

UDC 621.396.96:621.391.75

DOI <https://doi.org/10.52171/herald.397>

Satellite Communication Systems: Analysis of Technological Development and Future Perspectives

R.M. Bayramov, N.A. Mahmudova

Azerbaijan National Aviation Academy (Baku, Azerbaijan)

For correspondence:

Nigar Mahmudova / e-mail: nigar_orucova@list.ru

Abstract

This paper presents a scientific analysis of the technological development and future prospects of satellite communication systems. Geostationary (GEO), low Earth orbit (LEO), and medium Earth orbit (MEO) satellites are comparatively examined in terms of technical specifications and functional capabilities, while the impact of high-throughput satellites (HTS) and emerging constellation networks on system performance, coverage, and data transmission rates is evaluated. Key challenges, including Ka-band optimization, signal latency, spectrum management, and the scientific applications of CubeSats, are addressed using analytical and comparative methods. The study demonstrates that Ka-band optimization, GEO–LEO hybrid models, and localized CubeSat applications significantly enhance satellite communication efficiency and contribute to the development of global communication infrastructure.

Keywords: satellite communications, CubeSat, LEO, MEO, Ka-band, constellation, Internet of Things

Submitted 20 October 2025

Published 16 March 2026

For citation:

R.M. Bayramov, N.A. Mahmudova

[Satellite Communication Systems: Analysis of Technological Development and Future Perspectives]

Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2026, vol. 18 (1), pp. 13-19

ISSN (p): 2076-0515, ISSN (e): 2789-8245

CC BY-NC 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Peyk kommunikasiya sistemləri: texnoloji inkişafın təhlili və perspektivləri

R.M. Bayramov, N.A. Mahmudova

Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası (Bakı, Azərbaycan)

Xülasə

Məqalədə peyk rabitə sistemlərinin texnoloji inkişafı və gələcək perspektivləri elmi baxımdan təhlil edilmişdir. Məqalədə geostasionar (GEO), aşağı yer orbitində (LEO) və orta yer orbitində (MEO) fəaliyyət göstərən peyklərin texniki xüsusiyyətləri və funksional imkanları müqayisəli şəkildə araşdırılmış, yüksək bant genişliyi peykləri (HTS) və konstellasiya şəbəkələrinin performansına, əhatə dairəsinə və məlumat ötürmə sürətinə təsiri qiymətləndirilmişdir. Ka-band texnologiyası, siqnal gecikməsi, spektrin optimallaşdırılması və CubeSat-ların elmi tətbiqləri kimi əsas problemlərin həlli üçün müxtəlif texniki yanaşmalar təklif edilmişdir. Analitik və müqayisəli üsullardan istifadə olunaraq peyk sistemlərinin üstünlükləri və məhdudiyyətləri qiymətləndirilib. Nəticələr göstərir ki, Ka-band optimallaşdırması, GEO–LEO hibrid modelləri və CubeSat-ların lokal elmi istifadəsi peyk rabitəsinin səmərəliliyini artıraraq qlobal rabitə infrastrukturunun inkişafına əhəmiyyətli töhfə verə bilər.

Açar sözlər: peyk rabitəsi, CubeSat, LEO, MEO, Ka-band, konstellasiya, Əşyaların İnterneti.

Системы спутниковой связи: анализ технологического развития и перспективы

Р.М. Байрамов, Н.А. Махмудова

Азербайджанская национальная авиационная академия (Баку, Азербайджан)

Аннотация

В статье представлен научный анализ технологического развития и перспектив спутниковых систем связи. Сравнительно изучены геостационарные (GEO), низкоорбитальные (LEO) и среднеорбитальные (MEO) спутники с точки зрения технических характеристик и функциональных возможностей, оценено влияние спутников с высокой пропускной способностью (HTS) и формирующихся констелляционных сетей на производительность системы, покрытие и скорость передачи данных. Основные проблемы, включая оптимизацию Ka-диапазона, задержку сигнала, управление спектром и научные применения CubeSat, рассмотрены с использованием аналитических и сравнительных методов. Результаты показывают, что оптимизация Ka-диапазона, гибридные модели GEO–LEO и локальные научные приложения CubeSat значительно повышают эффективность спутниковой связи и способствуют развитию глобальной коммуникационной инфраструктуры.

Ключевые слова: спутниковая связь, CubeSat, LEO, MEO, Ka-диапазон, констелляция, интернет вещей

Giriş

Müasir dövrdə informasiya mübadiləsinin sürəti və etibarlılığı qlobal miqyasda sosial, iqtisadi və texnoloji inkişafın əsas göstəricilərindən birinə çevrilmişdir. Bu baxımdan peyk rabitə sistemləri geniş əhatə dairəsi, ucqar və çətin coğrafi ərazilərdə fəaliyyət imkanı, həmçinin fəvqəladə hallarda dayanıqlı rabitə təmin etməsi səbəbindən telekommunikasiya infrastrukturunun mühüm tərkib hissəsidir. Geostasionar (GEO), aşağı Yer orbitli (LEO) və orta Yer orbitli (MEO) peyklər televiziya yayımı, internet xidmətləri, hərbi rabitə, naviqasiya və fəvqəladə halların idarə olunması kimi sahələrdə geniş tətbiq olunur [1].

Son illərdə peyk texnologiyalarında müşahidə olunan sürətli inkişaf, xüsusilə yüksək ötürmə qabiliyyətinə malik Ka-band tezlik diapazonunun tətbiqi, eləcə də çoxsaylı LEO peyk konstellasiyalarının (Starlink, OneWeb və s.) yaradılması peyk rabitəsinin imkanlarını əhəmiyyətli dərəcədə genişləndirmişdir. Bu texnologiyalar məlumat ötürülməsində gecikməni azaltmaqla yanaşı, yüksək sürətli internet xidmətlərinin qlobal miqyasda əlçatan olmasına şərait yaradır [2]. Bununla belə, Ka-band siqnallarının atmosfer təsirlərinə həssaslığı, spektr resurslarının məhdudluğu, kosmik tullantıların artması və sistemlərin texniki-iqtisadi səmərəliliyinin qiymətləndirilməsi aktual elmi problemlər kimi qalmaqdadır.

Qafqazda yeganə peyk operatoru - "Azərkosmos" ASC tərəfindən nəinki telekommunikasiya, həmçinin coğrafi kəşfiyyat sahələri üçün yüksək keyfiyyətdə peyk xidmətləri təqdim edilir. 2013-cü ilin fevralında orbitə buraxılmış, Avropa, Yaxın Şərqi, Afrika, Qafqaz, Mərkəzi Asiya regionlarını əhatə edən

ölkənin ilk telekommunikasiya peyki "Azerspace-1"-in dünyanın 25-dən çox ölkəsində sabit müştəri bazası vardır. "Azerspace-1" vasitəsilə yerli və beynəlxalq səviyyəli 100-ə yaxın televiziya və radio kanalları yayımlanır, o cümlədən Gürcüstan, Türkiyə, Rusiya və bir sıra digər xarici ölkələrin telekanalları və xüsusi rabitə sistemləri peykin resurslarını kommersiya müqavilələri əsasında istifadə edir. 2014-cü ilin dekabr ayında Azərbaycan həm ölkədaxili, həm də xarici istifadə üçün nəzərdə tutulmuş, təyinatına görə yüksək ayırdetmə qabiliyyətinə malik Yer səthinin məsafədən müşahidə peyki - "Azersky"-a sahib olmuş və bununla da ölkənin ikinci peyk layihəsini reallaşdırmışdır. Kosmik xidmətlər bazarında ölkənin rəqabətə davamlı mövqe tutmasının, eyni zamanda, peyk xidmətlərinin davamlılıq və etibarlılığının təmini məqsədilə 28 sentyabr 2018-ci il tarixində sayca üçüncü, təyinatına görə isə ikinci telekommunikasiya peyki - "Azerspace-2" orbitə buraxılmışdır.

Bu peyklər regional və beynəlxalq səviyyədə rabitə xidmətlərinin göstərilməsində mühüm rol oynayır. Lakin qlobal miqyasda LEO əsaslı peyk şəbəkələrinin sürətli inkişafı fonunda mövcud GEO sistemlərinin imkanlarının elmi-analitik baxımdan qiymətləndirilməsi və perspektiv inkişaf istiqamətlərinin müəyyənləşdirilməsi xüsusi əhəmiyyət kəsb edir.

Bu baxımdan təqdim olunan məqalədə peyk rabitə sistemlərinin texnoloji inkişaf meyilləri təhlil edilir, GEO və LEO əsaslı sistemlərin üstün və məhdud cəhətləri müqayisəli şəkildə araşdırılır, həmçinin Ka-band texnologiyasının tətbiqi və CubeSat əsaslı həllərin gələcək perspektivləri elmi-analitik yanaşma ilə qiymətləndirilir.

İşin məqsədi

Tədqiqatın məqsədi peyk rabitə sistemlərinin müasir texnoloji inkişaf meyllərini təhlil etmək, GEO və LEO əsaslı sistemlərin texniki üstünlüklərini və məhdudiyyətlərini müqayisəli şəkildə qiymətləndirmək, həmçinin Ka-band və CubeSat texnologiyalarının Azərbaycan üçün tətbiqi perspektivlərini müəyyən etməkdir.

Məsələnin qoyuluşu

Peyk rabitə sistemləri qlobal kommunikasiya infrastrukturunu üçün əhəmiyyətlidir. Siqnal gecikməsi, spektrin səmərəli istifadəsi və kiçik peyklərin optimallaşdırılması kimi texniki problemlər hələ də aktuallığını saxlayır. Bu sə-

bəbdən GEO, LEO və CubeSat texnologiyalarının müqayisəli təhlili və optimallaşdırılması elmi və texniki baxımdan zəruridir.

Məsələnin həlli

Peyk rabitə sistemlərinin davamlı və səmərəli inkişafı üçün müasir texnoloji çağırışlara cavab verən kompleks yanaşmaların tətbiqi zəruridir. Bu cəhətdən, məqalədə Ka-band texnologiyasının optimallaşdırılması, GEO və LEO peyk sistemlərinin hibrid istifadəsi, eləcə də CubeSat əsaslı lokal elmi və texnoloji tətbiqlərin perspektivləri təhlil olunur.

Cədvəl 1-də Azerspace və Azersky peyklərinin əsas texniki xüsusiyyətləri, orbit mövqeyi və xidmət sahələri müqayisəli şəkildə təqdim olunmuşdur.

Cədvəl 1 – Azərbaycan peyklərinin texniki və funksional müqayisəsi
Table 1 – Technical and functional comparison of Azerbaijan's satellites

Xüsusiyyət	Azerspace	Azersky
Peyk növü	Rabitə peyki	İqlim və müşahidə peyki
İşləmə məqsədi	Rabitə xidmətləri (telefon, televiziya, internet)	Yerin müşahidəsi, ekoloji nəzarət
Launch tarixi	2013, 8 fevral	2018, 30 iyun
Orbital mövqe	46°E	46°E
Əhatə dairəsi	Avropa, Asiya, Orta Şərq və Afrika	Azərbaycan və qonşu ölkələrin müşahidəsi
Yüksək texnologiya	Qabaqcıl rabitə avadanlıqları, geniş band genişliyi	Yüksək keyfiyyətli vizual müşahidə alətləri
Peyk növü	C-band, Ku-band	Optik və radar müşahidə
Yayım xidməti	TV yayımları, internet xidmətləri	Ətraf mühit və dövlət orqanları

Tədqiqat çərçivəsində məlum olur ki, kosmik peyk rabitə sistemləri, daha güclü prosessorlar, yeni kodlaşdırma imkanları və istifadəçi sistemlərini daha mobil, daha çoxözlü, fərdi məlumatlara qarşı daha həssas və eyni za-

manda daha aşağı qiymətə çevirə bilən yeni istifadəçi terminal imkanları sahəsində yeni texnologiyalar inkişaf etdirilməlidir. Peyk texnologiyasının təkamülü qlobal rabitəyə böyük təsir göstərmiş və bütün dünyada insanların böyük məsafələrdə asanlıqla əlaqə saxlamasına

imkan vermişdir. Müasir peyklər videokonfrans və yüksək sürətli media ötürülməsini təmin edən qabaqcıl texnologiyalarla təchiz olunmuşdur ki, bu da insanların dünya miqyasında əvvəlkindən daha geniş və fasiləsiz şəkildə əlaqə saxlamasına imkan yaradır.

Peyklər təbii fəlakətlər və ya terror hücumları zamanı kritik məlumatların ötürülməsini təmin

etmək kimi mühüm tarixi hadisələr zamanı əhəmiyyətli rol oynamışdır; onlar həmçinin coğrafi maneələr və ya digər məhdudiyətlər səbəbindən ənənəvi vasitələrin kifayət etməyəcəyi hərbi əməliyyatlar üçün əsas komponentlər olmuşdur.

Cədvəl 2-də GEO və LEO peyk sistemlərinin müqayisəsi təqdim olunmuşdur.

Cədvəl 2 – GEO və LEO peyk sistemlərinin müqayisəli təhlili

Table 2 – Comparative analysis of GEO and LEO satellite systems

Parametr	GEO peyk sistemləri (Azerspace-1 / Azerspace-2)	LEO peyk sistemləri (Starlink / OneWeb)	Analitik qiymətləndirmə
Orbit hündürlüyü	≈ 35 786 km	500–1200 km	LEO peyklərin Yerə yaxınlığı gecikməni əhəmiyyətli dərəcədə azaldır
Gecikmə (Latency)	500–600 ms	20–40 ms	Real vaxt xidmətləri üçün LEO daha əlverişlidir
Əhatə dairəsi	Regional və yarımqlobal	Qlobal	GEO az sayda peyklə geniş əhatə yaradır
Tezlik diapazonu	C, Ku, Ka	Ku, Ka	Ka-band yüksək sürət versə də hava şəraitinə həssasdır
Məlumat ötürmə sürəti	Orta–yüksək	Yüksək	LEO konstellasiyaları daha böyük ümumi ötürmə qabiliyyəti yaradır
Yer avadanlığı	Böyük antenna ölçüləri	Kiçik və mobil terminallar	LEO istifadəçi rahatlığı baxımından üstünlük təşkil edir
Xidmət sahələri	TV yayımı, korporativ rabitə, dövlət sistemləri	Genişzolaqlı internet, IoT, mobil rabitə	Tətbiq sahələri funksional olaraq fərqlənir
Hava təsirlərinə davamlılıq	Yüksək (C/Ku-band)	Orta (Ka-band dominantdır)	Ka-band üçün adaptiv kompensasiya tələb olunur
Sistem dayanıqlığı	Yüksək, sabit orbit	Konstellasiya əsaslı, dinamik	LEO sistemlərdə idarəetmə mürəkkəbdir
İqtisadi səmərəlilik	Uzunmüddətli və stabil	Yüksək ilkin investisiya tələb edir	Hibrid GEO-LEO modellər daha optimaldır

Son illər ərzində peyk rabitə texnologiyasında bir sıra irəliləyişlər olmuşdur. Məsələn, Ka-bandlı rabitə peyklərinin inkişafı məlumatların daha sürətli və səmərəli ötürülməsinə səbəb olmuşdur. Bundan əlavə, peyklərin ölçüsü və çəkisi azalıb və bu, buraxılış xərclərinin azalmasına səbəb olub. Peyk istehsalçıları həmçinin kimyəvi hərəkət sistemlərindən daha səmərəli olan və peyklərin daha uzun ömür sür-

məsinə imkan verən elektrik mühərrik sistemlərindən istifadə etməyə başladılar.

Bu irəliləyişlərlə peyk rabitəsi daha etibarlı və sərfəli hala gəlmiş və onu müasir cəmiyyət üçün vacib rabitə vasitəsinə çevirmişdir. Peyk sistemlərindən istifadə etməklə, Ka-Band Rabitəsi Ka-diapazonlu peyk rabitəsinin Ku və ya C diapazonlu rabitədən daha üstün olduğunu göstərən cəhətləri ortaya çıxır.

Ka-band texnologiyasının optimallaşdırılması (Adaptive coding və rain fade mitigation) yanaşmaları

Ka-diapazonlu peyk rabitəsi Ku və C diapazonları ilə müqayisədə daha geniş bant eninə və yüksək məlumat ötürmə qabiliyyətinə malikdir. Ka-band tezlik diapazonunda bant genişliyi təxminən 3.5 GHz təşkil edir ki, bu da Ku-zolağından iki dəfə, C-zolağından isə təxminən beş dəfə çoxdur. Nəticə etibarilə, Ka-band rabitə sistemlərində məlumat ötürmə sürəti 100–500 Mbit/s səviyyəyə çata bilər.

Bununla yanaşı, Ka-band siqnalları atmosfer təsirlərinə, xüsusilə yağış, bulud, qar, dolu və troposfer titrəmələrinə qarşı yüksək həssaslıq göstərir. Elektromaqnit dalğalarının bu diapazonda udulması daha yüksək olduğundan, siqnal zəifləməsi ciddi problem olaraq qalır. Bu səbəbdən Ka-band rabitə sistemlərində aşağıdakı texniki həllərin tətbiqi məqsəduyğun hesab olunur:

- ehtiyat güc balansının artırılması;
- adaptiv kodlaşdırma və modulyasiya (Adaptive Coding and Modulation – ACM);
- çoxşüalı və fazalı massivli anten sistemlərinin tətbiqi;
- hibrid tezlik modelləri (Ka/Ku və ya Ka/C).

Bu yanaşmalar Ka-band rabitə sistemlərinin etibarlılığını artırmaqla yanaşı, xidmətin fasiləsizliyini təmin etməyə imkan verir.

GEO və LEO peyk sistemlərinin hibrid modelləri

GEO peyklər geniş əhatə dairəsi və uzunmüddətli sabit xidmət imkanları ilə fərqlənsə də, yüksək gecikmə göstəriciləri real vaxt tətbiqləri üçün müəyyən məhdudiyyətlər yaradır. LEO peyk konstellasiyaları isə aşağı gecikmə və yüksək ötürmə sürəti hesabına genişzolaqlı internet, IoT və mobil rabitə

xidmətləri üçün daha əlverişlidir.

Bu baxımdan, GEO və LEO peyk sistemlərinin hibrid şəkildə istifadəsi optimal həll kimi qiymətləndirilə bilər. Belə modellər:

- GEO peyklər vasitəsilə geniş regional yayımı;
- LEO peyklər vasitəsilə isə aşağı gecikməli və yüksək sürətli məlumat ötürülməsini təmin edir.

Hibrid yanaşma spektr resurslarının daha səmərəli istifadəsinə, xidmət keyfiyyətinin yüksəldilməsinə və iqtisadi baxımdan daha dayanıqlı peyk rabitə infrastrukturlarının formalaşdırılmasına şərait yaradır.

CubeSat-ların lokal elmi və texnoloji tətbiqləri

Peyk rabitəsi sahəsində ən perspektivli innovasiyalardan biri CubeSat texnologiyasıdır. CubeSat-lar ənənəvi peyklərlə müqayisədə daha az xərclə istehsal olunur və kosmosa buraxılır. İlk dəfə Kaliforniya Politeknik Universitetində təklif edilmiş CubeSat konsepsiyası standart ölçülərə malik, istehsalı ucuz və əsasən təhsil və elmi məqsədlər üçün nəzərdə tutulmuş mikropeyk modeli kimi formalaşmışdır. Bu günə qədər orbitə 1100-dən çox CubeSat uğurla buraxılmışdır.

CubeSat-lar əsasən aşağı Yer orbitində fəaliyyət göstərir və aşağıdakı sahələrdə geniş tətbiq imkanlarına malikdir:

- Yerin müşahidəsi və məsafədən zondlama;
- Əşyaların İnterneti (IoT) şəbəkələri;
- iqlim dəyişikliyi və ekoloji monitorinq;
- elmi təcrübələr və yeni kosmik texnologiyaların sınaqdan keçirilməsi.

CubeSat texnologiyası tələbələrə, müəllimlərə və tədqiqatçılara mini kosmik aparatların layihələndirilməsi, istehsalı və monitorinqi sahəsində praktiki biliklər əldə etməyə imkan

yaradır. Bir neçə CubeSat-ın birgə işlədiyi konstellasiyalar vasitəsilə daha mürəkkəb və genişmiqyaslı missiyaların həyata keçirilməsi də mümkün olur [3-4].

CubeSat-ların gələcək inkişaf istiqamətləri aşağıdakılardır:

- təkmilləşdirilmiş sensor və ölçmə sistemləri;
- daha yüngül və səmərəli enerji mənbələri;
- kommersiya və telekommunikasiya tətbiqlərinin genişlənməsi;
- kosmik tullantıların monitorinqi və idarə edilməsi;
- beynəlxalq elmi və texnoloji əməkdaşlıqların gücləndirilməsi.

Beləliklə, Ka-band texnologiyasının optimallaşdırılması, GEO–LEO hibrid modellərinin tətbiqi və CubeSat əsaslı elmi layihələrin inkişafı peyk rabitə sistemlərinin gələcək inkişafı üçün əsas strateji istiqamətlərdir. Bu yanaşmalar peyk rabitəsinin texniki imkanlarını genişləndirməklə yanaşı, onun iqtisadi səmərəliliyini və cəmiyyət üçün faydalılığını əhəmiyyətli dərəcədə artırır.

Nəticə

Aparılan təhlil göstərir ki, peyk rabitə sistemləri qlobal informasiya cəmiyyətinin formalaşmasında strateji əhəmiyyətə malik texnologiyalardan biridir. GEO peyklər geniş əhatə dairəsi və uzunmüddətli stabil xidmət imkanları ilə televiziya yayımı və korporativ rabitə

üçün əlverişli olsa da, yüksək gecikmə göstəriciləri real vaxt tətbiqləri üçün müəyyən məhduddiyyətlər yaradır. LEO əsaslı peyk konstellasiyaları isə aşağı gecikmə və yüksək sürətli məlumat ötürülməsi imkanları ilə internet və Əşyaların İnterneti (IoT) xidmətləri üçün daha perspektivli hesab olunur.

Tədqiqat nəticələri onu göstərir ki, Ka-band tezlik diapazonu peyk rabitəsində yüksək ötürmə qabiliyyəti təmin etsə də, atmosfer şəraitindən asılılıq bu texnologiyanın tətbiqində əlavə texniki həllərin – adaptiv kodlaşdırma, ehtiyat enerji balansı və hibrid tezlik modellərinin istifadəsini zəruri edir. Eyni zamanda, CubeSat texnologiyaları aşağı xərcəli və çevik həll kimi elmi tədqiqatlar, Yerin müşahidəsi və eksperimental rabitə sistemləri üçün geniş perspektivlər açır.

Nəticə etibarilə, Azərbaycan üçün peyk rabitə infrastrukturunun gələcək inkişafı GEO və LEO sistemlərinin birgə istifadəsinə əsaslanan hibrid modellərin tətbiqi, Ka-band texnologiyasının optimallaşdırılması və CubeSat əsaslı elmi layihələrin genişləndirilməsi ilə daha səmərəli ola bilər. Bu yanaşma ölkənin regional və qlobal rabitə bazarında rəqabət qabiliyyətinin artırılmasına, eləcə də müasir telekommunikasiya tələblərinə uyğun dayanıqlı peyk sistemlərinin formalaşdırılmasına imkan yaradır.

Maraqlar münaqişəsi

Müəlliflər bu məqalədə araşdırılması tələb olunan maraqlar münaqişəsinin olmadığını qeyd edirlər.

REFERENCES

1. **Roddy, Dennis**, Satellite Communications, McGraw-Hill Books, New York, 2006.
2. **Həsənov A.R., Binnətov M.F., Bayramov R.M., Ağayev E.A., Əhmədov R.A.** Xətti stasionar sistemin zaman və tezlik oblastında təhlili. Azərbaycan Milli Aerokosmik Agentliyinin Xəbərləri. 2025, Cild 28, №3, s. 44-47.
3. **Bayramov R.M., Rahimov A.T.** Improving the Photometric Accuracy of a CCD Television Camera. Herald of the Azerbaijan Engineering Academy. 2024, 16 (4), pp. 89-95. https://doi.org/10.52171/2076-0515_2024_16_04_89_95.
4. **Bayramov R.M., Rahimov A.T.** Selection of the optimal digital aperture method corrections for aerospace research. Scientific Journal. Vol. 26, №3, 2024. <https://scientific-journals.naa.edu.az/api/articles/get/365>