

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

YENİ NƏSİL LAZER ŞÜA İDARƏEDİCİ VƏ AKTİV TRANSPONDER SİSTEMLİ NANOPEYK MODELİNİN İŞLƏNİLMƏSİ

İxtisas: 3325.01 - “Telekommunikasiya texnologiyası”

Elm sahəsi: Texnika elmləri

İddiaçı: **Nadir Arzu oğlu Atayev**

Fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün təqdim edilmiş
dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı – 2025

Dissertasiya işi Azərbaycan Texniki Universitetinin “Radiotexnika və telekommunikasiya” kafedrasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi rəhbər:

texnika elmləri doktoru, professor

Mehman Hüseyn oğlu Həsənov

Rəsmi opponentlər:

AMEA-nın həqiqi üzvü, texnika elmləri doktoru, professor

Əli Məmməd oğlu Abbasov

texnika elmləri doktoru, professor

Ənvər Tapdıq oğlu Həzərخانov

texnika elmləri doktoru, professor

Bəxtiyar Məqatil oğlu Əzizov

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının Azərbaycan Texniki Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən ED 2.41 Dissertasiya Şurası.

Dissertasiya şurasının

sədri:

texnika elmləri doktoru, professor

Bayram Qənimət oğlu İbrahimov

Dissertasiya şurasının

elmi rəhbəri:

texnika üzrə fəlsəfə doktoru, dosent

Zəfər Ələsgər oğlu İsmayilov

Elmi rəhbərin

sədri:

texnika elmləri doktoru, professor

Famil Hüseyn oğlu Məmmədov



İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Nanopeyklərdə, xüsusən də peyklərarası aşağı yer orbitində peyk əlaqə toplusunun tətbiqi ilə yüksək informasiya həcmnin təmin edilməsi bu sahədə əhəmiyyətli inkişafı təmsil edir. Optik rabitə sistemləri, yüksək məlumat ötürmə sürəti, aşağı enerji istehlakı, məlumat təhlükəsizliyi və miniatürləşdirmə potensialı baxımından əhəmiyyətli üstünlükləri təklif edərək, radiotezlik rabitəsilə müqayisədə, məlumat ötürmə sürəti, tezlik zolağı və təhlükəsizlik məsələlərində yaranan çətinlikləri aradan qaldırmağa imkan verir.

Nanopeyklərdə peyk əlaqə toplulu rabitə texnologiyasının tətbiqi böyük həcmli məlumatların sürətli və etibarlı şəkildə ötürülməsinə, real zaman rejimində yüksək inteqrasiyalı məlumat mübadiləsinə şərait yaradır. Texniki baxımdan, nanopeyk platformalarında istifadə olunan lazer şüa mənbəli optik rabitə altsistemləri, az kütləli optika və yönləndirmə mexanizmlərinin miniatürləşdirilməsi ilə cubesat strukturuna inteqrasiyasını asanlaşdırır.

Optik rabitə sistemlərinin tətbiqində mühüm texnologiyalar arasında LUME (Laser Ultra-miniaturized Encoder) optik sistemləri (NASA), COTS cubesat Laser Communication Terminal (MIT Lincoln Laboratory), TeraByte InfraRed Delivery (TBIRD) sistemi (MIT), Laser Communication Demonstration (LCRD) (NASA) və Space Optical Communications Research Advanced Technology (SOC-RAT) sistemi (JAXA) mühüm yer tutur. Bu texnologiyaların müəllifləri optik rabitədə yüksək sürət və effektivliyə nail olmaq üçün yeni metodologiyalar tətbiq etmişlər. Bütün bu tədqiqatlar göstərir ki, optik rabitə texnologiyalarının tətbiqi yüksək ötürmə sürətinə malik, etibarlı və enerji səmərəli sistemlərin inkişafını təmin edir.

Bu mövzunun nəzəri aktuallığını vurğulayan mühüm parametrlərə optik rabitə altsisteminin atmosferdə doyma şüalanma indeksi, atmosferik sınma əmsalı, turbulentlik və zəifləmə göstəriciləri, çıxış signal-maneə nisbəti, yönəlmə xəta göstəricisi, yerüstü stansiyanın qəbuledici apertura diametri və peyk əlaqə toplusunun parametrləri daxil olaraq, atmosfer turbulentliyi, optik

şüalanmanın istiqaməti, yönəlmə və digər mühüm xətlər yarada bilirlər.

Dissertasiya mövzusunun praktiki əhəmiyyəti bu nəzəri analizlərlə hazırlanan optik və radiotezlikli rabitə sistemlərinin ilkin mühəndislik modeli əsasında nanopeyk platformasının layihələndirilməsidir. Bu layihələndirmədə simulation tool kit (STK) mühitində orbital analizlər aparılaraq, peykin rabitə müddəti və yerləşdirilmiş optik rabitə sistemlərinin göstəriciləri analiz edilmişdir.

Nəticə olaraq, optik rabitə missiyalı nanopeyklər, xüsusən də peyk əlaqə topologiyasında, rabitə problemlərini həll etmək, yüksək məlumat ötürmə sürəti təmin etmək və enerji səmərəliliyini artırmaq üçün mühüm əhəmiyyət daşıyaraq, peyklərarası rabitədə yeni nəticələrin əldə edilməsinə və davamlı inkişafın təmin olunmasına şərait yaradır.

Tədqiqatın obyekti və predmeti. Tədqiqatın obyekti nanopeyk platformasında telekommunikasiya sistemlərinin tətbiqidir. Tədqiqatın predmeti optik rabitə texnologiyasına əsaslanan yeni nəsil lazer şüa idarəedici və aktiv transponder altsistemlərinin layihələndirilməsi və nanopeyk modelində işlənilməsidir.

Tədqiqatın məqsəd və vəzifələri. Tədqiqatın məqsədi yeni nəsil lazer şüa idarəedici və aktiv transponder altsistemlərinin texniki göstərici, iş prinsipi və effektivliyinin artırılması istiqamətində nanopeyk modelinin işlənilməsidir.

Əsas vəzifələr aşağıdakılardır:

1. Peyk əlaqə toplusunda " π üzük-tor quruluşu" topologiya sxemli nanopeyk platformalarının layihələndirilməsi və effektivliyinin orbital-mexaniki parametrlərlə təhlil etmək.

2. Optik və radiotezlik rabitə şəbəkəli kosmik və yerüstü seqmentlərin iş prinsiplərinin təhlili və onların nanopeyk platformalarına uyğunluğunu təmin edən yeni nəsil telekommunikasiya şəbəkəsini qurmaq.

3. Nanopeyk platformalarında tətbiq ediləcək optik lazer rabitə, idarəedici nəzarət və proqram idarəli radio sistemlərinin yeni arxitekturasını, proqram alqoritmlərini və iş prinsiplərini hazırlamaq.

4. Atmosferik turbelansın optik rabitə siqnallarına təsirindəki, kvazi-dinamik və statik göstəricilərinin analiz edilərək, rabitə

kanallarının keyfiyyətinə təsirinin qiymətləndirmək.

5. Nanopeyk platformasında nəzəri hesablamalar və STK simulyasiya nəticələri əsasında cubesat ilkin mühəndislik struktur sınaqlarını aparmaq və onun praktiki tətbiqi üçün təkliflər vermək.

Tədqiqat metodları. Dissertasiya işində qarşıya qoyulmuş məqsədə çatmaq üçün ehtimal nəzəriyyəsinin müddəalarından, sistemli analiz nəzəriyyəsindən, atmosfer təsirlərinin riyazi modelləşdirilməsi üsullarından, elektrik rabitə, dövrə və ölçmə nəzəriyyəsindən, kvazi-dinamik və statik modelləşdirmə üsullarından, ədədi hesablama, kompüter modelləşdirmə və proqramlaşdırma üsullarından istifadə edilmişdir.

Müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar:

1. İlkin mühəndislik model cubesat əsasında aşağı yer orbitdə “ π üzük-tor quruluşlu” peyk əlaqə topologiya sxeminin orbital-mexaniki parametrləri və bu topologiyanın tətbiqi ilə rabitə keyfiyyətinin artırılma metodikası.

2. Nanopeyk platformaları fonunda mövcud optik və radiotezlik rabitə texnologiyalarının təsnifatı və hər iki texnologiyanın birgə tətbiqi ilə hibrid telekommunikasiya sistemlərinin səmərəliliyinin artırılması üsulları.

3. Cubesat strukturunda aparılan tədqiqat və analizlərin nəticəsinə əsaslanan optik lazer rabitə və idarəedici-nəzarət sistemlərinin sxemləri, mikrokontroller proqram alqoritmləri və hesablanmış göstəriciləri.

4. Optik lazer rabitə sistemində atmosfer turbulentliyinin, atmosferik kvazi-dinamik və statik amillərin təsirlərinin nəzəri və praktiki modelləşdirilməsi, signal-maneə nisbətinin və rabitə kanalının keyfiyyətinin artırılması üsulları, eləcə də nanopeyk modelində tətbiq metodları.

5. STK mühitində peyk əlaqə toplulu cubesat arxitekturasının simulyasiyası ilə nanopeyk platformalarının rabitə müddətinin və texniki keyfiyyət göstəricilərinin artırılması üsulları.

Tədqiqatın elmi yeniliyi:

1. Nanopeyk platformasında yeni nəsil optik rabitə və radiotezlik rabitə texnologiyalarının birgə tətbiqilə hibrid telekommunikasiya sisteminin qurulma prinsipi işlənmişdir.

2. Optik lazer rabitə və idarəedici-nəzarət sistemlərinin, cubesat ilkin mühəndislik modelində tətbiqi üçün aparılmış nəzəri hesablarla yeni funksional blok diaqramlar və alqoritmlər təklif edilmişdir.

3. Optik rabitə nəzəriyyəsi üzrə ehtimal-zaman xarakteristikaları və atmosferik kvazi-dinamik funksiyalarının optik lazer rabitə altsistemli cubesat strukturlarında nəzərə alınmaqla riyazi işlənilmə metodu və modelləri təklif olunmuşdur.

4. Optik lazer rabitə sisteminə təsir edən kvazi-dinamik və statik, eləcə də, atmosferik turbelans amilləri nəzərə alınmaqla signal-manəə nisbətinin riyazi modeli təklif olunmuşdur.

5. Nanopeykin əldə edilən nəzəri hesablama göstərici və dəyişənləri əsasında STK simulyasiya və analiz mühitində aşağı yer orbiti boyunca, peyk əlaqə toplusunun “ π üzük-tor quruluşu” tam optik rabitə topologiya sxemi təklif edilmişdir.

Tədqiqatın nəzəri və praktiki əhəmiyyəti. Təklif edilən cubesat ilkin mühəndislik strukturu əsasında aşağı yer orbitinin “ π üzük-tor quruluşu” peyk əlaqə topologiyası üzrə, optik və radiotezlik rabitəli yerüstü seqmentlərində müxtəlif analitik və tətbiqi işlər həyata keçirilmişdir. Bu işlər çərçivəsində ehtimal-zaman xarakteristikaları və atmosferik kvazi-dinamik göstəriciləri nəzərə alınaraq optik lazer rabitə və idarəedici-nəzarət altsistemlərinin analizi aparılmış, müvafiq hesablama, simulyasiya, layihələndirmə və test prosesləri icra edilərək, 4U cubesat fiziki modeli hazırlanmışdır.

Aprobasiyası və tətbiqi. Dissertasiya işində əldə edilmiş əsas elmi-nəzəri və praktiki nəticələr beynəlxalq və respublika konfranslarında, simpoziumlarında və seminarlarında məruzə edilmiş və müzakirə olunmuşdur:

“İnformatika, idarəetmə və süni intellekt” 9-cu beynəlxalq elmi-texniki konfransı, Xarkov, 2022-ci il; “Yol ver türkün bayrağına !” 27-ci beynəlxalq elmi simpoziumu, Bakı, 2022-ci il; AzTU-da keçirilən “Gənclər və elmi innovasiyalar” elmi texniki konfransı, Bakı, 2022-ci il; AzTU-da keçirilən “Enerji səmərəliliyi və yaşıl enerji texnologiyaları” respublika elmi-texniki konfransı, Bakı, 2022-ci il; “Beynəlxalq Mühəndislik Elmləri” beynəlxalq konfransı, Bakı, 2022-ci il; “Ağıllı Kommunikasiya

Texnologiyaları və Virtual Mobil Şəbəkələr” 5-ci beynəlxalq konfransı, Hindistan, 2023-cü il; AzTU-da keçirilən “Mütərəqqi texnologiyalar və innovasiyalar” 7-ci elmi-texniki konfransı, Bakı, 2023-cü il; MAKADA-da keçirilən “Azərbaycanda kosmik texnologiyalar və Heydər Əliyev dühası” elmi konfransı, Bakı, 2023-cü il; “KANS 2023” beynəlxalq elmi seminarı, Tehran, 2023-cü il; 74-cü Beynəlxalq Astronavtika Konqresi (IAC), Bakı, 2023-cü il; İnformasiya və Kommunikasiya Texnologiyalarının Tətbiqi üzrə 17-ci IEEE Beynəlxalq Konfransı AICT, Bakı, 2023-cü il; Kibernetika və İnformatika Problemləri üzrə 5-ci Beynəlxalq Konfrans PCI, Bakı, 2023-cü il; 75-ci Beynəlxalq Astronavtika Konqresi (IAC), Milan, 2024-cü il.

Dərc olunmuş əsərlər. Dissertasiya işinin mövzusunı və nəticələrini əks etdirən tədqiqatlar və onların nəticələrinə dair ölkə və xarici elmi-texniki nəşrlərdə 6 elmi məqalə və 15 konfrans materialı çap olunmuşdur. Elmi işlərdən, Azərbaycan Respublikasında məqalələrin dərc olunması tövsiyə edilən dövrü elmi nəşrlər siyahısı üzrə 1, dövrü elmi nəşrlərin daxil olduğu beynəlxalq xülasələndirmə və indeksləmə sistemləri üzrə isə 6 məqalə çap olunmuşdur.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilat. Dissertasiya işi Azərbaycan Texniki Universitetində yerinə yetirilmişdir.

Dissertasiyanın struktur bölmələrinin ayrılıqda həcmi qeyd olunmaqla dissertasiyanın işarə ilə ümumi həcmi. Dissertasiya işi giriş, III Fəsil, 20 yarımbaşlıqdan ibarətdir. Dissertasiyanın giriş hissəsinin həcmi 8917, I Fəslin həcmi 34982, II Fəslin həcmi 35024, III Fəslin həcmi 46070 işarədən, ümumi həcmi ədəbiyyat siyahısı istisna olunmaqla 127574 işarə sayından ibarətdir. Dissertasiya özündə 82 şəkil, 18 cədvəl, 130 adda ədəbiyyat siyahısı və 3 əlavəni birləşdirir.

TƏDQIQATIN ƏSAS MƏZMUNU

Girişdə dissertasiya mövzusunun aktuallığı, onun elmi yeniliyi və praktiki əhəmiyyəti əsaslandırılmış, tədqiqatın məqsədi, məsələlərin həlli üçün yeni üsul və metodlar analiz edilmiş, müdafiəyə çıxarılmış əsas müddəalar, elmi yeniliyi və praktiki əhəmiyyəti, elmi nəticələri, həmçinin işin strukturu, aprobasiyası və tədqiqatların nəticələrinin tətbiqi haqqında məlumatlar öz əksini tapmışdır.

Birinci fəsildə kosmik mühitin əhəmiyyəti və onun nanopeyk platformalarına təsiri, bu mühitin fiziki və dinamik mexaniki parametrləri baxımından ətraflı müzakirə olunaraq analiz edilmişdir. Tədqiqat nəticəsində kosmik mühitin ölçü parametrləri və strukturu, peyklərin orbital hərəkətinə təsiri, eləcə də bu platformaların işləməsində mühüm olan faktorlar, məsələn, orbital xarakteristikalar diqqət mərkəzinə alınmışdır. Nanopeyklər əsasında aşağı yer orbitinin xüsusiyyətləri, bu platformaların məruz qaldığı atmosfer və mexaniki təsirlər cubesat uçuşa yararlı modeli əsasında ətraflı təhlil edilmişdir.

Ümumilikdə, kiçik peyk texnologiyasının tarixi inkişafı və mərhələləri, bu peyk sistemlərinin mövcudluğundan indiyə qədər olan əsaslı texniki dəyişikliklər və yeniliklər ətraflı şəkildə araşdırılmışdır. Bu mərhələlər kiçik peyklərin altsistemləri, istifadə olunan texnologiyalar, orbital əməliyyatlar və missiya nəticələri kimi məlumatlarla zənginləşdirilmişdir. Həmçinin, müxtəlif layihə və missiyaların nailiyyətləri və qarşılaşdığı problemlər çərçivəsində əldə olunan təcrübələr xüsusi olaraq vurğulanmışdır.

Nanopeyk platformalarında telekommunikasiya üçün istifadə edilən radiotezlik və optik rabitə sistemlərinin işləmə prinsipləri, peyk-peyk və yer-peyk istiqamətində rabitə strukturu, avadanlıq, qurulma prinsipi və topologiyaları müqayisəli şəkildə təhlil edilmişdir.

Mövcud radiotezlikli rabitə nanopeyk platformaları artıq yüksək göstəricilərlə tətbiq edilməsinə baxmayaraq, kosmik fəzada daim tədqiqat mərkəzindədir. Bununla belə, daim təkmilləşən optik

rabitə texnologiyalarının tətbiqi qarşıda duran ən vacib məsələ olaraq qalır.

Bu iki rabitə texnologiyasının müqayisəsi əsasında optik rabitənin aşağıdakı üstünlükləri müəyyən edilmişdir¹:

- Yüksək tezlik zolağının eni: Optik rabitə, radiotezlik rabitə ilə müqayisədə məlumatları daha yüksək sürətlə ötürə bilər.

- Təhlükəsiz rabitə: Optik rabitə siqnalların kənar müdaxilələrdən qorunmasında daha təhlükəsizdir.

- Çəki və yığcamlıq: Optik rabitə sistemləri daha kiçik və yüngül olmaqla yanaşı, radiotezlik sistemlərindən daha az enerji tələb edir.

Lakin optik rabitənin çatışmazlıqları da qeyd edilmişdir:

- Məhdud əhatə dairəsi: Optik rabitə geniş görmə xəttini tələb etdiyindən, müəyyən bölgələrdə fasiləsiz əlaqəni təmin etmək çətin ola bilər.

- Atmosfer təsirləri: Optik rabitə siqnallarına duman və bulud kimi atmosfer şəraiti mənfi təsir göstərə bilər.

- Dəqiq şüalanma tələb: Hərəkət edən peyklərlə dəqiq istiqamətləndirilmiş şüalanma daha çətin təşkil olunur.

Peyk əlaqə toplusu əsasən radiorabitə və inkişafda olan sərbəst məkan optik rabitə şəbəkə texnologiyaları əsasında qurularaq, peyklərarası birbaşa əlaqəli məlumat mübadiləsini və yerüstü stansiyalardan başqa istiqamətlərə məlumat ötürülməsi və emalını təmin edir.

Tədqiqat çərçivəsində peyk əlaqə şəbəkəsi üçün “ π şəbəkəsi” modeli seçilərək aşağıdakı parametrlər tövsiyə edilmişdir:

- 6 orbit müstəvisi (hər biri 30° aralı).
- Hər orbit müstəvisi üzrə 11 peyk toplusu.
- Aşağı Yer orbitində 500 km hündürlük.
- Peykin əyilmə bucağının $\varphi = 86.4^\circ$ olması.

Yuxarıda qeyd olunanları nəzərə alaraq, şəkil 1-də aşağı yer orbitindəki peyk toplusunun konseptual sxemi, rabitə

¹ Gibalina, Z., & Fadeev, V. Optical inter-satellite link in comparison with RF case in Cubesat system. – Russia, 2017. – 10 p.

geometriyası, kosmik və yerüstü seqmentlərin ötürmə xətt quruluşu göstərilmişdir.

Üzük və tor kosmik peyk topologiyası rabitə prinsipinə əsasən, istənilən regionun bir yerüstü stansiya ilə fasiləsiz (7/24) nəzarətinin saxlanılması mümkündür. Bu halda bir peyk həmin zona üzərindən keçdikdən sonra digər eyni və ya fərqli orbit müstəvisindəki peykə, eləcə də yerüstü stansiyadan məlumatları kommutasiya edir.

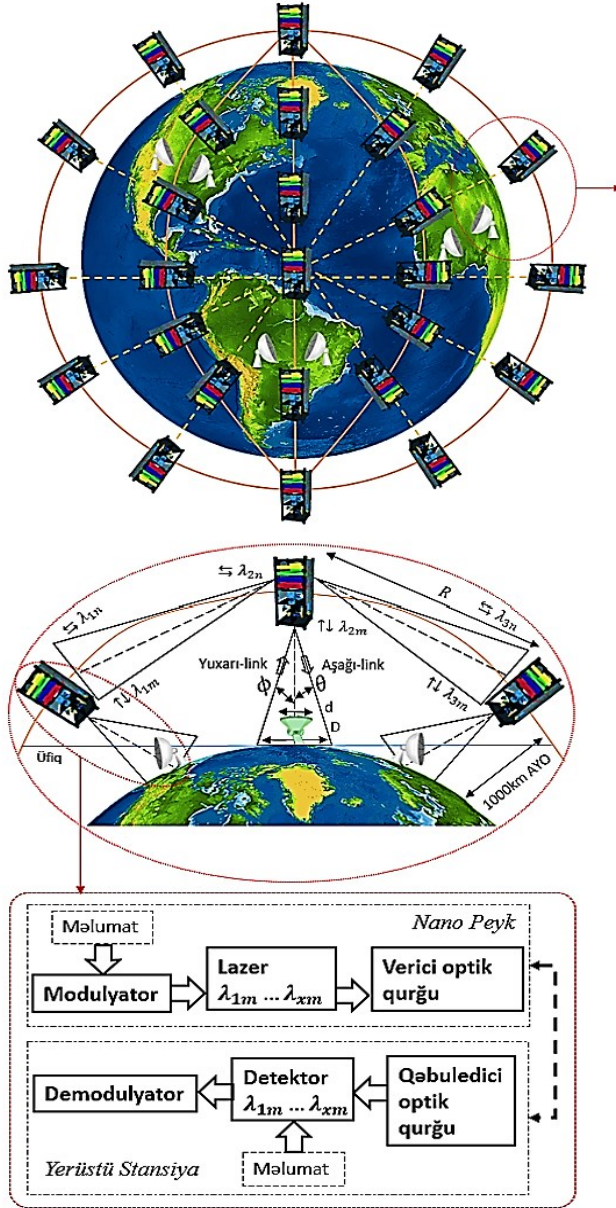
Digər halda, hər bir peyk öz orbiti və konkret region üzrə hərəkət trayektoriyasına uyğun göstəricilər əsasında çalışaraq geniş əhatəli, lakin qısa müddətli rabitəni təmin edir.

Lakin optik və radiotezlik rabitəsinin üstünlüklərindən istifadə edərək, seçilmiş orbit müstəvisindəki peyklərlə hibrid konfigurasiya əsasında rabitə təşkil etmək mümkündür. Bu zaman optik rabitənin üstünlüklərinə əsaslanaraq məlumatların həcm və ötürülmə sürətinin yüksək olması və gecikmənin minimal səviyyədə saxlanılması təmin olunur.

Şəkil 1-də cubesat peyklərinin nümunəvi orbit müstəvisi üzrə, göstərilmiş optik rabitə topologiyasına baxdıqda $\Leftrightarrow \lambda_{1n,2n...xn}$ - dalğa uzunluğu peyklərarası qarşılıqlı məlumat mübadiləsinə, $\uparrow\downarrow \lambda_{1m,2m...xm}$ - dalğa uzunluğu isə yerüstü stansiya ilə peyk arasında məlumat mübadiləsinə əks etdirir. Bu modeldə θ – divergensiya bucağı, rad; ϕ - əyilmə bucağı, d - qəbuledici teleskopun ölçüsü, m; D - apertura diametri, m; $I(\theta)$ - peykin bucaq titrəyiş parametridir.

Tədqiqat işində cubesat strukturu yer səthindən 500 km məsafədəki aşağı yer orbitində yerləşdirilmiş, məlumat mübadiləsinin məsafəsi 2100 km və bucaq nisbəti $\Phi = 10^0$ kimi ilkin dəyərlər qəbul edilmişdir.

Transponderin dalğa uzunluğu $\lambda = 1550 \text{ nm}$ seçilmişdir ki, bu da yerüstü optik rabitə sistemlərində sönmə əmsalının az olması ilə daha effektiv sayılır.



Şəkil 1. π üzük-tor quruluşlu aşağı yer orbitinin peyk əlaqə toplusu, onun geometriya və transmissiya sxemi

Yerüstü stansiya ilə tam duplex rabitə üçün lazer kommunikasiya xəttinin digər parametrləri olaraq, divergensiya bucağı $\theta = 100 \mu rad$, qəbuledici teleskopun ölçüsü $d = 60 \text{ sm}$ və vericinin gücü $P_{ver} = 1 \text{ Vt}$ müəyyən edilmişdir. Ən müasir qəbuledicinin həssaslıq göstəricisini $1E^{-6}$ bit xətası ilə təxminən 1000 Ph/bit hesab etdikdə, yerüstü stansiya və ətraf orbitdəki peyklərlə məlumat mübadiləsi üçün paket həcmi 10 Gb/s olmaqla, qəbuledicinin tələb etdiyi güc dəyəri -29 dB təşkil edir.

Aparılan analizlərə əsasən, optik rabitə idarəetmə və optik rabitə transponder alt sistemlərində lazer diodlarından istifadə olunaraq, optik şüanın dalğa uzunluğunun optik lifin şəffaflıq pəncərələrindən biri ilə üst-üstə düşməsi, çıxış şüasının gücünün kifayət qədər böyük olması, onun optik mühitə effektiv daxil edilməsi, optik şüanın müxtəlif modulyasiya üsullarının tətbiqinə imkan verməsi, habelə elektrik enerjisinin sərfiyyatının, cihazın qabarit və çəki göstəricilərinin aşağı olması önəmlidir.

İkinci fəsilində peyklərin istehsal fazasının addımlarına qoyulan tələblərə uyğun olaraq, cubesat ilkin mühəndislik modelinin layihələndirilməsində istifadə olunan əsas parametrlər cədvəl 1-də verilmişdir. Bununla, cubesat uçuşa yararlı modelin demək olar ki, bütün lazımi altsistemlərinin gələcək tədqiqatlarda seçilməsi və ya layihələndirilməsi mümkündür.

Optik rabitə idarəedici və transponder altsistemli strukturunun layihələndirilməsində, ilk olaraq bu altsistemin funksional blok sxeminin hazırlanması, daha sonra isə 3 fəzalı dizayn prosesi və hər komponent təşkilədicisinin ayrıca işlənməsi ilə həyata keçirilməsi mümkündür.

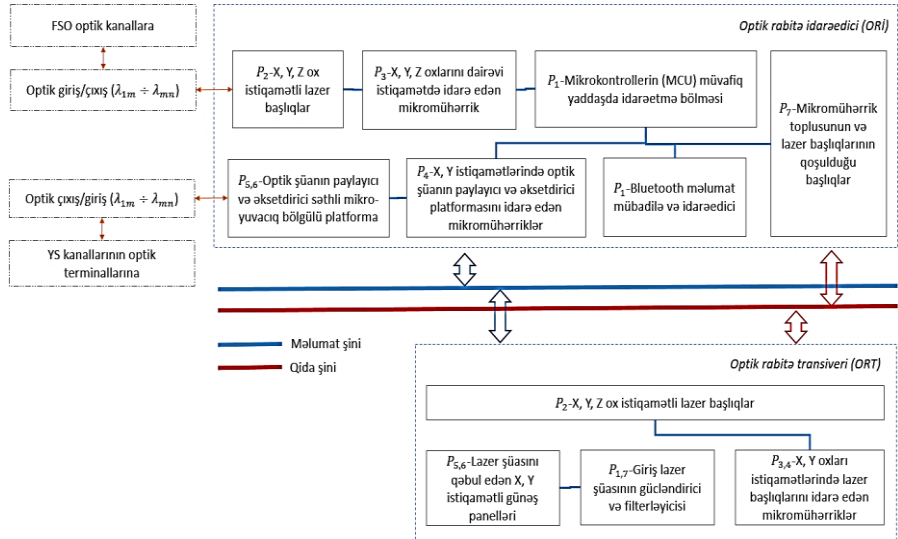
Şəkil 2-də cubesat peykinin 3U ölçülü ümumi optik rabitə altsisteminin funksional blok sxemi göstərilmişdir.

Cədvəl 1

**Cubesat ilkin mühəndislik modelinin layihələndirilməsindən
öncə hesablanmış göstəricilər**

Verilən/parametr	Dəyər/göstərici
Peyk toplu şəbəkə topologiyası	π üzük-tor quruluşlu 6 orbit müstəvi xətt düzülüşü (hər biri 30^0 aralığında) olmaqla orbit müstəvi xətt üzrə 11 peyk toplusu
Peyk və orbit müstəvisinin əyilmə bucağı/eksentrislik (ϕ)	86.4^0
Orbitin mərkəzinə kimi olan məsafə və ya semi-major oxu (a)	$6.878 * 10^3$ km
Orbit hündürlük və mövqeyi (H_{orbit})	Aşağı yer orbitində 500km dairəvi yönlənmə
Orbitdə tam dövretmə periodu (T_{orbit})	1.57 saat = 94.2 dəq $\approx$ 95 dəq
Orbitin və onunla peykin hərəkət sürəti (v_{orbit})	7.61 km/san
Yer səthinin qaranlıq olma müddəti ($T_{qaranlıq}$)	0.58 saat = 34.8 dəq
Yer səthinin işıqlıq olma müddəti ($T_{ışıqlıq}$)	1.17 saat = 70.2 dəq
Optik rabitə altsisteminin dalğa uzunluğu (λ_{OR})	500 nm – 2000 nm
Optik lazer rabitə sisteminin orta-kvadratik dalğa uzunluğu ($\sqrt{\lambda}$)	1250 nm
Cubesat 2U struktur kütləsi (m)	3 kq
Optik lazer şüa vericisinin çıxış gücü (P_{ver})	1 Vt
Qəbuledici diafraqmanın apertur diametri (d)	0.1 m
Müstəvi optik şüa diametri (D)	10 km
Yarımbucaq divergensiyası (θ)	0.001 radian

Şəkildə iki əsas şin kanalı təsvir edilmişdir: birinci şin məlumat şini olub, özündə bütün giriş-çıxış interfeys və portlarını birləşdirir, ikinci isə qidalanma şini olub, bütün altsistem hissələrini lazımi elektrik enerjisi ilə təmin edir.



Şəkil 2. Cubesat 2U optik lazer rabitə sistemini əhatə edən hissələrin funksional sxemi

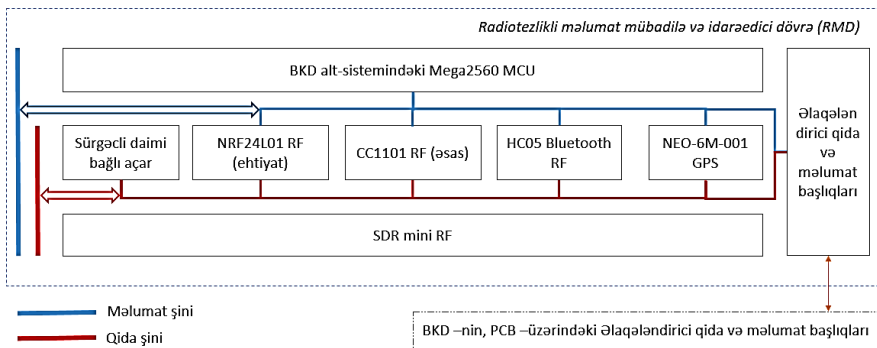
Şəkil 2-dən göründüyü kimi, sxem iki bölməyə, optik rabitə idarəedici və transponder altsistemlərinə ayrılmışdır. Hər birinin layihələndirilməsi və çalışma funksionallığı aşağıda təsvir edilmişdir.

Layihələndirilmiş altsistemin çalışma məntiqinə gəldikdə, idarəetmə blokundan daxil olan siqnallar lazer başlığına və yarım şəffaf güzgülü servo mikromühərriklərə eninə impuls modulyasiya siqnalı verərək, onların lazımi bucaq altında döndərilməsini təmin edir. Həmçinin, digər rəqəmsal çıxış interfeysi vasitəsilə daxil olan komandaya uyğun olaraq hər bir lazeri işə salma funksiyası yerinə yetirilir. Beləliklə, yarım şəffaf təbəqəyə yönləndirilmiş lazer şüası, servo sistem vasitəsilə 4 istiqamətdə hərəkət etdirilərək əks etdirilir.

Layihələndirilmiş optik rabitə transponder altsisteminin işləmə prinsipinə gəldikdə, Mega2560 mikrokontrolleri servo

mikromühərrikləri 0^0 - 180^0 dönmə bucağı ilə hərəkətə gətirərək, üzərində yerləşmiş X, Y, Z oxları boyunca yönlənməni imitasiya edir. Bu, həmçinin yerüstü stansiyanın günəş panelləri ilə qəbul etdiyi şüanın açılış ϕ bucağını və bununla da 3 fəza ölçülü hərəkəti təmin edir. Bu proses, eləcə də ümumi 3U optik rabitə strukturunun daxili komponentləri və mühüm funksionallıqları barədə aşağıdakı alt-bölmə başlıqları üzrə ətraflı məlumat verilmişdir.

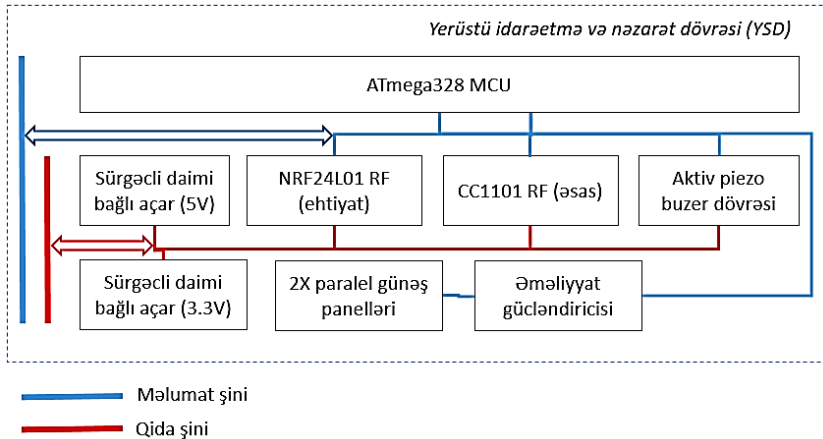
Radio məlumat dövrə əsaslı idarəedici və nəzarət strukturunun layihələndirilməsində, 1U struktur quruluşuna daxil olan əsas rabitə altsistemi olaraq, masaüstü testlərin aparılması üçün yerüstü proqram təminatlı və uzaqməsafəli radio rabitə əlaqəli radiotezlik modulu ilə təmin edilmişdir. Bu struktur sxemin quruluşu şəkil 3-də göstərilmişdir.



Şəkil 3. Cubesat radio məlumat dövrəsinin funksional blok sxemi

Yuxarıdakı şəkildən göründüyü kimi, dövrənin bütün komponentləri birbaşa giriş açarının bağlanması ilə elektrik qida dövrə altsistemindən gələn elektrik enerjisi ilə qidalandıqdan sonra çalışmağa başlayır. Bort kompüter dövrəsi altsistemində emal edilərək toplanmış məlumat CC1101 radiotezlik verici modulu vasitəsilə yerüstü stansiyaya göndərilir. Burada, NRF24L01 radiotezlik modulu əvvəlki radiotezlik rabitə modulu üçün ehtiyat olaraq nəzərdə tutulmuşdur və məlumat kəsintisi yarandığı halda, əsasən daha yaxın məsafədə və ya digər yerüstü stansiya ilə rabitəni

təmin etmək üçün istifadə edilir. NEO-6M-001 isə platformanın yerləşdiyi coğrafi istiqaməti təyin etmək üçün nəzərdə tutulmuşdur və mövqe təyin etmə və idarəedici altsistemin mühüm bir hissəsidir.



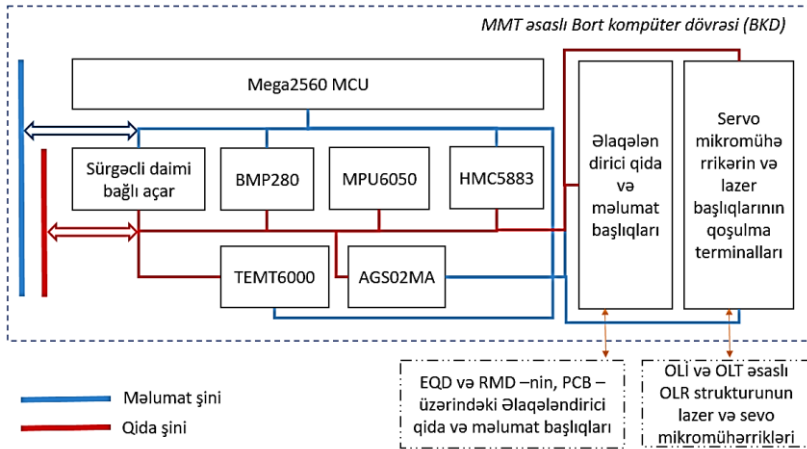
Şəkil 4. Cubesat yerüstü stansiya dövrəsinin funksional blok sxemi

Şəkil 4-dən göründüyü kimi, Atmega328 mikrokontrolleri 5 V və 3.3 V gərginlik mənbəyinə qoşularaq bütün komponent və modulların qidalanmasını təmin edir. Eyni zamanda, 2 ədəd paralel qoşulmuş günəş paneli ilə qəbul edilmiş vahid və sıfır səviyyəli optik rabitə şüası, ilk olaraq qeyri-invertor əməliyyat gücləndirici dövrəsi ilə gücləndirilərək cari mikrokontrollerin analoq terminalına qoşulur və emal prosesi zamanı istifadəçi proqram interfeysi ilə daim rabitədə qalır. Radio məlumat dövrəsinə oxşar olaraq, burada da CC1101 radiotezlik modulu əsas rəqəmsal məlumat mübadiləsi üçün istifadə edilir. Aktiv piezo buzzer isə öz növbəsində mikrokontrollerin rəqəmsal terminalına qoşularaq mühüm məlumatları səs indikasiyası ilə bildirir.

Bu tədqiqat işində bort kompüter və mövqeni təyin etmə və idarəedici quruluşun interfeys dövrələri üçün proqram alqoritmlərinin struktur təhlili aparılmış və yerüstü stansiya dövrəsində əsas məlumat idarəetmə komponenti kimi Atmega328 mikrokontrollerindən istifadə olunmuşdur. Mikrokontroller əsaslı sistemdə xarici interfeys modulları və komponentlər arasında məlumat mübadiləsi və

siqnalların emalını həyata keçirmək üçün xüsusi mühitdə proqram təminatı hazırlanmışdır. Bunun üçün cubesat ilkin mühəndislik modelinin struktur funksiyaları əvvəlcədən hazırlanmış alqoritmlər əsasında C++ proqramlaşdırma dilində yazılaraq mikrokontrollerin keş yaddaşına yüklənmişdir.

Qeyd olunduğu kimi, bu dövrə üzərində yerləşən sensor və modul məlumatlarının emalı cubesat strukturunun mövqeni təyin etmə və idarəetmə funksionallığını təmin etməklə yanaşı, optik lazer rabitə, radio məlumat dövrəsi və elektrik qida dövrə altsistemlərinin idarəsi və məlumat paylaşılmasında önəmli rol oynadığı müəyyən edilmişdir. Bort kompüter dövrəsinin layihələndirilməsi üçün onun funksional struktur sxemi isə şəkil 5-də təqdim edilmişdir.



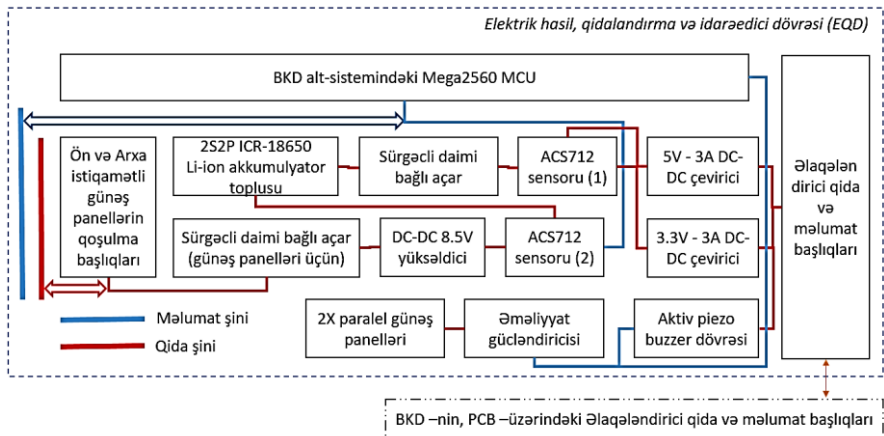
Şəkil 5. Cubesat bort kompüter dövrə altsisteminin funksional blok sxemi

Şəkil 5-dən göründüyü kimi, elektrik qida dövrəsilə tənzimlənməmiş 8.4 V li-ion batareya toplusunun gərginliyi Mega2560 mikrokontrollerin girişinə verilir və daxilindəki 3.3 V və 5 V xətti tənzimləyicilər vasitəsilə bütün dövrə komponentlərinin qidalanma terminallarına ötürülür.

Dövrəyə optik lazer rabitə altsistemləri, yəni optik rabitə idarəedici və transponder servo mikromühərrikləri, lazer başlıqları,

eləcə də elektrik qida dövrəsi və radio məlumat dövrlərinin müvafiq məlumat və qida xətlərini birləşdirmək üçün əlaqələndirici terminalar daxil edilmişdir.

Cubestat ilkin mühəndislik model strukturunun layihələndirilməsi zamanı idarəetmə və nəzarət əsaslı elektrik qida dövrə altsisteminin əsas funksiyalarından biri bütün altsistemlərin elektrik enerjisi ilə təmin edilməsidir. Təklif olunan ilkin mühəndislik model strukturunda elektrik qida dövrə altsisteminin müvafiq komponentlərinin təkrarlanması ilə elektrik enerjisinin hasilatı və avtonom qidalanma sisteminin sxemi və quruluşu layihələndirilmişdir. Bu funksional blok sxem isə şəkil 6-də təsvir edilmişdir.



Şəkil 6. Cubestat elektrik qida dövrə altsisteminin funksional blok sxemi

Şəkil 6-da göstərilən dövrənin iş prinsipini analiz etdikdə, ilk olaraq günəş panellərindən əldə edilən təqribən 5.5 V, 170 mA elektrik göstəricilərinin platformanı fasiləsiz enerji ilə təmin edən 2S2P-18650 li-ion batareya toplusunu tam qidalandırmağa kifayət etmədiyi müəyyən edilmişdir. Bu məqsədlə, gərginlik yüksəldici dövrədən istifadə edilərək gərginlik 8.5 V-a qaldırılır və bu enerji ACS712 cərəyan və gərginlik ölçmə sensorunun girişinə yönəldilir. Paralel olaraq, batareyalardan alınan enerji elektrik açarı vasitəsilə

digər ACS712 sensorundan keçərək 5 V-3 A və 3.3 V-3 A sabit cərəyan çeviricilərinə ötürülür və müvafiq olaraq aşağı gərginliyə gətirilir.

Optik rabitə transponder altsistemini idarə edən bort kompüter dövrəsində yer məhdudiyyəti səbəbindən günəş panelli optik şüa qəbuledicisinin əməliyyat gücləndiricisi və paralel səs indikasiyalı aktiv buzzer dövrələri optik rabitə proqram alqoritminə uyğun olaraq ardıcılıqla həyata keçirilir.

Üçüncü fəsildə optik rabitə və radiotezlik rabitə şəbəkə altsistemləri, onların funksionallığını təmin edən və telekommunikasiya əsaslı missiyaların icrasını həyata keçirən altsistemlərin funksionallıqları, iş prinsipləri və tətbiq istiqamətləri geniş tədqiq edilmişdir. Optik rabitə və radiotezlik şəbəkə altsistemlərinin effektivliyi ətraflı müzakirə olunaraq, nanopeyk platformaları ilə uyğunluğu və tətbiq sahələri müəyyən edilmişdir.

Bununla, son illərdə proqram idarəli radio platformalarının tətbiqi aktualıq qazanmışdır. Bu platformaların əsas üstünlükləri arasında aşağı enerji tələbatı (1 Vt–10 Vt), geniş tezlik diapazonu (50 MHz–8 GHz), geniş diskretləşdirmə tezlik aralığı (32 MHz–56 MHz) və, ən əsası, ənənəvi radiotezlik rabitə sistemlərindəki fiziki komponentlərin (mikşer, modem, kodek, filtr və s.) sahə proqramlaşdırılan qapı massivləri vasitəsilə proqramla idarə edilməsi daxildir². Bu xüsusiyyətlər cubesat strukturlarında geniş tətbiq imkanları yaradaraq, radiotezlik rabitə və optik rabitə sistemlərinin birgə yüksək məlumat emalını təmin etməsinə, radiotezlik rabitə əsaslı mobil yerüstü stansiyalarda tələb olunan tezlik diapazonuna avtomatik uyğunlaşmasına və zəif güclü siqnalların retranslyasiyasına şərait yaradır.

Optik rabitə idarəetmə altsistemi cubesat strukturunun ən önəmli altsistemlərindən biri olaraq, əvvəlki elmi-praktiki tədqiqatların (yeni nəsil 3D optik kommutator) yeni tətbiq istiqamətini özündə əks etdirir. Cari sistem optik kommutator, optik şəbəkələrin arxitektura və lokal sistemlərdə istifadə olunan optik lifli

² Joshi, M. P., Patil, S. A., & Shimpi, D. C. Design and implementation of BPSK audio transmitter & receiver using SDR. – India, 2017. – 5 p.

veriliş sistemlərinin operativ marşrutlaşdırmasını, informasiya axınlarının sürətini və effektiv kommutasiyasını təmin etməklə yanaşı, aşağıdakı üstünlüklərə malikdir:

Lazer işıq mənbələrinin bir toplu və ya ayrı-ayrılıqda 360° fırlanma başlığı ilə şüa mənbələrinin sayından asılı olaraq kompakt yığılması, bununla ölçünün, sərf olunan materialın və yekun maliyyə dəyərinin aşağı saxlanması.

- Yekun qurğuda lazer başlıqlarının iki yüksək dəqiqlikli piezo-keramik aktuator vasitəsilə idarə olunması, yarımşəffaf güzgünün hərəkətinin kommutasiya istiqamətindəki siqnalların kommutasiya müddətinin artırılması.

- Qurğuya inteqrasiya edilmiş elektron nəzarət və ölçmə sistemi vasitəsilə kommutatora daimi monitoring və yaranmış problemlərin effektiv diaqnostikasının aparılması.

Optik rabitə transponder altsistemi, aktiv radiotezlik transponderlərindən fərqli olaraq, x, y, z üç ox nöqtəvili lazer başlıqlı verici şüa mənbəyi və qəbuledici fotodetektor komponentlərindən ibarət olub, yerüstü stansiya ilə tam duplexli optik rabitəni təmin edir.

Bu fəsildə cubəsət uçuşa yararlı modelinin layihələndirilməsi zamanı riyazi analizlərin aparılması ilə mühit və struktur qarşılıqlı daxili təsirlərinin nəticələrini özündə əks etdirən əyriyə quruluşu, eləcə də alınan göstəricilər əsasında kompüter simulyasiya mühitində missiyanın ilkin tədqiqi aparılmışdır.

Atmosfer turbulentliyinin miqyasından bilavasitə asılı olan (σ_R^2) intensivliyinin dəyişməsi cubəsət ilkin mühəndislik model nümunəsində aşağıda təyin edilmiş qiymətlərlə MATLAB–da analiz edilərək riyazi əyrisi şəkil 7–də verilmişdir³:

$$\sigma_R^2 = 1.23 C_n^2 k_z^{\frac{7}{6}} z^{\frac{11}{6}} \quad (1)$$

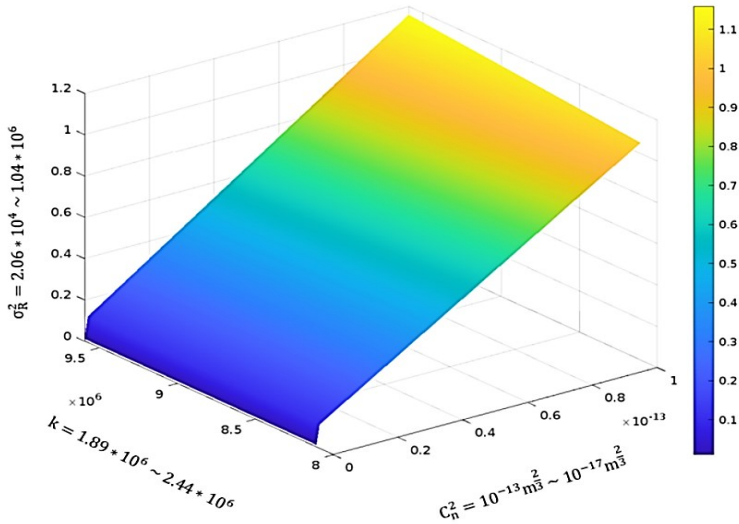
Burada C_n^2 - atmosfərik turbulentliyə aid optik refraksiya indeksi,

³ Maharjan, N., Devkota, N., & Kim, B. W. Atmospheric effects on satellite–ground free space uplink and downlink optical transmissions. // Appl. Sci., 2022, 12, – p. 10944.

$m^{-\frac{2}{3}}$; $k = 2 \frac{2\pi}{\lambda}$ optik dalğa sayı, m^{-1} ; z - bağlantı məsafəsidir (500 – 2000 km), m.

Kanal vaxtının dəyişməsi nəzəri kvazistatik model əsasında hesablanmışdır. Bu model, çərçivələr arasında yeni qiymətə dəyişən simvol çərçivəsi (koherentlik vaxtı) zamanı kanalın sönməsinin sabit qalması ideyasına əsaslanır.

Alınmış əyriyə əsasən, qeyd etmək olar ki, kosmik atmosfer mühit təsirləri birbaşa $\exp \uparrow (\sigma_R^2, C_n^2)$ səbəb olaraq, iki ox müstəvisində k dəyərinin deviasiyasız artımına nəticələnir.



Şəkil 7. Çıxış optik şüa turbulentliyinin, dispersiya intensivliyindən asılılığı

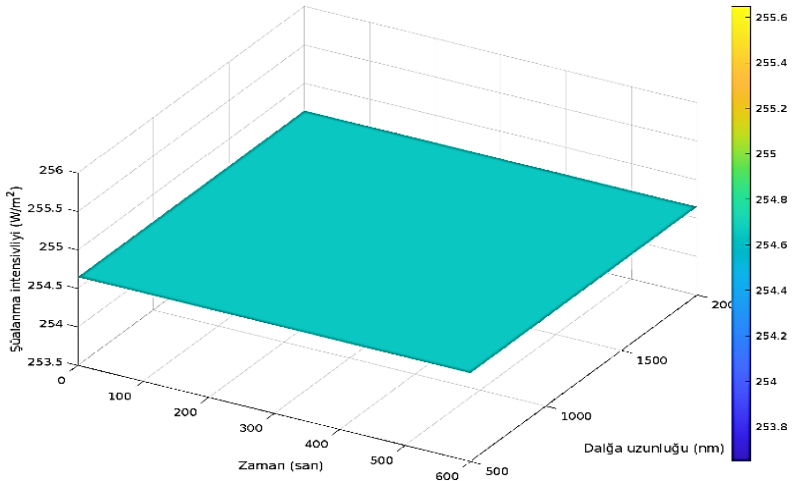
Bununla, optik rabitə sistemində maksimal veriliş görmə zolağının (D) təmini, eləcə də, minimal turbelans təsiri üçün 3D optik kommutator əsaslı optik rabitə idarəedicinin əksetmə və istiqamətlənmə göstəricilərini dinamik olaraq tənzimləmək əsas götürülür.

Aşağı yer orbitindən atmosfer boyunca doyma şüalanma göstəricisində öz növbəsində atmosfer turbulentliyi kimi MATLAB-da analiz edilərək, riyazi əyrisi şəkil 8-də verilmişdir:

$$I_{doy} = \frac{0.37(n-1)^2 P}{(2r^2)e^{\left(-\frac{2.77}{h}\right)}}, \text{ Vt/m}^2 \quad (2)$$

Burada n - atmosferin sınma əmsalı; P - optik siqnalın gücü, Vt; r - qəbuledici aperturanın radiusu, m; h - qəbuledicinin hündürlüyüdür, m.

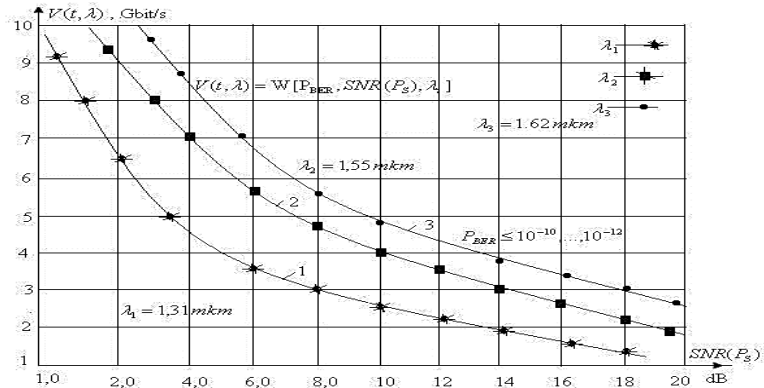
Müvafiq hesablanmanın aparılması üçün cədvəl 1-in aşağı yer orbitinin (H) hündürlük, optik vericinin çıxış gücü (P_{ver}) və (λ_n) çıxış dalğa uzunluq aralığına istinad edilmişdir.



Şəkil 8. Aşağı yer orbitində doyma şüalanmasının zaman və dalğa uzunluqlarına görə atmosferik zəifləməsi

Alınmış əyrinin göstəricilərinə əsasən qeyd etmək olar ki, doyma şüalanmasının intensivliyi əsasən xətti mütnasiblik asılılığı olub dalğa uzunluğunun dəyişməsindən aslıdır.

Sərbəst məkan optika siqnalların turbulent mühit təsirlərini $\lambda = 1.31 \text{ mkm}$, $\lambda = 1.55 \text{ mkm}$, $\lambda = 1.62 \text{ mkm}$ dalğa uzunluqların təsirini nəzərə almaq siqnal-maneə nisbətindən asılılıq qrafiki şəkil 9-da qurulmuşdur.



Şəkil 9. Sərbəst məkan optikasında spektrə görə optik sıxlaşdırma kanallarının signal-maneə nisbətindən asılılığı

Şəkil 9-dan görünür ki, spektral sıxılma sistemlərinə əsaslanan sərbəst məkan optika kanal sayının artması $C_{max}(\Delta F_k, \lambda_i, N_k)$ - sistemin ötürmə qabiliyyətinin qədər artmasına səbəb olur. Lakin bu, çıxış optik kanallarının keyfiyyət göstəricisinin eksponensial olaraq azalmasına gətirib çıxarır.

Atmosfer mühitindəki optik siqnalların keyfiyyət parametrlərindəki təsirinə gəldikdə, burada peyk-peyk, peyk-yer və yer-peyk bağlantıları üçün ötürücü və qəbuledici terminallar arasındakı təxmini əlaqə aşağıda göstəriləyi kimi, optik sistemlərin keyfiyyət göstəricisi olaraq signal-maneə nisbəti (SMN) baxımından nəzərdən keçirilir⁴.

$$P_{qəbuledici} = P_{verici} \frac{d_L^2}{(d_T + \theta L)^2} 10^{-\alpha \frac{L}{10}}, \text{ Vt} \quad (3)$$

Burada P_{verici} - verici güc, Vt; d_L - qəbuledici aperturasının diametri, m; d_T - verici aperturasının diametri, m; θ - divergensiya bucağı, radian; L - verici ilə qəbuledici arasındakı məsafə, m; α - atmosferik zəifləmə əmsalındır, dB/km.

⁴ Chan, W. S. Free-space optical communications. // J. Lightwave Tech., 2006, 24(12), – pp. 4750-4762.

Məlumdur ki, atmosferin qeyri-bərabərliyi, temperatur və hava təzyiqindəki dəyişikliklərlə yanaşı, işıq parıltısının intensivliyinə və mühitin istilik əmsalına təsir göstərərək optik turbulentliyə səbəb ola bilər. Optik siqnallardakı parıltı intensivliyini ifadə etmək üçün müxtəlif modellər mövcuddur. Təqdim edilən kanal modelləri geniş diapazonda qamma turbulentliyini simulyasiya edərək, ehtimal sıxlığı funksiyası belədir⁵:

$$P(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I) \quad (4)$$

Burada $\alpha\beta$ - statistik paylanmanın parametrləri; I - işıq intensivliyi, Wt/m^2 ; $\Gamma(x)$ – qamma funksiyası; $K_{\alpha-\beta}$ - modifikasiya olunmuş ikinci növ Bessel funksiyasıdır.

Ümumiyyətlə, rabitə kanallarının çıxışında keyfiyyət göstəricisi kimi istifadə olunan SMN aşağıdakı kimi təyin olunur:

$$SMN(P_S) = Q_F \cdot \frac{\Delta F_E}{\Delta F_k} [(1+r)/(1-r^{0.5})^2] \quad (5)$$

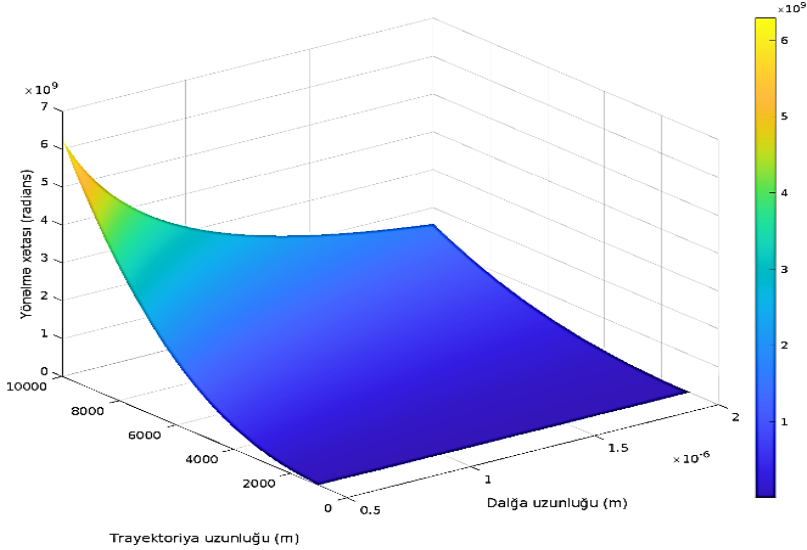
Burada Q_F – keyfiyyət faktoru; ΔF_E - effektiv tezlik genişliyi, Hz; ΔF_k - kanal genişliyi, Hz; r - Rreflektivlik əmsalıdır.

Optik rabitə altsistemlərinin yönəlmə xəta göstəricisi təyininədən analiz edilmiş atmosferik turbelans təsiri təkcə siqnal-manəə parametrinə deyil, eyni zamanda optik şüalanmanın yerüstü stansiyasının yönəlmə dəyərində təsir göstərir. Bu asılıq özünü yönəlmə və istiqamətlənmə xətası olaraq aşağıdakı ifadəylə təyin edilir. Atmosfer boyunca doyma şüalanma və turbulentliyi kimi, cubesat ilkin mühəndislik modelində yönəlmə xəta göstəricisi MATLAB-da analiz edilərək, şəkil 10-da göstərilmişdir.

$$\Delta\theta = \left(1.22 \frac{\lambda}{d*\phi}\right) * (k^2 L^2 C^2)^{\frac{3}{5}} * \int_0^L \left(\frac{z^5}{L^3}\right) dz, \text{radian} \quad (6)$$

⁵ Carrasco-Casado, A., & Mata-Calvo, R. Free-space optical links for space communication networks. – Japan, 2020. – 66 p.

Burada λ - optik siqnalın dalğa uzunluğu, m; d - qəbuledici aperturanın diametridir, m. Digər parametrlər imtina intensivliyi ifadəsində olduğu kimidir.



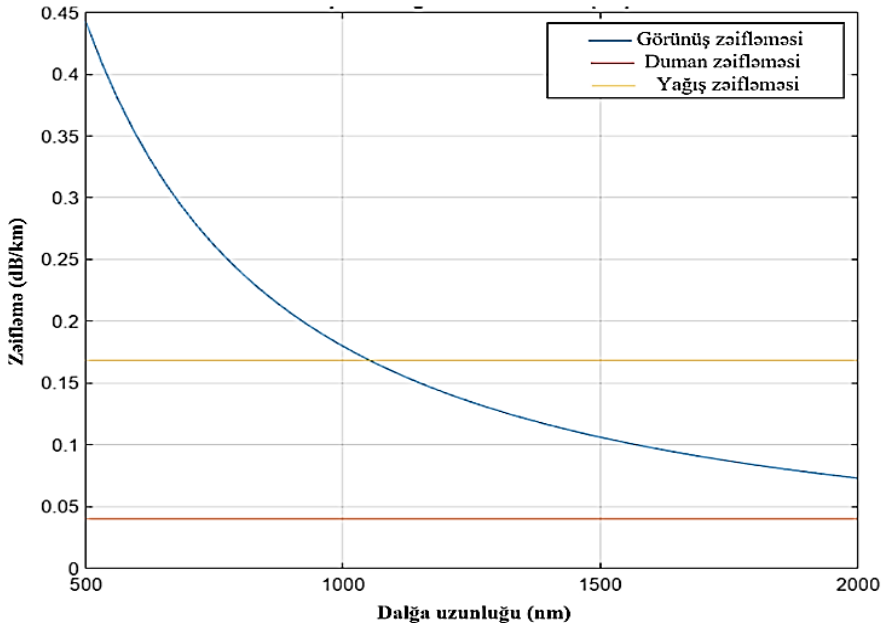
Şəkil 10. Seçilmiş aşağı yer orbit hündürlüklərinin, dalğa uzunluq dəyərlərinə əsasən yönləmə xəta göstəricisi

Son olaraq atmosfer mühitinin optik siqnal zəifləməsinə təsir edən aerosol və bulud modelləri nəzərə alınmışdır. Beləliklə, duman, yağış optik siqnalların güclü səpilməsi və udulmasına, eləcə də, işığın səpələnməsilə rabitə əlaqənin etibarlılığını azaldır. Bu zəifləmələrin təhlili sərbəst məkan optika rabitə sistemlərinin dayanıqlı dizaynı üçün önəmli olaraq, optik rabitənin etibarlılığının artırılmasında əvəzolunmazdır.

Orta kvadratik dalğa uzunluğu $\lambda = 1250 \text{ nm}$, görünmə 10 km və kvalifikasiya sabiti $q = 1.3$ nəzərə almaqla,

$$\alpha_{görünmə} = \left(\frac{3.91}{görünmə} \right) \left(\frac{\lambda \cdot 10^9}{550} \right)^{-q} = 0.4 \left(\frac{1250}{550} \right)^{-1.3} \approx 0.12, \text{ dB/km} \quad (7)$$

Matlab hesablamalarından sonra şəkil 11-də təqdim olunan qrafik duman və yağış zəifləməsinin optik dalğa uzunluğundan asılılığını əks etdirir. Bu qrafikə əsasən zəifləmə 500 nm-də təxminən 0,45 dB/km-dən başlayaraq, 2000 nm-də 0,05 dB/km-ə qədər azalır. Duman zəifləməsi isə 0,15 dB/km səviyyəsində sabit qalaraq, yağış zəifləməsi 0,05 dB/km qiymətini alır.



Şəkil 11. Görüş zonası üzrə optik siqnalın duman, yağış əsaslı zəifləməsindən ümumi asılılığı

Aerozol və bulud modelləri, o cümlədən aerosol paylama modelləri, mie səpilməsi, bulud örtüyünün təsiri və maye miqdarı, optik siqnalın zəifləməsinə hissəciklərin təsirini ətraflı şəkildə təsvir edir. Mie səpilməsi hissəciklərin işığı necə səpərək siqnalın aydınlığına təsir etdiyini təhlil edir.

Nəzərə alsaq ki, orta kvadratik dalğa uzunluğu $\lambda = 1250 \text{ nm}$, $N = 10 * 10^6 \frac{\text{zərrəcik}}{m^3}$, $m = 1.5$ səpilmə kəsiyi ola bilər,

$$\sigma_{səpilmə} = Q_{səpilmə} \pi a^2 = \left(\frac{2m^2}{m^2+2} \right) x^2 \pi a^2 = 3.34 * \pi * (0.5 * 10^{-6})^2 \approx 2.62 * 10^{-12}, m^2 \quad (8)$$

Burada $Q_{səpilmə}$ - səpilmə əmsalı; m - refraksiya indeksi; a - zərrəcik radiusudur.

Ardınca aerosolun zəifləməsini hesabladıqda, aerosol konsentrasiyası (N),

$$\alpha_{aerosol} = N \sigma_{səpilmə} \approx 2.62 * 10^{-5}, dB/km \quad (9)$$

Burada $f_{bulud} = 0.5$, $\gamma_{bulud} = 0.2 \frac{dB}{km}$ hər $\frac{g}{m^3}$, $LWC = 0.3 \frac{g}{m^3}$ qəbul edilməsilə bulud zəifləməsi aşağıdakı kimi müəyyən edilir,

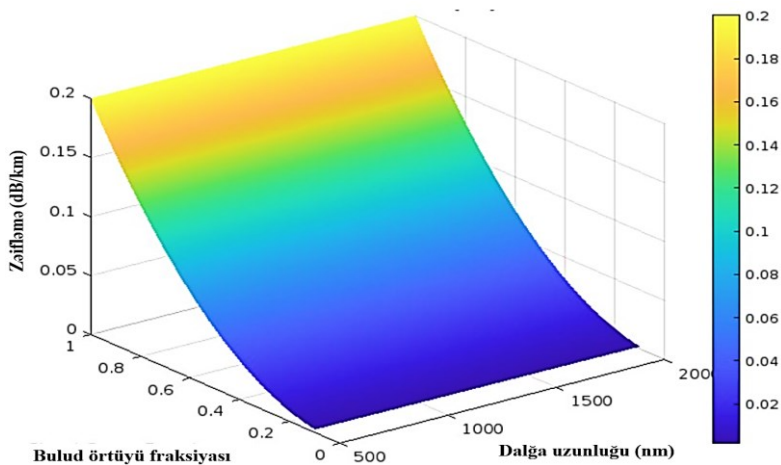
$$\alpha_{bulud} = f_{bulud} \gamma_{bulud} LWC = 0.03, dB/km \quad (10)$$

Burada f_{bulud} - bulud örtüyü fraksiyası; γ_{bulud} - hər q/m^3 üçün 0,2 dB/km nəzər alınan zəifləmə əmsalıdır.

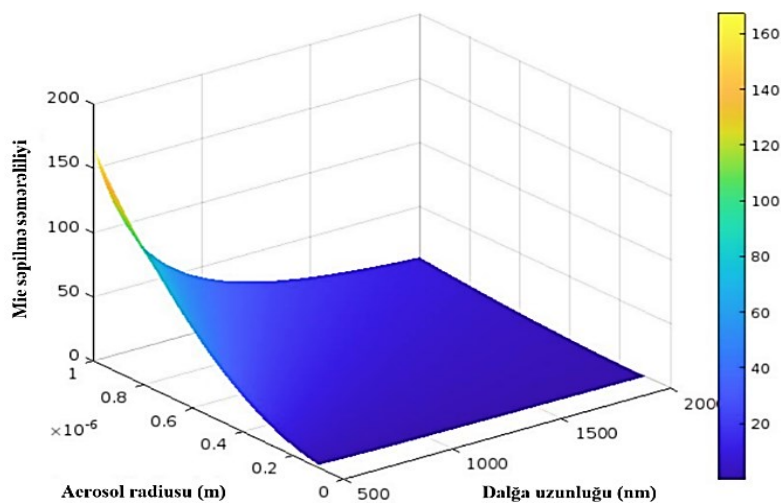
Şəkil 12-də bulud örtüyü fraksiyasının və dalğa uzunluğunun funksiyası olaraq optik siqnalların bulud örtüyünə görə zəifləməsini göstərilmişdir. Bulud örtüyünün tam olduğu halda (fraksiya 1) zəifləmə 500 nm-də təxminən 0,2 dB/km təşkil edir və 2000 nm-də təxminən 0,05 dB/km-ə qədər azalır. Daha aşağı bulud örtüyü fraksiyaları üçün (0,2-0,6) zəifləmə dalğa uzunluğu spektri üzrə 0,02 dB/km ilə 0,1 dB/km arasında dəyişir və əhəmiyyətli dərəcədə azdır.

Şəkil 13-də isə aerosol radiusunun və dalğa uzunluğunun funksiyası kimi Mie səpilmə səmərəliliyi əks olunmuşdur. Burada aerosol radiusu 10^{-6} m olduğu zaman səpilmə səmərəliliyi ən yüksək dəyər 180 olaraq, dalğa uzunluğunun artması ilə kəskin şəkildə azalır. Aerosol radiusu $0,4 \times 10^{-6}$ m-dən böyük olduqda isə səpilmə səmərəliliyi bütün dalğa uzunluqları üzrə 50-dən aşağı düşür.

Alınmış ayrılar əsasında demək olar ki, yönəlmə xətası birbaşa seçilmiş dalğa uzunluğu göstəricisindən asılı olub, sxolastik əks eksponensial dəyişikliklə çoxsaylı qiymətlərə malikdir.



Şəkil 12. Bulud zəifləməsinin orta kvadratik dalğa uzunluq aralığından asılılığı



Şəkil 13. Mie səpəlmə effektivliyinin orta kvadratik dalğa uzunluq aralığından asılılığı

Tədqiqatda 2U cubesat uçuşa yararlı modeli yalnız orbital və ilkin struktur parametrləri məlum olduğu üçün, STK mühitində alınmış nəticələrin orta göstəriciləri cədvəl 2-də verilmişdir.

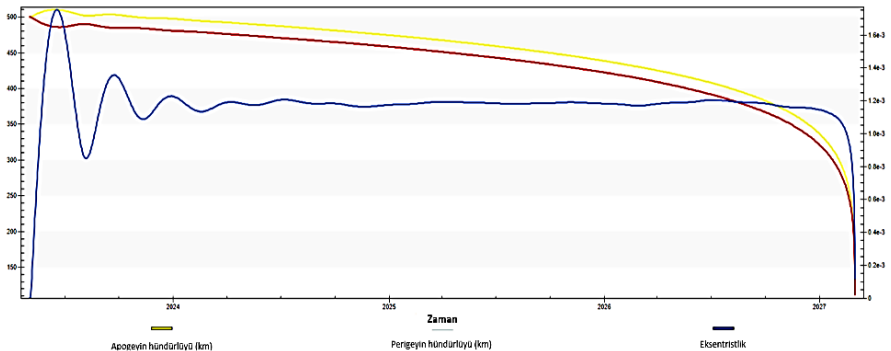
Cədvəl 2

STK simulyasiya mühitində 2U cubesat uçuşa yararlı model missiyasından analiz nəticələri

Eksen tristlik	Perigeyin hündürlüyü	Apogeyin hündürlüyü	Orbital period	Orbit dövrət mə sayı	Peykin yaşama müddəti
86.38 ⁰	434.4 km	450.43 km	1.55 saat	21,613	3.8 il

Cədvəl 2-də alınmış nəticələrə nəzər yetirsək, eksentrik yönəlmə bucağı ($86.4^0 \rightarrow 86.38^0$), apogey və perigey hündürlükləri (500 km $\rightarrow$ 450 km) aralığına, orbital period isə öncəki bölmədə hesablanmış (1.75 saat $\rightarrow$ 1.55 saat) göstəricisinə yuvarlaqlaşmışdır.

Bununla da, aşağı yer orbitində peyk əlaqə toplusu ətrafında yerləşmiş hər bir peyk 3.8 il və ya 21,613 tam orbit dövrətmə perioduna malikdir.



Şəkil 14. 2024 – 2027 ci il müddətində 2U cubesat uçuşa yararlı modelin orbit boyu yaşama müddəti

Şəkil 14-ü analiz etsək, eksentrislik peykin yer səthindən orbitə buraxılma anında, təxminən 400 km-də inersiya və daxili hündürlüyü idarəetmə altsistemi ilə spiral hərəkətli pik olaraq 500 km-ə çatır. Daha sonra, 2024-cü ildən 2027-ci ilədək təxminən 350 km sabit hündürlüyü saxlamağa davam edir.

Birinci və ikinci halların aşağı yer orbitindəki peyk əlaqə toplusu üzrə baxılması kimi növbəti addımlarda:

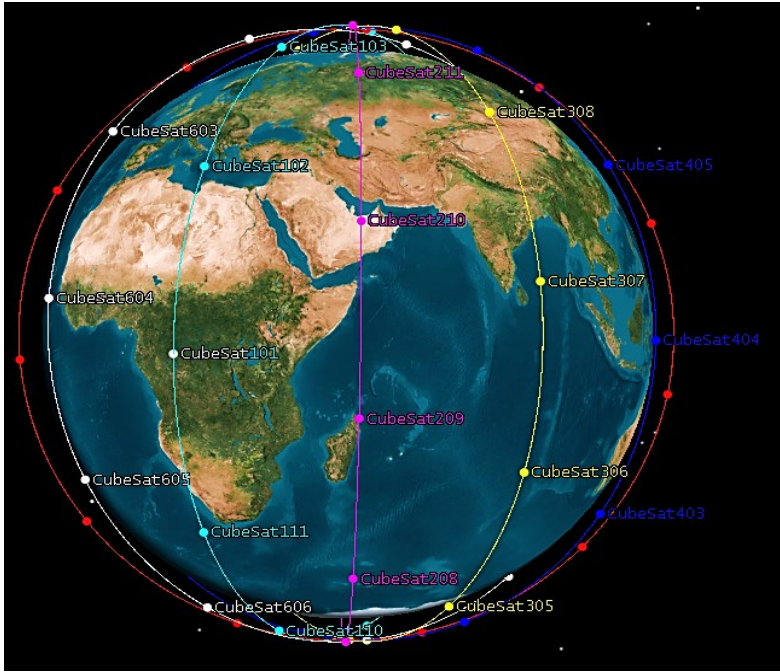
- İlk yaradılmış 2U cubesat uçuşa yararlı model parametrləri əsasında cədvəl 2-də qeyd edilmiş fərqli meridian istiqamətində “ π üzük-tor quruluşlu” 6 orbit müstəvisi yaradılmışdır. Hər birinin 30° radial aralıqlarında, 11 nanopeyk yerləşdirilmiş və müvafiq olaraq cubesat101–cubesat611 adlandırılmışdır. Şəkil 15-də bu quruluşun 3 ölçülü fəzalı görünüşü təsvir olunmuşdur.

- Şəkil 16-də nümunə olaraq STK mühitində mövcud olan və struktur dəyərləri nəzərdə tutulan uçuşa yararlı model ilə uyğunlaşdırıldıqdan sonra verilmiş vizual görünüş təqdim olunmuşdur. Burada peykin bir istiqamətli və daha dəqiq şimal oxu boyunca hərəkət etməsi, həmçinin, optik rabitə idarəedicisi və transponder altsistemlərinin müvafiq hərəkət istiqamətlərini təmin etmək üçün mövqeləşməsi göstərilmişdir.

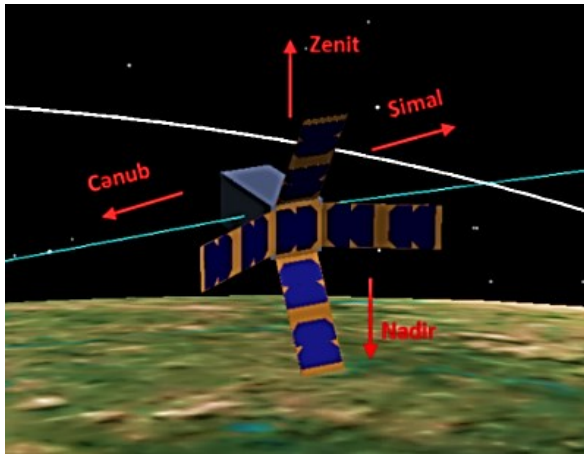
- Eyni zamanda, optik rabitə idarəedicisi və optik rabitə transponder altsistemlərinin müvafiq nadir, zenit, şimal və cənub istiqamətlərində, eyni orbit müstəvisinin meridian, eləcə də paralellər boyunca yerləşmiş cubesatlarla tam optik rabitənin təmini üçün STK mühitində son addım olaraq, hər bir peykin 4 ox istiqamətində optik rabitə şüasının vizual görünüşləri verilmişdir.

STK mühitində aparılmış bütün simulyasiyalar və qənaətbəxş nəticələr əsasında, 2U cubesat uçuşa yararlı modelinin hazırlanması ilə nanopeyk-nanopeyk, nanopeyk-yerüstü stansiya aralığında qarşılıqlı və tam optik lazer rabitəsi əsaslı infrastrukturun yaranması təmin olunmuşdur.

Nəticədə, yeni nəsil lazer şüa idarəedicisi və aktiv transponder sistemi ilə təchiz olunmuş nanopeyk strukturlu 4U cubesat ilkin mühəndislik modeli hazırlanmış və sınaqdan keçirilmişdir (şəkil 17).



Şəkil 15. π üzük-tor quruluşlu aşağı yer orbitli, peyk əlaqə toplusunun, STK mühitindəki 3 fəzalı modeli

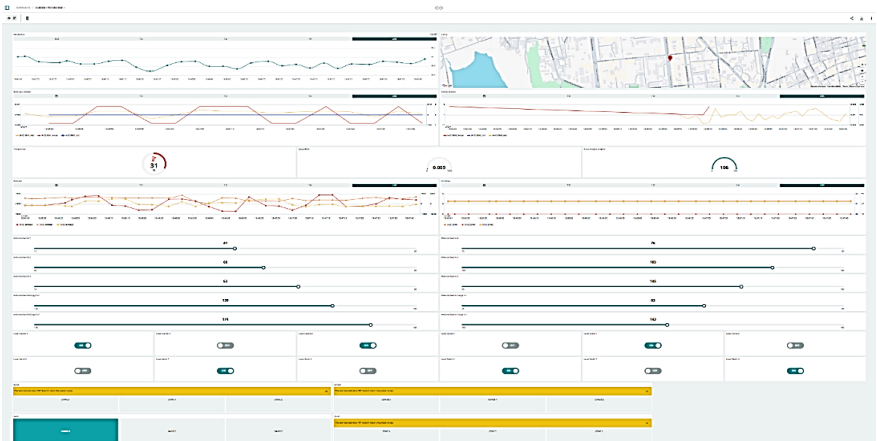


Şəkil 16. 2U cubesat uçuşa yararlı modelin orbitdə yerləşmə mövqeyi və istiqamətləri



**Şəkil 17. 4U cubesat ilkin mühəndislik model strukturunun
tamamlanmış real görünüşü**

Şəkil 18-də yerüstü stansiya sisteminin istifadəçi kompüterinə USB interfeysi vasitəsilə qoşulmasını, cubesat strukturunun radiotezlik rabitə və optik lazer rabitə altsistemləri ilə avtonom rabitə yaradaraq qarşılıqlı məlumat mübadiləsini təmin edən proqram təminatının istifadəçi ekranı nümayiş etdirilmişdir.



**Şəkil 18. Yerüstü stansiya istifadəçisi üçün idarəedici və nəzarət
strukturunun proqram təminatının interfeysi**

NƏTİCƏ

1. İlk dəfə olaraq " π üzük-tor quruluşlu" peyk əlaqə topologiyası əsasında nanopeyk platformalarının qurulması təklif edilmişdir. Sistem 6 orbit müstəvisi (hər biri 30° aralıqda), hər xətt üzrə 11 nanopeyk olmaqla 66 peykdən ibarət struktura malikdir. Nanopeyklərin 500 km yüksəklikdə yerləşməsi optik rabitədə minimal gecikmə təmin edir. Orbit müstəvisinin əyilmə bucağı $\varphi = 86.4^\circ$ seçilmiş, peyklərin dövrəmə periodu $T = 90$ dəqiqədir [8,13].

2. Təklif edilən π topologiyada peyklərarası məlumat mübadiləsi $\lambda_{1n}, \lambda_{2n} \dots \lambda_{xn}$, yerüstü stansiyalar ilə rabitə isə $\lambda_{1m}, \lambda_{2m} \dots \lambda_{xm}$ dalğa uzunluqlarında optik əlaqə vasitəsilə təmin edilmişdir. Şüa divergensiyası $\theta = 1.22 (\lambda / D)$ düsturu ilə hesablanmış, gecikmə 5 $\mu\text{s}/\text{km}$ intervalında saxlanılmışdır. Radiotezliklə müqayisədə 1 Vt gücündə vericilər və -65 dBm həssaslığa malik qəbuledicilərdən istifadə edilmişdir [2,4].

3. Optik rabitə texnologiyasının 2.5 Gb/s məlumat ötürmə sürəti, daha kiçik antena (10.2 sm), aşağı enerji sərfi (93.8 Vt) və yüngül transponderlər (65.3 kq) təmin etdiyi müəyyən edilmişdir. Bu göstəricilər radiotezlik texnologiyası ilə müqayisədə (müvafiq olaraq 2.2 m, 213.9 Vt, 152.8 kq) üstünlük təşkil edir [1,3,5].

4. Nanopeyklərdə 1550 nm dalğa uzunluğu və ya 193 THz tezlikdə optik rabitənin atmosferik sönmə əmsalını azaltmaq və 10 Gb/s ötürmə qabiliyyəti üçün optimal olduğu göstərilmişdir. Optik rabitə texnologiyası antena ölçüsü, enerji sərfi və kütlə baxımından radiotezlik rabitə texnologiyasını əvəz etməyə imkan verir [9].

5. Optik lazer sistemləri 500–2000 km məsafədə tam duplex rabitəni dəstəkləyir. Şüalanma dar koherent və yüksək səmərəli olub, enerji sərfini azaldır. Altıbucaqlı doldurma modelində 33% daha az nöqtə tələb edilmişdir [20].

6. Yeni arxitekturalarda lazer diodları və servo mikromühərriklərdən istifadə olunmuşdur. Optik rabitə modulu 1 Mbps ötürmə sürəti və 5–10 km təsir məsafəsinə malikdir. Proqram idarəli radio strukturlarında 256-QAM modulyasiya alqoritmləri işlənmiş, sistem 433 MHz diapazonunda 500 kbps sürət təqdim etmişdir [7].

7. Atmosfer turbulentliyinin təsiri təhlil edilmişdir. C_n^2 struktur parametri 10^{-14} – $10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ arasında dəyişir, zəifləmə 0.05–0.2 dB/km təşkil edir. 1500–2000 nm dalğa uzunluqları ilə sabitlik artırılmışdır [14,16].

8. Kvazi-dinamik dəyişmələr rabitə kanallarında signal gücünün 5–15% fluktuasiyasına səbəb olmuşdur. Adaptiv optik sistemlər və statistik modelləşdirmə ilə sabitlik artırılmışdır [21].

9. 2U cubesat modelinin STK simulyasiya nəticələrinə əsasən, orbit eksentrisliyi 86.38° , perigeyin hündürlüyü 434.4 km, apogey isə 450.43 km olaraq hesablanmışdır. Dövretmə müddəti 1.55 saat, ömrü 3.8 il təşkil edir [10].

10. 4U cubesat prototipinin lazer şüa idarəetməsi və optik rabitə sistemləri STK mühitində sınaqdan keçirilmişdir. Bu prototipin altsistemlərinin birgə işləməsi uğurla test edilmişdir [15].

DİSSERTASIYA MÖVZUSU ÜZRƏ ÇAP OLUNMUŞ ELMİ ƏSƏRLƏRİN SİYAHISI

1. Atayev N.A., Lazer şüalarının idarəedici və aktiv transponder sistemli nano peykin idarəedici alt sistemlərinin nəzəri və alqoritmik tədqiqi // The XXVII International Scientific Symposium "Give way to the Turkic flag!" – Baku: – 2022. – pp. 280-285.
<http://anl.az/down/E.Cavad2022.pdf>
2. Həsənov M.H., Atayev N.A., Lazer şüalarının idarəedici və aktiv transponder sistemli nano peykin ilkin konseptual modeli // "Gənclər və elmi innovasiyalar" mövzusunda Respublika elmi-texniki konfrans materialları, AzTU – Bakı: – 2022. – s. 896-902.
https://www.researchgate.net/publication/366001146_Gncrlr_v_elmi_innovasiyalar_movzusunda_Respublika_elmi-texniki_konfrans_materiallari_AzTU
3. Atayev N.A., Study of prototype nanosatellite subsystems based on radio and optical communication technologies // Proceedings Book International Conference on Engineering Sciences (ICES), – Baku: – 2022. - pp. 18-27.
<https://www.iensci.org/library?pgid=19pslt13-cede6d31-0bb3-48a3-a6f0-ea1952449acf>
4. Hasanov M.H., Atayev N.A., Early conceptual model of nanosatellite with laser beam control and active transponder system // IEEE, Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Arkhangelsk: – 2022. – pp.1-4.
<https://doi.org/10.1109/SYNCHROINFO55067.2022.9840919>
5. Hasanov M.H., Atayev N.A., Algorithm design nanosatellite based on radio frequency and optical communication // JPIT, Problems of Information Technology, Baku: – 2022. - Vol. 13, No. 2. – pp. 61-68.
https://jpit.az/uploads/article/en/2022_2/ALGORITHM_DESIGN_OF_NANOSATELLITE_BASED_ON_RADIO_FREQUENCY_AND_OPTICAL_COMMUNICATION.pdf
6. Hasanov M.H., Hacıyeva K.H., Atayev N.A., Najafov B.K.,

Development and Calculation of the Reliability of a 3D Printer // Springer, Towards Industry 5.0 (ISPR), Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham, Turkey: - 2022, - Vol. 139, No. 5. - pp. 201-210.

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-24457-5_17

7. Hasanov M.H., Atayev N.A., Conceptual model of a new generation nanosatellite with 3D optical communication switch and radiofrequency transponder // Інформатика, управління та штучний інтелект, – Харків: – 2022. – p. 22.
<https://scholar.google.com/citations?user=5tI3A8AAAAAJ&hl=en>
8. Atayev N.A., Fostering Space Education in Azerbaijan through Small Satellite Design Program for Undergraduate Students // IAF, 74th International Astronautical Congress (IAC), Baku: - 2023. – pp. 1-13.
<https://dl.iafastro.directory/event/IAC-2023/paper/75997/>
9. Hasanov M.H., Abdullayev K.I., Piriev S.A., Movsumov A.A., Atayev N.A., FSON Topology for Mass Development and Management of Future Generation Space Technologies // ELSEVIER, Procedia Computer Science, 3rd International Conference on Evolutionary Computing and Mobile Sustainable Networks (ICECMSN), Netherlands: - 2023. - Vol. 230, No. 3. – pp. 82-89.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050923020689>
10. Atayev N.A., Hasanov M.H., Conceptual design of a communication nanosatellite model with a new generation laser beam control and active transponder system // IAF, Proceedings of the International Astronautical Congress, 74th International Astronautical Congress (IAC), Baku: – 2023. – pp. 1-15.
<https://dl.iafastro.directory/event/IAC-2023/paper/76449/>
11. Alizade R.İ., Hasanov M.H., Khalilov I.A., Alakbarov A.S., Atayev N.A., Synthesis of New Lunar Parallel Structure Robotic Rovers // IAF, 74th International Astronautical Congress (IAC), Baku: - 2023. – pp. 1-6.

- <https://dl.iafastro.directory/event/IAC-2023/paper/76434/>
12. Atayev N.A., Mutallimov T.A., Mammadov A.T., Reducing deaths in traffic accidents with space research and artificial intelligence // IAF, 74th International Astronautical Congress (IAC), Baku: - 2023. – pp. 1-6.
<https://dl.iafastro.directory/event/IAC-2023/paper/80696/>
 13. Atayev N.A., Hasanov M.H., High-speed data transmission in LEO satellite networks with free space optics-based transponder and 3D switch model // IEEE, 17th International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT, Baku: – 2023, – pp. 1-6.
<https://doi.org/10.1109/AICT59525.2023.10313187>
 14. Hasanov M.H., Abdullayev K.I., Tagiyev A.D., Gurbanova, G.S., Atayev, N.A., New generation 3D optical switch for free space optical networks // Springer, Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks (ICICV), Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, Tirunelveli: – 2023, - Vol. 171, No. 2. – pp.153-162.
https://doi.org/10.1007/978-981-99-1767-9_12
 15. Hasanov M.H., Ibrahimov B.Q., Tagiyev A.D., Atayev N.A., Namazov C.B., Najafov, B.K., Investigation of Signal-To-Noise Ratio Based on Optical Compression Systems Using Spectrum in Fso // Jormard Publishing, Advanced Physical Research, Baku: - 2023, - Vol. 5, No. 1. - pp. 33-41.
http://jomardpublishing.com/UploadFiles/Files/journals/APR/V5N1/Hasanov_et_al.pdf
 16. Hasanov M.H., Tagiyev A.D., Atayev N.A., Exploration of signal-to-noise ratio with optical compression systems utilizing spectrum in free space optics // 5th International Conference on Problems of Cybernetics and Informatics (PCI), – Baku: – 2023. – pp. 1-3.
<https://pci.cyber.az/2023/papers/06.html>
 17. Atayev N.A., The application directions of SDR technology in a new generation radio communication networks // XXVIII Международная научно-техническая конференция «Современные средства связи», – Минск: – 2023. – p. 50.

https://badw.de/fileadmin/members/R/3685/Rohde_SDR_Oct2017.pdf

18. Hasanov M.H., Atayev N.A., Conceptual model of a nanosatellite with laser beam transmission and its importance in renewable electrical power harvesting // Energy Sustainability: Risks and Decision Making (ENSUS), Baku: – 2024. - Vol. 2, No. 1. – pp. 1-7.
<https://doi.org/10.61413/AEOK4306>
19. Hasanov M.H., Piriev S.A., Atayev N.A., Rasullu T.S., Adaptive Monitoring of Free Space Optical Networks Utilizing Artificial Neuron Analysis // IEEE, 3rd International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAAIC), Salem: - 2024. – pp. 289-292.
<https://doi.org/10.1109/ICAAIC60222.2024.10575834>
20. Atayev N.A., Bairamov S.N., Actual and future trends of Nanosatellite platforms, ensuring the basic concept level mission design for Sustainable Space // IAF, 75th International Astronautical Congress (IAC), Milan: - 2024. – pp. 1-11.
<https://dl.iafastro.directory/event/IAC-2024/paper/81109/>
21. Atayev N.A., Hasanov M.H., Integrated Analysis of Atmospheric Performance Models and System-Level Functional Tests for a New Generation Optical Communication Nanosatellite Segment // IAF, 75th International Astronautical Congress (IAC), Milan: - 2024, - pp. 1-13.
<https://dl.iafastro.directory/event/IAC-2024/paper/81110/>

Dərc edilmiş işlərdə müəllifin iştirakı.

[1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 12, 17, 18, 20, 21] – sayılı işlərin hazırlanması və tərtibatı müəllif tərəfindən yerinə yetirilmişdir.

[6, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 19] – sayılı işlərdə qarşıya qoyulmuş məsələnin araşdırılması, müvafiq nəzəri hesablama, praktiki tətbiqlərin icrası, alınmış elmi izah və nəticələrin tərtibatı müəllif tərəfindən yerinə yetirilmişdir.



Dissertasiyanın müdafiəsi 14 Fevral 2025-ci il tarixində saat 14:00-da Azərbaycan Texniki Universitetinin nəzdində fəaliyyət göstərən ED 2.41 Dissertasiya şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: H.Cavid prospekti 25, Bakı, Azərbaycan, AZ 1073, Azərbaycan Texniki Universiteti.

Dissertasiya ilə Azərbaycan Texniki Universitetinin kitabxanasında tanış olmaq mümkündür.

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları Azərbaycan Texniki Universitetinin rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir.

Avtoreferat 13 Yanvar 2025-ci il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 10.01.2025

Kağızın formatı: A5

Həcm: 37548

Tiraj: 100