MURAKKAB RELYEF SHAROITIDA AVTONOM TRANSPORT VOSITASI UCHUN VIDEO ALOQA KANALINI TANLASH VA LOYIHALASH

Xolxo‘jayev Jasurxo‘ja
Yoqubov Otabek
Abduvaliyeva Dilafruz
Toshkent shahridagi Turin politexnika universiteti,
Mashinasozlik texnologiyasi va aviakosmik muhandisligi kafedrasi.
https://doi.org/10.5281/zenodo.21690061

Annotatsiya

Ushbu maqolada tog'li hududda ishlaydigan avtonom transport vositasi uchun 500 m gorizontal masofada video ma'lumotlarini uzatish va qabul qilish tizimini loyihalash masalasi ko'rib chiqiladi. Muammo markazida masofaning o'zi emas, balki murakkab relyef, to'g'ridan-to'g'ri ko'rish chizig'ining (LOS) buzilishi, Fresnel zonasining yopilishi, ko'p yo'llilik va soyalanish kabi omillar turadi. Tadqiqotda 1.2/1.3 GHz, 2.4 GHz va 5.8 GHz diapazonlar erkin fazodagi yo'qotish, Fresnel zonasi va qo'shimcha relyef yo'qotishlariga sezgirlik nuqtai nazaridan taqqoslandi. Shuningdek, amaliy bozordagi DTC SOL8SDR-H2, Mobilicom MCU-30, DJI SDR Transmission, Accsoon CineView 2 SDI va Hollyland Cosmo C1 qurilmalari funksional jihatdan tahlil qilindi. Hisob-kitoblar 500 m kanal uchun 1.2 GHz, 2.4 GHz va 5.8 GHz diapazonlarda mos ravishda taxminan 88.0 dB, 94.0 dB va 101.7 dB erkin fazodagi yo'qotish kuzatilishini ko'rsatdi. Maqolada tavsiya etiladigan arxitektura sifatida transport vositasida omnidirectional antenna, yer usti stansiyasida yo'naltirilgan antenna, SDR/COFDM tipidagi raqamli uzatish, zarurat bo'lsa relay tuguni va past kechikishli video kodlovchidan iborat sxema taklif qilindi. JCGM 100:2008 asosida bajarilgan noaniqlik tahlili tavsiya etilgan 2.4 GHz tizim uchun aloqa zaxirasining kengaytirilgan noaniqligi taxminan 7.6 dB atrofida bo'lishini ko'rsatdi. Natijalar tog'li hududda ishonchli video aloqa tashkil etishda 5.8 GHz ga nisbatan 1.2/1.3 GHz yoki 2.4 GHz diapazonlari, baland tayanch antenna va relay yondashuvi afzal ekanini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: avtonom transport vositasi, video transmitter, video receiver, SDR, COFDM, tog'li hudud, relyef yo'qotishi, Fresnel zonasi, link budget, noaniqlik tahlili

1. Kirish

Avtonom transport vositalari, masofadan monitoring qilinadigan robot platformalar va yerusti mobil tizimlarda video oqimni past kechikishli video uzatish vazifasi boshqaruv, xavfsizlik va diagnostika nuqtai nazaridan muhim ahamiyatga ega. Bunday tizimlarda operator yoki yuqori darajadagi boshqaruv moduli atrof-muhit haqidagi vizual axborotni barqaror qabul qilishi kerak. Biroq tog'li va notekis relyef sharoitida aloqa sifati faqat uzatish masofasiga emas, balki ko'rish chizig'ining mavjudligi, difraksiya, qaytishlar va soyalanishga ham kuchli bog'liq bo'ladi [1], [4].

ITU-R P.526 tavsiyasiga ko'ra, agar to'siq birinchi Fresnel zonasiga kirib qolsa, difraksiya yo'qotishlari tez ortadi va aloqa kanali keskin beqarorlashadi [1]. Shu sababli 500 m masofa o'z-o'zidan murakkab bo'lmasa-da, ushbu yo'lning o'rtasida yoki yonida yirik relyef elementlari mavjud bo'lsa, yuqori chastotali video uzatish tizimlari amalda zaiflashadi. Yaqinda uneven terrain bo'yicha o'tkazilgan tajribalar ham pastroq diapazonlar, ayniqsa 900 MHz va 2.4 GHz, notekis muhitlarda yuqoriroq chastotalarga nisbatan barqarorroq ekanini ko'rsatdi [4].

Mazkur maqolaning maqsadi - tog'li hududda 500 m masofada ishlovchi avtonom transport vositasi uchun video transmitter va receiver tizimini ilmiy asosda tanlash, hisoblash va tavsiya etishdir. Bunda uchta asosiy savol yechiladi: birinchidan, qaysi diapazon relyefga nisbatan samaraliroq; ikkinchidan, mavjud tayyor qurilmalardan qaysi biri amaliy jihatdan mos; uchinchidan, loyiha darajasida link budget noaniqligi qanday baholanadi.

2. Materiallar va metodlar

Tadqiqotda nazariy va amaliy manbalar birlashtirildi. Nazariy qismda erkin fazodagi yo'qotish va Fresnel zonasi bo'yicha klassik formulalardan foydalanildi. Erkin fazodagi yo'qotish quyidagicha

hisoblandi: PL_FS(dB) = 32.44 + 20log10(f_MHz) + 20log10(d_km). Birinchi Fresnel zonasi radiusi esa r1 = 17.32 * sqrt(d1*d2 / (f_GHz * D)) ko'rinishida qo'llanildi; bu yerda d1 va d2 - uzatkich va qabul qilgichdan to'siqqacha bo'lgan masofalar, D - umumiy masofa [1].

Amaliy qismda ishlab chiqaruvchilarning rasmiy texnik spetsifikatsiyalari asosida beshta qurilma guruhi taqqoslandi: DTC SOL8SDR-H2, Mobilicom MCU-30, DJI SDR Transmission, Accsoon CineView 2 SDI va Hollyland Cosmo C1 [5]-[9]. Bunda aloqa turi, nominal masofa, kechikish, ko'p tugunli ishlash imkoniyati va murakkab relyefga mosligi mezon sifatida olindi.

Noaniqlik tahlili JCGM 100:2008 tamoyillari asosida tavsiya etiladigan 2.4 GHz tizim uchun tuzildi [2]. Measurand sifatida aloqa zaxirasi, ya'ni link margin tanlandi: M = P_tx + G_tx + G_rx - L_c - PL_FS - L_terr - S_rx. Bu yerda P_tx - uzatgich quvvati, G_tx va G_rx - antennalar kuchaytirishi, L_c - kabel va ulanish yo'qotishi, L_terr - relyef bilan bog'liq ortiqcha yo'qotish, S_rx - receiver sezgirligi. Mazkur qiymatlar loyiha bosqichida ishlab chiqaruvchi ma'lumotlari va muhandislik taxminlari asosida baholandi; demak, noaniqlik jadvali metrologik kalibrlash emas, balki dizayn qarori uchun xizmat qiladigan hisobiy model hisoblanadi.

3. Natijalar va muhokama

3.1. Nomzod texnologiyalarni taqqoslash

1-jadval. Video transmitter/receiver yechimlarining funksional taqqoslanishi.

Qurilma	Aloqa turi	Nominal masofa	Kechikish	Topologiya	Tog'li hududga moslik
DTC SOL8SDR-H2	SDR/COFDM, IP mesh	>1.5 km NLOS, >15 km A2G	<180 ms video	P2P, mesh, relay	Yuqori
Mobilicom MCU-30	SDR mobile mesh	15 km omni, 20-30 km directional	15 ms	Ad-hoc, mesh, relay	Yuqori
DJI SDR Transmission	SDR + Wi-Fi	2-3 km	35-80 ms	Asosan P2P	O'rta
Accsoon CineView 2 SDI	2.4 + 5 GHz dual-band	450 m LOS	<50 ms	P2P	Past
Hollyland Cosmo C1	5.1-5.8 GHz	305 m LOS	40 ms	P2P	Past

1-jadvaldan ko'rinadiki, kinoprodakshn va monitoring uchun mo'ljallangan Accsoon hamda Hollyland tipidagi tizimlar ochiq ko'rish chizig'i bo'lgan, qisqa yoki o'rta masofali ssenariylar uchun qulay. Biroq ishlab chiqaruvchi ko'rsatmalarining o'zida ham ularning masofa tavsifi line-of-sight sharoitiga bog'langan [8], [9]. Shu bois tog'li hududdagi avtonom vosita uchun ular yakuniy yechim emas, balki laboratoriya yoki qisqa maydon sinovlari uchun mos deb qaraladi.

Aksincha, DTC SOL8SDR-H2 va Mobilicom MCU-30 tizimlari SDR, mesh va relay mexanizmlarini qo'llab-quvvatlaydi, shuningdek NLOS yoki qisman soyalanishli muhitlarda ishlash uchun mo'ljallangan [5], [6]. DJI SDR Transmission esa sanoat darajasidagi mesh tizimi bo'lmasa-da, 2.4 va 5.8 GHz diapazonlarida kuchliroq barqarorlik, 20 Mbit/s gacha oqim va nisbatan kichik kechikish bilan prototiplash uchun qulay oraliq variant sanaladi [7].

3.2. 500 m kanal uchun nazariy hisob-kitoblar

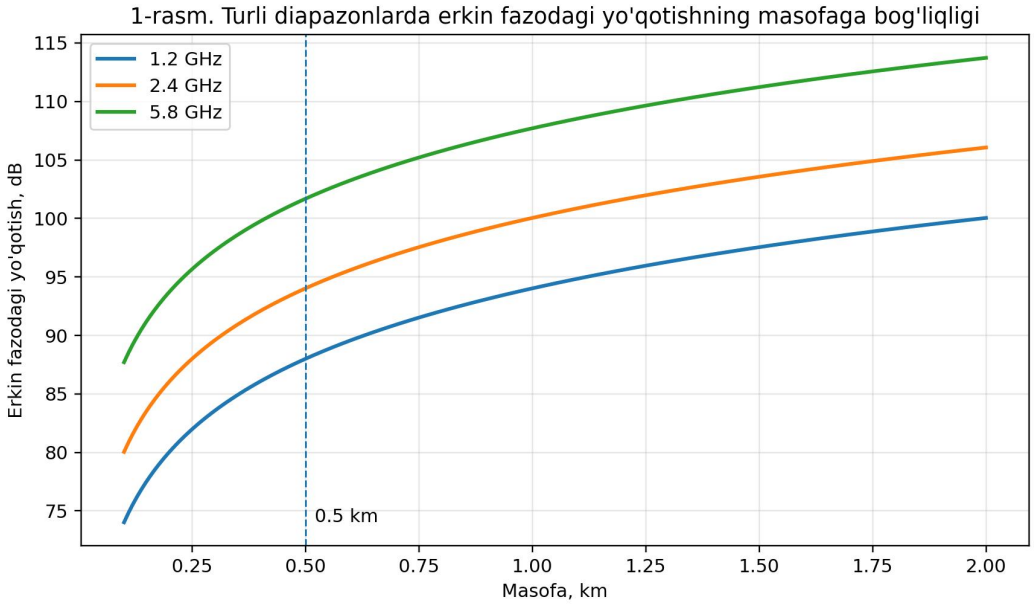
2-jadval. 500 m masofa uchun nazariy radioaloqa ko'rsatkichlari.

Diapazon	PL_FS, dB	1-Fresnel radiusi, m	Asosiy afzallik	Asosiy cheklov
1.2/1.3 GHz	88.0	5.59	Past yo'qotish, relyefga bardoshli	Regulyator ruxsati va apparatura tanqisligi
2.4 GHz	94.0	3.95	Muvozanatli yechim, apparatura ko'p	Shovqinli sanoat muhitida band bo'lishi mumkin
5.8 GHz	101.7	2.54	Yuqori o'tkazuvchanlik	Relyef va NLOS ga sezgir

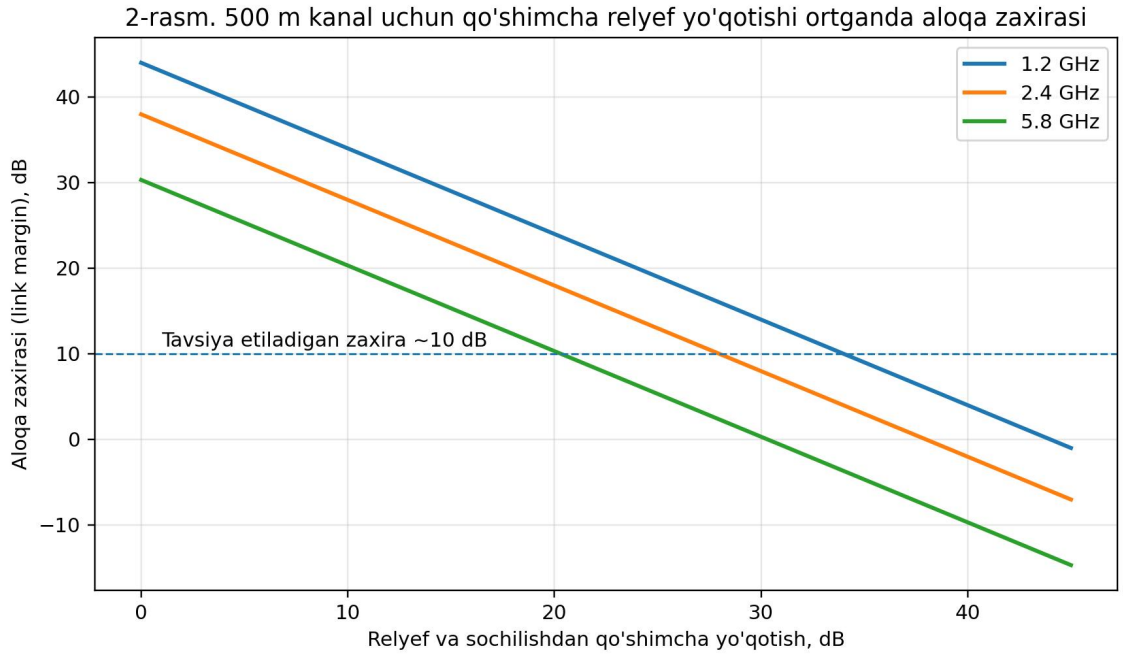
2-jadval shuni ko'rsatadiki, 500 m masofaning o'zida 1.2/1.3 GHz va 2.4 GHz diapazonlari 5.8 GHz ga nisbatan kamroq yo'qotishga ega. Masalan, 5.8 GHz da erkin fazodagi yo'qotish 2.4 GHz ga nisbatan qariyb 7.7 dB ga katta. Bu raqam amalda juda muhim: ayni shu 7-8 dB tog'li hududda antennani bir necha metr balandroq qo'yish, kuchliroq yo'naltirilgan antenna ishlatish yoki umuman relay tugun qo'shish zaruriyatini belgilab beradi.

Fresnel zonasi jihatidan 5.8 GHz ning markaziy radiusi kichikroq ko'rinsa-da, bu uni avtomatik ravishda afzal qilmaydi. Sababi yuqori chastotada difraksiya zaiflashadi va to'siq ortida energiya tiklanishi sustlashadi. Shuning uchun murakkab relyef uchun tizim tanlashda faqat Fresnel radiusi emas, balki umumiy link budget va ortiqcha relyef yo'qotishi ham birgalikda baholanishi kerak [1], [4].

1-rasm. Turli diapazonlarda erkin fazodagi yo'qotishning masofaga bog'liqligi



1-rasm. Turli diapazonlarda erkin fazodagi yo'qotishning masofaga bog'liqligi. Muallif hisob-kitobi.

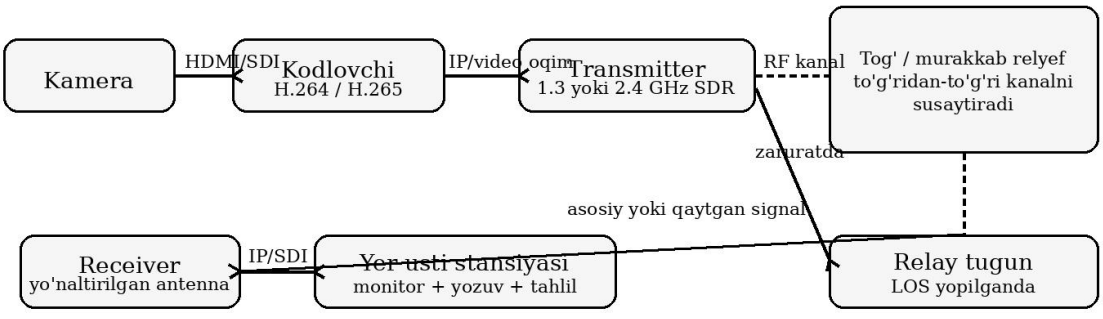


2-rasm. 500 m kanal uchun qo'shimcha relyef yo'qotishi ortganda aloqa zaxirasi. Muallif hisob-kitobi.

2-rasmda 500 m kanal uchun 30 dBm uzatish quvvati, transport vositasida 2 dBi omnidirectional antenna, yer ustida 12 dBi yo'naltirilgan antenna, 2 dB kabel yo'qotishi va -90 dBm receiver sezgirligi qabul qilingan holda aloqa zaxirasi tasvirlandi. Ko'rinib turibdiki, relyef sababli ortiqcha yo'qotish oshgani sari 5.8 GHz diapazonida aloqa zaxirasi kritik qiymatga yaqinlashadi. 2.4 GHz oraliq yechim beradi, 1.2/1.3 GHz esa eng katta zaxirani saqlaydi.

Shu bilan birga, agar 200 m balandlikdagi tog' yoki qoya to'g'ridan-to'g'ri ko'rish chizig'ini mutlaqo to'sib qo'ysa, yuqoridagi zaxiralar ham yetarli bo'lmasligi mumkin. Bunday ssenariyda bir bosqichli aloqa kanali o'rniga relay tuguni, dron-repeater, baland mast yoki yonbag'irning boshqa nuqtasiga ko'chirilgan yer usti stansiyasi talab etiladi. Demak, mazkur masalada asosiy muammo 'qanchaga uzatadi?' emas, balki 'qaysi geometriyada va qaysi topologiyada uzatadi?' degan savoldir.

3.3. Tavsiya etiladigan tizim arxitekturasi



Izoh: agar ko'rish chizig'i to'silsa, baland mast yoki relay tavsiya etiladi.

3-rasm. Tavsiya etiladigan video uzatish-qabul qilish tizimi arxitekturasi. Muallif ishlanmasi.

3-rasmda tavsiya etilayotgan arxitektura ko'rsatilgan. Unda transport vositasiga o'rnatilgan kameradan olinadigan video oqim, past kechikishli kodlovchi orqali radio uzatkichga yuboriladi. Avtomobil tomondagi antenna omnidirectional bo'lgani ma'qul, chunki vosita doimiy ravishda burilishi yoki yo'nalishini o'zgartirishi mumkin. Yer usti stansiyasida esa patch, sector yoki Yagi turidagi

yo'naltirilgan antenna ishlatilsa, qabul zaxirasi sezilarli ortadi. Agar relyef kanalni qisman yoki to'liq yopsa, oraliq relay tuguni aloqa uzluksizligini ta'minlaydi [5], [6].

3-jadval. Tavsiya etiladigan apparat arxitekturasining asosiy elementlari.

Tizim elementi	Tavsiya	Izoh
Kamera	1080p/60, HDMI yoki SDI chiqishli	Nazorat va keyingi AI tahlil uchun yetarli sifat
Kodlovchi	H.264/H.265, 8-20 Mbit/s	Past kechikishli uzatish uchun
Transport vositasi antennasi	2-5 dBi omni	Harakatlanuvchi platforma uchun qulay
Yer usti antennasi	10-14 dBi patch/Yagi	Link budgetni oshiradi
Aloqa diapazoni	1.2/1.3 GHz yoki 2.4 GHz	Tog'li hudud uchun afzal
Topologiya	P2P + relay imkoniyati	LOS yopilganda muhim
Tayanch balandligi	Kamida 6-12 m mast	Fresnel zonasini ochish uchun

Maqolada ko'rib chiqilgan ssenariy uchun yakuniy tavsiya quyidagicha ifodalanadi: agar loyiha professional va dala sharoitida barqaror ishlashi shart bo'lsa, SDR/COFDM asosidagi DTC yoki Mobilicom sinfidagi qurilmalar tanlanishi kerak [5], [6]. Agar esa maqsad tezkor prototiplash bo'lsa va to'g'ridan-to'g'ri ko'rish chizig'i asosan saqlansa, DJI SDR Transmission amaliy nuqtai nazardan maqbul variant hisoblanadi [7].

3.4. Link budget noaniqligi tahlili

Noaniqlik tahlili 2.4 GHz diapazonidagi tavsiya etilgan tizim uchun bajarildi. Bu yerda noaniqlikning asosiy manbalari uzatkich quvvati toleransi, antennalar kuchaytirishi, kabel yo'qotishi, receiver sezgirligi, antennani yo'naltirish xatolari, ko'p yo'llilik va relyef modeli soddalashtirishidan iborat. JCGM 100:2008 ga muvofiq standart noaniqliklar kvadratik qo'shish orqali birlashtirildi [2].

4-jadval. Tavsiya etiladigan 2.4 GHz tizim uchun link budget noaniqligi.

Manba	Standart noaniqlik u_i, dB	Izoh
Transmitter chiqish quvvati	0.6	Datasheet va ish rejimi tarqalishi
Tx antenna gain	0.3	Antenna pasporti asosidagi taxmin
Rx antenna gain	0.3	Yo'naltirilgan antenna uchun taxmin
Kabel va ulagich yo'qotishi	0.2	Montaj sifati va konektorlar
Receiver sezgirligi	0.5	Ish rejimiga bog'liq o'zgarish
Yo'naltirish va hizalash	0.8	Antenna burchagi xatosi
Ko'p yo'llilik va soyalanish	3.0	Murakkab relyefdagi asosiy manba
Relyef modeli soddalashtiruvi	2.0	Hisobiy modelning ideal emasligi
Birlashtirilgan standart noaniqlik u_c	3.8	Kvadratik yig'indi
Kengaytirilgan noaniqlik U,	7.6	Taxminan 95% ishonch oralig'i

Manba	Standart noaniqlik u_i, dB	Izoh
k=2		

4-jadvaldagi natijalar shuni ko'rsatadiki, loyiha bosqichida eng katta noaniqlik manbasi elektron bloklar emas, balki tashqi muhitdir. Ya'ni transmitter yoki receiverning laboratoriya parametrlari nisbatan barqaror bo'lsa-da, tog'li hududdagi ko'p yo'llilik va relyef sababli yuzaga keladigan ortiqcha yo'qotishlar tizimning yakuniy ishonchliligini belgilaydi. Shu sababli dala sinovlari, profil bo'yicha nuqtaviy o'lchash, antenna balandligini optimallashtirish va zaxira relay nuqtalarini rejalashtirish talab etiladi.

Bu yerda keltirilgan noaniqlik jadvali dastlabki loyiha uchun mo'ljallangan. Agar tizim keyinchalik tajribaviy sinovlardan o'tkazilsa, ushbu jadvalga real o'lchangan RSSI, SNR, PER va video kechikishi dispersiyasi asosida tuzatishlar kiritilishi tavsiya etiladi. Bunday yondashuv maqolani amaliy prototipdan sertifikatlashga yaqin bosqichga olib chiqadi.

4. Xulosa

Tadqiqot natijalariga ko'ra, tog'li hududda 500 m masofada avtonom transport vositasidan video oqimini ishonchli qabul qilish va uzatish vazifasi uchun masofa emas, balki relyef va ko'rish chizig'i geometriyasi hal qiluvchi omil hisoblanadi. Nazariy hisob-kitoblar 1.2/1.3 GHz va 2.4 GHz diapazonlari 5.8 GHz ga nisbatan kamroq erkin fazodagi yo'qotishga ega ekanini va qo'shimcha relyef yo'qotishlariga nisbatan yaxshiroq zaxira saqlashini ko'rsatdi.

Amaliy qurilmalar orasida DTC SOL8SDR-H2 va Mobilicom MCU-30 tog'li hamda qisman NLOS muhitlar uchun eng maqbul professional yechim sifatida baholandi. DJI SDR Transmission tezkor prototiplash uchun ma'qul oraliq variant bo'lsa-da, relyef to'liq to'suvchi ssenariylarda relay yoki baland tayanchsiz yetarli bo'lmasligi mumkin. Accsoon va Hollyland turidagi yechimlar esa asosan line-of-sight monitoring tizimlari bo'lib, murakkab relyef uchun ehtiyotkorlik bilan qo'llanishi kerak.

Noaniqlik tahlili tavsiya etilgan 2.4 GHz tizim uchun link budgetning kengaytirilgan noaniqligi taxminan 7.6 dB ekanini ko'rsatdi. Bu qiymat muhandislik amaliyotida kamida 10 dB aloqa zaxirasini saqlash, antenna balandligini oshirish va zarur bo'lsa relay tugunini qo'shish kerakligini anglatadi. Kelgusida ushbu modelni dala sharoitida o'lchangan RSSI, SNR va video kechikishi bo'yicha verifikatsiya qilish, shuningdek, aniq topografik profil asosida P.526 va boshqa deterministik modellarga tayangan holda yanada aniqroq optimallashtirish maqsadga muvofiqdir.

Adabiyotlar ro'yxati

1. ITU-R P.526-16, Propagation by diffraction, International Telecommunication Union, 2025.
2. JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.
3. N. Moraitis, P. Constantinou va boshq., "A Survey of Path Loss Prediction and Channel Models for Unmanned Aerial Systems for System-Level Simulations," Sensors, vol. 23, no. 10, 2023.
4. Q. P. Soo, Y. Y. Lim, T. B. O. Lee va boshq., "Radio propagation modeling and measurement of uneven terrain model," Scientific Reports, vol. 15, 2025.
5. DTC, SOL8SDR-H2 Datasheet, Codan Communications, 2021.
6. Mobilicom, MCU-30 Cybersecure Mesh Solution for Robotics and Unmanned Systems, datasheet, 2025.
7. DJI, "DJI SDR Transmission - Specifications," rasmiy texnik sahifa, murojaat sanasi: 16.03.2026.
8. Accsoon, "CineView 2 SDI Specifications," rasmiy mahsulot sahifasi, murojaat sanasi: 16.03.2026.
9. Hollyland, "Cosmo C1 Specifications," rasmiy mahsulot sahifasi, murojaat sanasi: 16.03.2026.
10. T. Liu, M. Ye, F. Wu va boshq., "Advanced Video Processing and Data Transmission Technology for Unmanned Ground Vehicles in the Internet of Battlefield Things," Computers, Materials & Continua, vol. 86, no. 3, 2026.