013. – 1106 p.

4. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. Additive Manufacturing Technologies. – 3rd ed. – Cham: Springer, 2021. – 675 p.

5. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges // Composites Part B: Engineering. – 2018. – Vol. 143. – P. 172–196. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.

6. Popescu D., Zapciu A., Amza C., Baciu F., Marinescu R. FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review // Polymer Testing. – 2018. – Vol. 69. – P. 157–166. – DOI: 10.1016/j.polymertesting.2018.05.020.

7. Budynas R.G., Nisbett J.K. Shigley's Mechanical Engineering Design. – 11th ed. – New York: McGraw-Hill Education, 2020. – 1104 p.

8. Иванов М.Н., Финогенов В.А. Детали машин: учебник для вузов. – 12-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2008. – 408 с.

9. SatNOGS Rotator v3 [Электрондық ресурс] // Libre Space Foundation. – URL: https://wiki.satnogs.org/SatNOGS_Rotator_v3 (жүгінген күні: 01.11.2026).

10. Hamlib – Ham Radio Control Libraries [Электрондық ресурс]. – URL: https://hamlib.github.io/ (жүгінген күні: 01.11.2026).

11. Gpredict: Real-time satellite tracking and orbit prediction application [Электрондық ресурс]. – URL: https://github.com/csete/gpredict (жүгінген күні: 01.11.2026).

12. TMC2209 Power Driver for Stepper Motors: Datasheet [Электрондық ресурс] // Analog Devices (Trinamic). – URL: https://www.analog.com/en/products/tmc2209.html (жүгінген күні: 01.11.2026).

13. AS5600 12-bit Programmable Contactless Potentiometer: Datasheet [Электрондық ресурс] // ams OSRAM. – URL: https://ams-osram.com/products/sensor-solutions/position-sensors/ams-as5600-position-sensor (жүгінген күні: 01.11.2026).

14. ISO/ASTM 52900:2021. Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary. – Geneva: ISO, 2021. – 28 p.