



TEXNİKA ELMLƏRİ TECHNICAL SCIENCES

Çoxkanallı radiorele şəbəkəsi üçün tezlik planlama üsulları

Əsəd Rüstəmov^{1*} , Abdurəhman Babayev² , Rəşad Əliyev² ,
Cavanşir Göyüşov³ , Əli Kazımzadə³

Xülasə. Müasir dövrdə telekommunikasiya sahəsində baş verən sürətli inkişaf radiorele sistemlərinin inkişafına zərurət yaratmışdır. Xüsusilə mürəkkəb coğrafi şəraitli ərazilərdə radiorele sistemləri etibarlı rabitə vasitəsi hesab olunur. Bu sistemlərin işinin effektiv təşkil olunması üçün qarşıya qoyulan əsas məsələlərdən biri tezlik resurslarının düzgün paylanması və optimal şəkildə planlaşdırılmasıdır. Mövzunun məqsədi çoxkanallı radiorele şəbəkələrində tezlik planlamasının prinsiplərini araşdırmaq, interferensiya problemini təhlil etmək və bu problemlərin aradan qaldırılması üçün effektiv yanaşmaları müəyyən etməkdir. Eyni zamanda, statik və dinamik tezlik planlama üsullarının müqayisəli təhlili aparılaraq onların tətbiq sahələrinin müəyyənəşdirilməsi əsas məqsədlərdən biri kimi çıxış edir. Məqalədə radiorele şəbəkələrində interferensiyanın müxtəlif növləri, o cümlədən eyni tezlikli, yanaşı kanal, çoxşüalı yayılma və elektromaqnit interferensiyası ətraflı şəkildə təhlil edilmişdir. Bu problemlərin həlli üçün anten sistemlərinin optimallaşdırılması, qoruyucu zolaqların düzgün seçilməsi, adaptiv güc nəzarəti və müxtəliflik texnikalarının tətbiqi kimi yanaşmalar təqdim olunmuşdur. Həmçinin, tezlik planlamasında statik və dinamik üsulların xüsusiyyətləri araşdırılaraq, xüsusilə dinamik planlamanın dəyişkən şəbəkə şəraitində üstünlükləri əsaslandırılmışdır. Nəticədə statik və dinamik tezlik planlama üsullarının müqayisəsi göstərir ki, hər iki yanaşma radiorele şəbəkələrində müəyyən şəraitlər üçün uyğun həll təqdim edir. Sabit və az dəyişən şəbəkələr üçün statik planlama kifayət qədər effektiv olsa da, müasir və kompleks radiorele sistemlərində optimal performans əldə etmək üçün dinamik tezlik planlama və ya hər iki üsulun kombinasiyası daha məqsədəuyğun hesab edilir.

Açar sözlər: radiorele şəbəkəsi, çoxkanallı rabitə sistemi, tezlik planlaması, tezlik optimallaşdırması, interferensiya, interferensiyanın azaldılması, tezliyin təkrar istifadəsi, statik tezlik planlama, dinamik tezlik planlama

¹ Azərbaycan Texniki Universiteti, milli təhlükəsizlik və hərbi elmləri doktoru, Bakı, Azərbaycan

² Azərbaycan Texniki Universiteti, magistrant, Bakı, Azərbaycan

³ Azərbaycan Texniki Universiteti, magistrant, Bakı, Azərbaycan

* Məsul müəllif. E-poçt: asad-rustam@mail.ru

Daxil oldu: 7 Fevral 2026; Qəbul edildi: 10 May 2026; Onlayn dərc edildi: 30 May 2026

© Müəllif(lər) 2026. Bu, Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Beynəlxalq Lisenziyası (CC BY-NC 4.0) şərtləri altında paylanan açıq girişli məqalədir.

Frequency Planning Methods for Multichannel Radio Relay Networks

Asad Rustamov^{1*} , Abdulrahman Babayev² , Rashad Aliyev² ,
Javanshir Goyushov³ , Ali Kazimzadeh³ 

Abstract. In the modern era, the rapid development of the telecommunications sector has necessitated the advancement of radio relay systems. These systems are considered a reliable means of communication, especially in areas with complex geographical conditions. One of the main challenges in ensuring the efficient operation of such systems is the proper allocation and optimal planning of frequency resources. The aim of this study is to investigate the principles of frequency planning in multichannel radio relay networks, analyze interference-related problems, and identify effective approaches for mitigating these issues. At the same time, a comparative analysis of static and dynamic frequency planning methods is conducted to determine their respective application areas. The article provides a detailed analysis of various types of interference in radio relay networks, including co-channel interference, adjacent channel interference, multipath propagation, and electromagnetic interference. To address these challenges, several approaches are proposed, such as optimization of antenna systems, appropriate selection of guard bands, adaptive power control, and the application of diversity techniques. Furthermore, the characteristics of both static and dynamic frequency planning methods are examined, highlighting the advantages of dynamic planning, particularly under varying network conditions. The results of the comparative analysis indicate that both approaches offer suitable solutions depending on specific network scenarios. While static planning is effective for stable and less dynamic networks, dynamic frequency planning – or a hybrid combination of both methods – is more appropriate for achieving optimal performance in modern and complex radio relay systems.

Keywords: radio relay network, multichannel communication system, frequency planning, frequency optimization, interference, interference mitigation, frequency reuse, static frequency planning, dynamic frequency planning

1 Azerbaijan Technical University, Doctor of National Security and Military Sciences, Baku, Azerbaijan

2 Azerbaijan Technical University, Master's student, Baku, Azerbaijan

3 Azerbaijan Technical University, Master's student, Baku, Azerbaijan

* Corresponding author. E-mail: asad-rustam@mail.ru

Received: 7 February 2026; Accepted: 10 May 2026; Published online: 30 May 2026

© Author(s) 2026. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

Giriş

Son illərdə texnologiyanın sürətli inkişafı telekommunikasiya sahəsinə də öz təsirini göstərməkdədir. İnformasiya mübadiləsində keyfiyyət artımının tələb olunduğu bir dövrdə rabitə sahəsinin inkişafı xüsusi önəm daşıyır. Mürəkkəb coğrafi relyef şəraitinə malik olan ərazilər radiorele şəbəkəsindən istifadəni zəruri hala çevirir. Rabitə xətlərinin çəkilməsində çətinlik yaranan ərazilərdə radiorele sistemləri informasiya axınıni təşkil etməkdə ən effektiv vasitə sayılır. Bu sistemlərin televiziya yayımında, hərbi rabitədə, həmçinin, mobil operator şəbəkələrində istifadəsinə geniş yer ayrılır. Radiorele şəbəkələrinin fəaliyyət səmərəliliyini təmin etmək üçün nəzərdə saxlanılan başlıca məsələlərdən biri tezlik bölgüsünün düzgün aparılmasıdır. Məlum məsələdir ki, tezlik spektri məhdud diapazonludur və onun optimal paylanması sistemin effektivliyinə təsir edir. Rabitənin bu növündə eyni və ya bir-birinə qonşu tezliklərin istifadə olunması interferensiya yaradır ki, bu da rabitə

keyfiyyətini zəiflədə bilər. Rabitə keyfiyyətinin zəifləməsi isə sistemin etibarlılığını aşağı salır. Qeyd olunan interferensiya hadisəsi radiodalğaların yayılma xüsusiyyətinə təsir edərək ötürülən məlumatda səhv ehtimalının artması ilə nəticələnir. Tezlik bölgülərinin sıx yerləşməsinə nəzərə alaraq, interferensiya səviyyəsini minimal həddə endirmək məsələsi əsas prioritet hesab oluna bilər.

Tezlik planlamasının məqsədi şəbəkəyə mümkün qədər az sayda tezlik təyin etmək və bunu elə şəkildə həyata keçirməkdir ki, radiorele xəttinin keyfiyyəti və istifadə imkanı müdaxiləyə minimum dərəcədə məruz qalsın (Lehpamer, 2010).

Tədqiqat

Radiorele rabitəsinin telekommunikasiyada rolu. Radiorele şəbəkəsi sm-lik və mm-lik dalğa diapazonunda çalışan, informasiyanın stansiyalar arasında ardıcıl ötürülməsi prinsipinə əsaslanan telekommunikasiya sistemidir. Burada məlumatın ötürülməsi elektromaqnit dalğaları ilə həyata keçirilir. Həmin dalğalarla ötürülən siqnal təyin olunmuş məsafələrdə yerləşdirilən stansiya tərəfindən qəbul olunaraq gücləndirilir, növbəti stansiyaya ötürülür. Beləliklə, nəzərdə tutulan siqnal ardıcıl stansiyalarla ötürülərək böyük məsafədə rabitə əlaqəsini təmin etmiş olur. Rabitə növünün mikrodalğa tezlik diapazonunda fəaliyyət göstərməsi onun iri həcmli məlumat transferinin təmin edilməsinə, həmçinin, yüksək ötürmə qabiliyyətinə malik olmasına imkan verir. Həmçinin, qeyd olunması vacib məqamlardan biri də stansiyalar arasında birbaşa görünüş xəttinin təmin olunmasıdır (Şəkil 1). Bu prinsipi əsas götürərək radiorele stansiyaları əksər hallarda hündür mövqelərdə, xüsusən qüllələrdə, dağ və təpə nöqtələrində yerləşdirilir. Bu cür yerləşmə rabitə keyfiyyətinə, həmçinin, siqnalın maneəsiz ötürülməsinə birbaşa təsir edir. Radiorele şəbəkəsinin əsas elementlərinə antena sistemləri, radioverici və radioötürücü qurğular, eləcə də məlumat ötürülməsini təmin edən digər avadanlıqlar daxildir.



Şəkil 1

Birbaşa görünüş məsafəsinin təsviri

Müasir telekommunikasiya şəbəkələrində radiorele şəbəkələri mobil operatorların baza stansiyası kimi geniş istifadə olunur. Bundan başqa, müxtəlif sahələrdə televiziya siqnalları, telefon rabitəsi, müxtəlif rəqəmsal informasiyaların mübadiləsi və hətta internetə çıxış xətti kimi problem yaranan vəziyyətlərdə həll yolu olaraq baxıla bilər.

Radiorele şəbəkələrində interferensiya problemləri. Radiorele rabitə şəbəkələrinin effektiv fəaliyyəti bir çox amillərdən asılıdır və bu kontekstdə interferensiya ən kritik məhdudlaşdırıcı faktorlar sırasında yer alır. Praktiki müşahidələr göstərir ki, bu təsir yalnız səs-küyün artması ilə məhdudlaşmır, eyni zamanda, qəbul olunan siqnalın statistik davranışını dəyişdirən kompleks proses kimi formalaşır. Xüsusilə, tezlik mühitinin monitorinqi əsasında aparılan təhlillər interferensiyanın zaman üzrə sabit olmadığını, dinamik xarakter daşdığını ortaya qoyur. Bu dəyişkənlik siqnal səviyyəsində dalğalanmalara səbəb olaraq onun dəqiq qiymətləndirilməsini çətinləşdirir və adaptiv idarəetmə mexanizmlərinin effektivliyinə mənfi təsir göstərir. Digər tərəfdən, interferensiyanın paylanması bəzi hallarda klassik Gauss qanununa tabe olmaması mövcud nəzəri modellərin tətbiq sahəsini məhdudlaşdırır. Bu baxımdan, radiorele sistemlərinin performans analizində interferensiyanın statistik xüsusiyyətlərinin daha real modellərlə ifadə olunması mühüm əhəmiyyət kəsb edir (International Telecommunication Union, 2021a).

Radiorele şəbəkələrində tez-tez rast gəlinən və sistemin iş keyfiyyətinə ciddi təsir göstərən interferensiya formalarından biri eyni tezlikli interferensiyadır (co-channel interference). Bu hal əsasən tezlik resurslarının qənaətli istifadəsi məqsədilə eyni tezliyin müxtəlif ərazilərdə yenidən tətbiq olunması ilə bağlıdır. Lakin praktiki şəraitdə ötürücülər arasında məsafənin düzgün seçilməməsi və antenlərin istiqamətlənməsinin optimal olmaması bu interferensiyanın səviyyəsini əhəmiyyətli dərəcədə artırır. Nəticədə, signalın qəbulunda etibarlılıq azalır, ötürmə zamanı səhvlər çoxalır və istifadə olunan modulyasiya üsullarının effektivliyi zəifləyir. Bu proses ümumi sistem tutumunun məhdudlaşmasına da səbəb olur. Xüsusilə sıx yerləşmiş radiorele şəbəkələrində interferensiyanın məkan üzrə qeyri-bərabər paylanması müşahidə edilir ki, bu da planlaşdırma mərhələsində əlavə optimallaşdırma yanaşmalarının tətbiqini zəruri edir. Bu baxımdan müasir radiorele sistemlərində interferensiyanın təsirini azaltmaq üçün gücün adaptiv şəkildə tənzimlənməsi və yüksək istiqamətlilik xüsusiyyətinə malik anten texnologiyalarından geniş istifadə olunur (Rappaport, 2002a).

Radiorele sistemlərində performans təsir edən vacib amillərdən biri də yanaşı kanal interferensiyasıdır (Adjacent Channel Interference – ACI). Bu problem, əsasən, real qurğularda istifadə olunan ötürücü və qəbuledici filtrlərinin ideal selektivliyə malik olmaması ilə izah olunur. Praktiki şəraitdə filtrasiya prosesinin məhdudluğu səbəbindən signal spektri tam sərhədlənmir və enerjinin bir hissəsi qonşu tezlik sahələrinə yayılır. Bu effekt xüsusilə yüksək güclü ötürmə hallarında və kanallar arasında məsafə az olduqda daha qabarıq şəkildə müşahidə edilir. “International Telecommunication Union Radiocommunication Sector” tərəfindən verilən tövsiyələrdə də vurğulandığı kimi, kanal aralıqlarının və qoruyucu zolaqların düzgün seçilməməsi sistemin ümumi iş göstəricilərinin pisləşməsinə səbəb ola bilər. Digər tərəfdən, qəbuledici qurğunun selektivlik xüsusiyyətləri də bu interferensiyanın təsir dərəcəsinə birbaşa təsir edir. Belə ki, selektivlik zəif olduqda qonşu kanallardan daxil olan siqnallar əsas signalın keyfiyyətini əhəmiyyətli dərəcədə pozur. Bu baxımdan tezlik planlaşdırılması mərhələsində kanal ayrımının və filtr parametrlərinin optimal şəkildə təyin edilməsi xüsusi əhəmiyyət daşıyır (International Telecommunication Union, 2021b).

Radiorele rabitə mühitində signalın yayılma xüsusiyyətləri interferensiyanın yaranmasında həlledici rol oynayır və bu baxımdan çoxşüalı yayılma (multipath propagation) əsas mexanizmlərdən biri kimi çıxış edir. Elektromaqnit dalğaların müxtəlif obyektlərdən – tikililərdən, yer səthindən və atmosfer qatlarından əks olunaraq qəbulediciyə fərqli yollarla çatması siqnallar arasında faza və amplituda fərqlərinin yaranmasına səbəb olur. Bu fərqlər nəticəsində siqnalların üst-üstə düşməsi həm gücləndirici (konstruktiv), həm də zəiflədici (destruktiv) xarakter ala bilər. Xüsusilə destruktiv üst-üstə düşmə hallarında signal səviyyəsində kəskin azalma baş verir ki, bu da dərin sönmə effektləri ilə müşayiət olunur. Müşahidələr göstərir ki, bu tip təsirlər daha çox yüksək tezlik diapazonlarında və uzun məsafəli radiorele xətlərində özünü büruzə verir. Bu səbəbdən müasir rabitə sistemlərində signalın sabitliyini qorumaq və interferensiyanın təsirini azaltmaq üçün müxtəliflik yanaşmalarından (tezlik, məkan və anten müxtəlifliyi) və adaptiv modulyasiya mexanizmlərindən geniş şəkildə istifadə olunur (Molisch, 2012).

Radiorele sistemlərinin fəaliyyətinə təsir edən mühüm xarici faktorlar sırasında elektromaqnit interferensiya (EMI) xüsusi yer tutur. Müasir sənaye və şəhər mühitində geniş istifadə olunan müxtəlif elektron avadanlıqlar, enerji ötürmə xətləri və radio qurğuları elektromaqnit şüalanma mənbəyi kimi çıxış edərək rabitə mühitində əlavə pozuntular yaradır. Aparılan tədqiqatlar göstərir ki, bu tip təsirlər signalın keyfiyyət göstəricilərini zəiflədərək, xüsusilə aşağı səviyyəli signal şəraitində rabitənin sabitliyini pozur. EMI-nin təsir dərəcəsi istifadə olunan tezlik diapazonundan və mühitin elektromaqnit xüsusiyyətlərindən asılı olaraq dəyişir və bəzi hallarda qısa müddətli, impulsvari interferensiya şəklində özünü göstərir. Bu cür təsirlər klassik davamlı səs-küy yanaşmalarından fərqli olaraq daha mürəkkəb analiz metodlarının və inkişaf etmiş modelləşdirmə üsullarının tətbiqini tələb edir (Goldsmith, 2005).

Radiorele sistemlərində interferensiyanın səviyyəsinin azaldılması baxımından antenlərin yerləşmə sxemi və onların dəqiq istiqamətləndirilməsi xüsusi əhəmiyyət kəsb edir. “International Telecommunication Union Radiocommunication Sector” tərəfindən təqdim olunan tövsiyələrə əsasən, antenlərarası bucaq fərqi, yan ləçəklərin səviyyəsi və qütbləşmə xüsusiyyətləri interferensiyanın formalaşmasına birbaşa təsir edən əsas texniki göstəricilər hesab olunur. Layihələndirmə mərhələsində bu parametrlərin düzgün nəzərə alınmaması signalın arzuolunmayan istiqamətlər üzrə yayılmasına şərait yaradır və nəticədə qonşu radiorele xətləri arasında qarşılıqlı təsir güclənir. Bu baxımdan, şəbəkənin planlaşdırılması zamanı anten sistemlərinin parametrlərinin optimallaşdırılması və uyğun yerləşmə konfigurasiyasının seçilməsi interferensiyanın minimuma endirilməsi üçün vacib şərtlərdən biridir (International Telecommunication Union, 2019b).

Rabitə sistemlərində interferensiyanın təsiri, ilk növbədə, əsas performans göstəricilərində özünü biruzə verir və sistemin ümumi effektivliyini birbaşa müəyyənləşdirir. Interferensiya səviyyəsinin artması signalın etibarlılığını azaldır, bu isə ötürmə zamanı səhvlərin çoxalması ilə müşahidə olunur. Eyni zamanda, signalın keyfiyyət göstəricilərinin zəifləməsi onun faydalı komponentinin səs-küy fonunda itirilməsinə səbəb olur və nəticədə informasiya ötürmə qabiliyyəti məhdudlaşır. Belə şəraitdə məlumatın düzgün çatdırılmasını təmin etmək üçün təkrar ötürmə mexanizmlərinə daha çox ehtiyac yaranır ki, bu da şəbəkədə əlavə gecikmələrin formalaşmasına gətirib çıxarır. Nəticə etibarilə, qeyd olunan amillər xidmət keyfiyyətinin aşağı düşməsi ilə nəticələnir və radiorele şəbəkələrinin planlaşdırılması və optimallaşdırılması zamanı nəzərə alınmalı əsas göstəricilərdən biri kimi qiymətləndirilir (International Telecommunication Union, 2021a).

Tezlik planlama üsulları. Tezlik planlaması radiorele şəbəkələrində sistemin yüksək etibarlılığını və effektivliyini təmin edən əsas məsələdir. Nəzərə almaq lazımdır ki, tezlik planlaması tək-cə mövcud tezliklərin diapazonlar üzrə paylanması demək deyil, eyni zamanda, interferensiyanın minimuma endirilməsi, rabitə kanallarının etibarlı fəaliyyətinin əldə edilməsi, həmçinin, elektromaqnit uyğunluğunun diqqətdə saxlanması kimi məsələləri özündə birləşdirir. Bundan başqa, bu məsələdə bir sıra texniki parametrləri əsas götürmək lazımdır ki, bunlara kanalın eni, modulyasiya üsulları, antenaların istiqamətlənməsi və güclənmə əmsalları və digər texniki parametrlər daxildir. Əksər ədəbiyyatlarda tezlik planlamanın adı tezliyin təkrar istifadəsi termini ilə yanaşı hallanır. Əslində, bu terminlərin bir-biri ilə bu qədər sıx əlaqəli olması tezlik diapazonunun məhdud olmasıdır ki, bu da eyni tezliyin təkrar istifadə olunmasını zəruri hala çevirir. Qeyd olunan amilləri nəzərə alaraq təkrar vurğulamaq lazımdır ki, tezlik planlamasına sadə məsələ kimi deyil, kompleks problemlərin həllinə yönəlmiş sistemli yanaşma kimi baxmaq lazımdır.

Statik tezlik planlama - radiorele şəbəkələrində istifadə olunan ənənəvi tezlik planlama üsuludur. Bu tezlik planlama üsulunda tezliyin təkrar istifadəsi prosesindən geniş istifadə olunur ki, bu da interferensiyanın azaldılması probleminə həll yolu kimi görünür. Planlamanın əsas üstünlüyü sadəliyindən ibarətdir. İstifadə imkanında olan məhdudiyyətlərə görə sözügedən planlamadan, əsasən, sabit, dəyişməyən şəbəkələrdə istifadə olunur. Sistemin qeyd olunması mühüm olan digər üstünlüyü isə real vaxtda hesablama aparmamasından ibarətdir ki, bu da şəbəkənin idarə olunmasını asanlaşdırır. Seçilən tezliklərə gəldikdə isə, radiorele xəttində istifadəsi nəzərdə tutulan tezliklər əvvəlcədən planlaşdırılma mərhələsində seçilir və sonradan həmin tezliklərin dəyişdirilməsi mümkün olmur. Beləliklə, şəbəkə aktiv olduğu müddətdə işlədiyi tezlik bölgüsü dəyişməz olaraq qalır. Statik tezlik planlama üsulundan rabitənin sabit işləməsini təmin etmək, həmçinin, interferensiyanın azaldılması məqsədilə istifadə etmək olar. Lakin sistemin əsas üstünlüyü bir sıra çətinliklər də yarada bilər. Belə ki, şəbəkədə trafik axınının dəyişməsi, əvvəlcədən təyin olunmuş tezliklərin fəaliyyətinə ciddi təsir göstərir, hətta bəzi tezliklərin boş qalması ilə nəticələnmə bilər. Ümumi xüsusiyyətləri nəzərə alaraq belə qənaətə gəlmək olar ki, bu sistem sabit şəraitdə rabitəni təmin etmək üçün olduqca etibarlı üsuldur. Baxmayaraq ki, statik tezlik planlama üsulu sabit şərait üçün nəzərdə tutulub, bu sistemdən dəyişkən şəbəkələrdə digər planlama üsulları ilə birlikdə tətbiqinə ehtiyac yarana bilər.

Dinamik tezlik planlama üsulu daha əvvəl nəzərdən keçirilən ənənəvi planlama üsulundan olduqca fərqlənir. Burada prinsip statik planlamada olduğu kimi sabit tezliklər ilə deyil, əksinə, şəbəkədəki bir sıra faktorları nəzərə alaraq tezliklərin dinamik şəkildə təkrar bölüşdürülməsinə əsaslanır. Qeyd olunan faktorlara interferensiya səviyyəsini, şəbəkənin trafik yükünü, kanal keyfiyyətini misal göstərmək olar. Bəhs olunan planlama üsulunda məqsəd məhdud tezlik diapazonundan yüksək səmərəliliklə istifadə etmək, xidmət keyfiyyətini yuxarı saxlamaq və interferensiya problemini minimuma endirməkdir. Dinamik tezlik planlama üsulu sıx və dəyişkən şəbəkə mühitinə xas olduğu üçün çoxkanallı radiorele sistemlərində istifadəsi daha məqsədəuyğun hesab edilir.

Dinamik tezlik planlamada uyğun tezliklərin seçilməsi üçün davamlı olaraq bir sıra parametrlər monitorinqlərlə ölçülməli və nəzarətdə saxlanılmalıdır. Beləliklə, bu parametrlər əsasında sistem ən uyğun tezlik kanallarını seçə, zərurət yaranarsa, tezliklərin yenidən təyin olunması prosesini reallaşdıra bilər. Ümumi olaraq şəbəkə davamlı formada aşağıdakıları izləməlidir: -siqnal-küy nisbəti; -siqnal-interferensiya nisbəti; -kanalın yüklənməsi (doluluğu) və trafik yükü; -ötürülən məlumatdakı səhv ehtimalı

Dinamik tezlik planlama, adətən, mərkəzləşdirilmiş və ya paylanmış idarəetmə mexanizmləri əsasında həyata keçirilir. Mərkəzləşdirilmiş yanaşmada şəbəkənin idarəetmə mərkəzi bütün linklər üzrə məlumatları toplayaraq optimal tezlik bölgüsünü müəyyən edir. Paylanmış yanaşmada isə hər bir radiorele qovşağı lokal məlumatlara əsaslanaraq qərar verir. Müasir şəbəkələrdə bu iki yanaşmanın kombinasiyası da geniş istifadə olunur (Akyildiz et al., 2016). Bu üsulun digər üstün cəhətlərindən biri də adaptiv olmasıdır. Yəni şəbəkədə yaranan ani dəyişikliklərə vaxtında reaksiya verə bilər. Bu proses sistemin işini daha operativ hala gətirir. Şəbəkədə baş verə biləcək ani dəyişikliklər dedikdə, kanal keyfiyyətinin azalması, kəskin trafik yükünün artması və yeni interferensiya mənbələrinin yaranması halları nəzərdə tutulur. Bu kimi problemlərə vaxtında müdaxilə olunması şəbəkənin ümumi performansını və ötürmə qabiliyyətini artırır, baş verə biləcək gecikməni isə azaldır.

Hesabat. Hesabatın məqsədi 1000 nəfərlik heyyyətə malik olan xüsusi təyinatlı ərazi üçün radiorele rabitə sisteminin təşkil olunması, həmçinin, uyğun tezlik planlama üsulunun seçilməsi və əsas texniki parametrlərə görə hesablamaların aparılmasıdır. Qapalı tipli ərazilərdə şəbəkə topologiyası əvvəlcədən məlum olduğuna görə, tezlik resurslarının planlı şəkildə bölüşdürülməsi mümkündür. Bu nöqtəyi-nəzərdən bu tip məsələlərdə statik tezlik planlama üsulu daha məqsədəuyğun hesab olunur. Rabitə məsələlərinin həllində olduğu kimi, bu məsələnin həllində də dalğanın yayılma şəraiti, atmosfer təsirləri və siqnalın zəifləməsi kimi faktorlar nəzərdə saxlanılmalıdır. Hesabat üçün aşağıdakı ilkin verilənlər qəbul edilmişdir ki, bu da qapalı obyekt üçün kifayət edəcək qiymətlər hesab olunur.

Hesablamalarda istifadə olunan texniki parametrlər beynəlxalq standartlar (ITU-R — International Telecommunication Union— Radiocommunication Sector) və real radiorele avadanlıqlarının istehsalçı tərəfindən təqdim olunan məlumatlar (datasheet) əsasında seçilmişdir. Layihə parametrləri (istifadəçi sayı, məsafə və s.) isə real tətbiq ssenarisinə uyğun mühəndis fərziyyələri kimi qəbul edilmişdir. Aparılmış hesablamaların nəticələri praktiki sistemlərin texniki göstəriciləri ilə uyğunluq təşkil etdiyinə görə əldə edilən nəticələr reallığa yaxın hesab edilə bilər.

Cədvəl 1

İlkin verilənlər

Ərazinin sahəsi	1 km ²
Ümumi istifadəçi sayı	1000 nəfər
Eyni vaxtda aktiv istifadəçi payı	25%
Bir istifadəçi üçün orta trafik	1 Mbit/s
Şəbəkə strukturu	1 mərkəzi və 4 kənar qovşaq
Ötürmə xətlərinin uzunluğu	0.6-1.2 km
Bir radiorele xətti üçün tələb olunan trafik	75Mbit/s
Tezlik	13 Ghz
Ötürmə gücü	21 dBm
Anten qazancı	Hər ikisi üçün 36dBi
Qəbuledicinin həssaslığı	-67dBm
Əlavə itkilər	2dB
Bir radiorele xəttinin real ötürmə qabiliyyəti	≈193Mbit/s

İlk öncə şəbəkənin ümumi trafikini hesablayaq (International Telecommunication Union, 2005):

$$T = N \times \alpha \times R \quad (1)$$

$$T = 1000 \times 0.25 \times 1 = 250\text{Mbit/s}$$

T- ümumi şəbəkə trafiki (Mbit/s), N- Ümumi istifadəçi sayı, α - aktiv istifadəçi əmsalı, R- bir istifadəçi üçün orta trafik sürət. Əlavə ehtiyat (20%) nəzərə alınarsa:

$$T_{\text{ümumi}} = 250 \times 1.2 = 300\text{Mbit/s} \quad (2)$$

Beləliklə, şəbəkənin daşımalı olduğu ümumi trafik 300 Mbit/s təşkil edir. Bu trafik 4 radiorele xətti arasında bölündükdə hər xətt üçün 75Mbit/s tələb yaranır. Bu hesabat üçün işçi tezlik diapazonu 13 Ghz seçilmişdir ki, bu diapazon radiorele sistemlərində geniş yayılmış tezlikdir. 28 MHz kanal eni ilə işləyən sistemlərdə yüzlərlə Mbit/s səviyyəsində ötürmə mümkündür. Real avadanlıq kimi müasir radio sistemlərinin texniki parametrləri götürülmüşdür: ötürmə gücü təxminən 20–23 dBm, anten qazancı 35–36 dBi və yüksək modulyasiya səviyyələrində (256 QAM) yüksək ötürmə təmin edilir. Bu parametrlər real istehsalçı tərəfindən verilmiş texniki məlumatlara əsaslanır və praktik tətbiqlərdə geniş istifadə olunur. Şəbəkə topologiyası olaraq ulduz(star) topologiyası seçilmişdir. Belə olan halda mərkəzi qovşaq digər kənar qovşaqlarla birbaşa əlaqədə olur ki, bu da idarəetməni sadələşdirir. Nəticədə, tezlik planlama daha aydın hala gəlir. Qapalı ərazilər üçün bu topologiya növü daha effektiv hesab olunur. Çünki bu topologiyanın tətbiqi marşrutlamayı sadələşdirir və interferensiyanı nəzarətdə saxlaya bilir. Bu yanaşmadan praktiki layihələrdə də geniş istifadə olunur (Brown et al., 2020).

Seçilmiş statik tezlik planlama üsuluna əsasən hər radiorele link üçün fərqli tezlik kanalı ayrılır. Bu yanaşma eyni tezlikdən istifadə edən linklər arasında interferensiyanın yaranmasının qarşısını alır. ITU (Beynəlxalq Telekomunikasiya İttifaqının Radiokommunikasiya Sektoru) standartlarına

əsasən 13 GHz diapazonunda 28 MHz kanal ayırımı mövcuddur və bu kanalların düzgün paylanması ilə interferensiya minimuma endirilə bilər. Bu ssenaridə hər link üçün ayrıca kanal seçilməsi ən təhlükəsiz və stabil həll hesab olunur (International Telecommunication Union, 2007).

Ən uzun xətt üçün (1.2 km) sərbəst fəza itkisini hesablasaq (International Telecommunication Union, 2019a):

$$FSPL = 32.4 + 20\log(f) + 20\log(d) \quad (3)$$

FSPL – sərbəst fəza itkisi (dB), f – tezlik (MHz ilə), d – məsafə (km ilə). FSPL (Link büdcəsi) - signalın yol boyu zəifləməsini hesablayıb, sonda işləyib-işləməyəcəyini yoxlamaqdır.

$$FSPL \approx 116\text{dB}$$

Qəbul gücü (Rappaport, 2002b):

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L \quad (4)$$

P_r – qəbulediciyə çatan signal (dBm), P_t – ötürmə gücü (dBm), G_t – ötürücü anten qazancı (dBi), G_r – qəbuledici anten qazancı (dBi), L – ümumi itkilər (dB)

$$P_r = 21 + 36 + 36 - 116 - 2 = -25\text{ dBm}$$

(4) düsturdan alınan nəticəyə görə məlum olur ki, signal qəbulediciyə -25 dBm güclə çatır.

$$FM = P_r - P_{\text{sens}} \quad (5)$$

FM – signalın ehtiyat gücü (dB), P_r – qəbul olunan signal, P_{sens} – qəbuledicinin minimum işləmə həddi.

Nəzərə alınmalıdır ki, 256 QAM üçün qəbul həssaslığı, yəni P_{sens} təxminən -67 dBm qəbul edilmişdir. Belə olduğu halda (5) düstura görə signalın ehtiyat gücü:

$$FM = 42\text{ dB}$$

Beləliklə, alınan nəticə linkin stabil işləməsini təmin etmək üçün kifayət qədər uyğun hesab olunur.

Cədvəl 2

Qovşaqlar üzrə tezlik bölgüsü

Qovşaq	Kanalın (şərti adla K_n)	Tezlik (Ghz)
N_0-N_1	K_1	13.10 / 13.15
N_0-N_2	K_2	13.20 / 13.25
N_0-N_3	K_3	13.30 / 13.35
N_0-N_4	K_4	13.40 / 13.45

Cədvəl 3

Qovşaqlar arası məsafə

Qovşaq	Təyinat	Məsafə
N ₀	Mərkəzi baza	-
N ₁	Yaşayış zonası	0.75 km
N ₂	Texniki zona	0.9 km
N ₃	Anbar və parklanma	1.2 km
N ₄	İnzibati zona	0.65 km

Hesabat aparılarkən əsas prinsip olaraq aşağıdakılar nəzərə alınmışdır: 1. Eyni qüllədə yerləşən xəttlərə fərqli tezliklər verildi. 2. Qonşu kanallar arasında qoruyucu kanal (0.5 olmaqla) nəzərə alındı. 3. Uzaq xəttlər üçün gələcəkdə reuse mümkündür. 4. Antenalar dar şüalı (~3°) seçildi və nəticədə interferensiya azaldı. Başlıqda əldə olunan verilənlərə görə, həmçinin, bir sıra göstəriciləri də hesablamaq olar.

Spektral səmərəliliyi hesablayaraq kanal eninin 1Mhz-i üçün neçə Mbit/s ötürüldüyünü tapmaq olar (Goldsmith, 2005):

$$\eta = \frac{C}{B} \quad (6)$$

η - spektral səmərəlilik (bit/s/Hz), C- linkin ötürmə qabiliyyəti, B- kanalın eni

$$\eta = \frac{193\text{Mbit/s}}{28\text{MHz}} \approx 6.89\text{bit/s/Hz}$$

Nəticə göstərir ki, seçilmiş 28 MHz kanal enində sistem hər 1 Hz spektr üçün təxminən 6.89 bit/s məlumat ötürə bilər. Bu, seçilmiş modulyasiya və kanal parametrləri üçün kifayət qədər yüksək göstəricidir. Tutumun ehtiyatı sistemin ötürmə qabiliyyəti ilə trafik tələbi arasında olan fərq kimi qiymətləndirilir (Molisch, 2012):

$$K_{\text{ehtiyat}} = C - T_{\text{link}} \quad (7)$$

$$K_{\text{ehtiyat}} = 193 - 75 = 118\text{Mbit/s}$$

C- bir xəttin real ötürmə qabiliyyəti T_{link} - isə bir xətt üçün tələb olunan trafikdir. Şəbəkənin ümumi tutum ehtiyatı:

$$C_{\text{ümumi}} = 4 \times 193 = 772\text{Mbit/s} \quad (8)$$

Şəbəkənin ümumi tutumu ilə tələb olunan trafikin fərqi ehtiyat resursa bərabər olacaq:

$$C_{\text{ehtiyat}} = 772 - 300 = 472\text{Mbit/s} \quad (9)$$

Nəticə

Aparılan təhlillər göstərir ki, radiorele şəbəkələrində tezlik planlaması sistemin ümumi performansına birbaşa təsir edən əsas amillərdən biridir. Məhdud tezlik spektri və müxtəlif növ interferensiya təsirləri nəzərə alındıqda, tezliklərin optimal bölgüsü rabitə keyfiyyətinin və etibarlılığının təmin olunmasında həlledici rol oynayır. İnterferensiyanın müxtəlif formaları – eyni tezlikli, yanaşı kanal, çoxşüalı yayılma və elektromaqnit təsirlər – sistemin işinə mənfi təsir göstərərək əlavə optimallaşdırma tədbirlərini zəruri edir. Tədqiqat nəticəsində müəyyən edilmişdir ki, statik tezlik

planlama üsulu sadə və sabit şəbəkələr üçün uyğun olsa da, dəyişkən trafik və interferensiya şəraitində kifayət qədər effektiv deyil. Dinamik tezlik planlama isə real vaxt parametrlərinə əsaslanaraq tezliklərin adaptiv şəkildə yenidən bölüşdürülməsini təmin edir və bununla da interferensiyanın azaldılması, spektrdən daha səmərəli istifadə və xidmət keyfiyyətinin yüksəldilməsi baxımından üstünlük təşkil edir. Ümumilikdə, müasir radiorele şəbəkələrində optimal nəticə əldə etmək üçün dinamik tezlik planlama üsullarının tətbiqi və ya statik yanaşma ilə kombinasiyası daha məqsəduyğun hesab olunur. Bu isə şəbəkənin dəyişən mühitə uyğunlaşma qabiliyyətini artıraraq onun dayanıqlığını və ötürmə effektivliyini yüksəldir.

Aparılmış analiz və hesablamalar göstərir ki, xüsusi təyinatlı ərazi üçün radiorele rabitə sisteminin qurulması seçilmiş yanaşma əsasında effektiv şəkildə həyata keçirilə bilər. Şəbəkənin trafik tələbi və istifadəçi davranışı nəzərə alınaraq radiorele linklərin daşımalı olduğu yük müəyyən edilmişdir. Seçilmiş tezlik diapazonu və kanal eni müasir radiorele sistemlərinin texniki imkanlarına uyğun olub, tələb olunan ötürmə qabiliyyətini təmin edir. İstifadə olunan modulyasiya üsulu və avadanlıq parametrləri linklərin kifayət qədər yüksək sürətlə işləməsinə imkan yaradır. Nəticə etibarilə, seçilmiş texniki həllər və aparılmış hesablamalar göstərir ki, layihələndirilmiş radiorele şəbəkəsi həm etibarlılıq, həm də performans baxımından tələb olunan göstəriciləri təmin edir. Bu yanaşma interferensiyanın minimum səviyyədə saxlanmasına və şəbəkənin stabil işləməsinə şərait yaradır.

Ədəbiyyat

1. Akyildiz, I. F., Nie, S., Lin, S. C., & Chandrasekaran, M. (2016). A 5G roadmap: 10 key enabling technologies. *Computer Networks*, 106, 17–48.
2. Brown, T., Sicker, D., & Sethi, A. (2020). Large-scale geospatial planning of wireless backhaul links. In *Proceedings of the 28th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems*.
3. Goldsmith, A. (2005). *Wireless communications*. Cambridge University Press.
4. International Telecommunication Union. (2005). *Teletraffic engineering handbook*. John Wiley & Sons.
5. International Telecommunication Union. (2007). *Radio-frequency channel arrangements for fixed service systems operating in the 13 GHz band* (ITU-R Recommendation F.497-7).
6. International Telecommunication Union. (2019). *Calculation of free-space attenuation* (ITU-R Recommendation P.525-4).
7. International Telecommunication Union. (2019). *Interference criteria for fixed wireless systems* (ITU-R Recommendation F.758-7).
8. International Telecommunication Union. (2021). *Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems* (ITU-R Recommendation P.530-18).
9. International Telecommunication Union. (2021). *Radio-frequency channel arrangements for fixed service systems* (ITU-R Recommendation F.746-11).
10. Lehpamer, H. (2010). *Microwave transmission networks: Planning, design, and deployment* (2nd ed.). McGraw-Hill.
11. Molisch, A. F. (2012). *Wireless communications* (2nd ed.). Wiley.
12. Rappaport, T. S. (2002). *Wireless communications: Principles and practice* (2nd ed.). Pearson Education.
13. Rappaport, T. S. (2002). *Wireless communications: Principles and practice* (2nd ed.). Prentice Hall.