DOI: 10.65322/j.srd.05192026.30

OCHIQ SUV OBYEKTLARIDA SIMSIZ SENSOR TARMOQLARINING RADIOALOQA SIFATINI BAHOLASH MODELI

Raximov J.N.,
E-mail: jamshidjon6gd@gmail.com
Toshkent davlat texnika universiteti

Annotatsiya. *Ushbu maqolada ochiq suv obyektlari sharoitida LoRa asosidagi simsiz sensor tuguni bilan shlyuz o‘rtasidagi radioaloqa sifatini baholash modeli taklif etiladi. Modelda antenna balandligiga bog‘liq ikki qiyalikli signal tarqalish yo‘qotilishi, aloqa kanalining ishonchlilik zaxirasi, paket yo‘qotilishi, kechikish va energiya sarfi o‘zaro bog‘liq holda hisobga olinadi. Hozircha real maydon tajribalari o‘tkazilmagani sababli model suv sirtidan qaytishni hisobga oluvchi ikki nurli fizik model asosidagi Monte-Karlo simulyatsiyasi yordamida tekshirildi. Natijalarga ko‘ra, bir qiyalikli log-distance modelida RMSE 2,0–3,7 dB ni tashkil etgan bo‘lsa, ikki qiyalikli modelda bu ko‘rsatkich 0,5–0,9 dB gacha kamaydi (ΔAIC = 65–87). Olingan natijalar simulyatsiyaga asoslangan bo‘lib, maqolada modelni keyinchalik real sharoitda validatsiya qilish metodikasi ham keltirilgan.*

Аннотация. *В статье предложена модель оценки качества радиосвязи между беспроводным сенсорным узлом на базе LoRa и шлюзом, размещёнными над открытым водным объектом. Модель учитывает зависимые от высоты антенны двухсклоновые потери распространения сигнала и объединяет оценку запаса надёжности канала, потерь пакетов, задержки и энергопотребления. Поскольку натурные эксперименты пока не проводились, модель проверена методом Монте-Карло с использованием физической двухлучевой модели распространения, учитывающей отражение от водной поверхности. Для односклоновой логарифмической модели расстояния RMSE составила 2,0–3,7 дБ, тогда как двухсклоновая модель снизила ошибку до 0,5–0,9 дБ (ΔAIC = 65–87). Полученные результаты основаны на моделировании; также приведена методика последующей валидации модели в реальных условиях.*

Abstract: This paper proposes a model for assessing radio-link quality between a LoRa-based wireless sensor node and a gateway deployed over an open-water environment. The model accounts for antenna-height-dependent dual-slope propagation loss and jointly considers link margin, packet loss, latency, and energy consumption. Because field measurements have not yet been conducted, the model was evaluated through Monte Carlo simulation using a physical two-ray propagation model that includes reflection from the water surface. The single-slope log-distance model produced an RMSE of 2.0–3.7 dB, whereas the dual-slope model reduced the error to 0.5–0.9 dB (ΔAIC = 65–87). The reported results are simulation-based, and a methodology for subsequent field validation is also presented.

Kalit so‘zlar: *simsiz sensor tarmog‘i, radioaloqa sifati, ochiq suv obyekti, LoRa, RSSI, SNR, paket yo‘qotilishi, signal tarqalish yo‘qotilishi, ikki nurli model, signal tarqalishi.*

Ключевые слова. *беспроводная сенсорная сеть, качество радиосвязи, открытый водный объект, LoRa, RSSI, SNR, потери пакетов, потери распространения сигнала, двухлучевая модель, распространение сигнала.*

Keywords. *wireless sensor network, radio-link quality, open-water environment, LoRa, RSSI, SNR, packet loss, propagation loss, two-ray model, signal propagation.*

Kirish. Ochiq suv obyektlari – ko‘l, daryo, suv ombori, kanal va qirg‘oq hududlari – holatini uzluksiz hamda masofadan kuzatish zarurati simsiz sensor tarmoqlariga asoslangan monitoring tizimlariga bo‘lgan qiziqishni oshirmoqda. Bunday tizimlarda suv yuzasida yoki qirg‘oqda joylashtirilgan sensor tugunlari o‘lchangan ma’lumotlarni radiokanal orqali markaziy

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.30

shlyuzga uzatadi. Suzuvchi platformalarga asoslangan simsiz sensor tarmoqlaridan katta suv maydonlarida suv sifatini monitoring qilish uchun foydalanish mumkinligi, shuningdek, bunday tizimlarning shamol va to‘lqin kabi tashqi ta’sirlarga bardosh bera olishi ko‘rsatilgan [1]. Suv sifatini monitoring qilishga mo‘ljallangan simsiz sensor tarmoqlari bo‘yicha sharhlarda esa energiya tejamkorligi, ma’lumot uzatish tezligi, qamrov masofasi, real vaqt rejimida ishlash, narx va ishonchlilik kabi mezonlar nuqtayi nazaridan past quvvatli keng hududli tarmoqlarning afzalliklari qayd etilgan [2, 3].

LPWAN texnologiyalari orasida LoRa va LoRaWAN uzoq masofaga aloqa o‘rnatishi, kam energiya sarflashi va tarmoq tuzilmasining nisbatan sodda ekanligi sababli suv monitoringi tizimlarida keng qo‘llanmoqda. LoRa texnologiyasi chirp spread spectrum modulyatsiyasiga asoslanadi; paketning efirda bo‘lish vaqti va energiya sarfi, asosan, spektrni yoyish koeffitsiyenti hamda o‘tkazish polosasi bilan belgilanadi [4]. Daryo suvini monitoring qilish uchun ishlab chiqilgan LoRa tizimida RSSI, SNR va paket xatoliklari ulushi real vaqt rejimida kuzatilgan [4].

Shunga qaramay, suv monitoringiga bag‘ishlangan ko‘plab ishlarda radioaloqa kanalining o‘zi yetarli darajada miqdoriy modellashtirilmagan. Masalan, suzuvchi platformaga asoslangan tizimda tugunlar o‘rtasidagi aloqa 50 m masofada tashkil etilgan, biroq RSSI, SNR, paket yo‘qotilishi va signal tarqalish yo‘qotilishi bo‘yicha batafsil natijalar berilmagan [1]. Daryo sharoitida o‘tkazilgan LoRa tajribasida o‘rtacha RSSI −94 dBm va SNR 7,33 dB qayd etilgan, ammo masofa bo‘yicha o‘lchashlar, tarqalish modeli hamda paket yo‘qotilishining masofaga bog‘liqligi keltirilmagan [4]. Sharh tadqiqotlarida ham turli muhitlarda signal tarqalishi ko‘rsatkichlari yetarlicha yoritilmagani, ko‘p tugunli tajribalar kamligi va LoRa, Sigfox kabi texnologiyalar uchun energiya sarfining tahliliy modellari yetishmasligi ta’kidlangan [3].

Suv yuzasi ustida LoRa signalining tarqalishini o‘rgangan alohida tadqiqotlar ham mavjud. Dengiz ustida kamida 22 km masofada LoRa aloqasi amalga oshirilgani va RSSI hamda SNR ni o‘lchash zanjirining ayrim cheklovlari aniqlangani ko‘rsatilgan. Daryo sharoitida past antenna balandliklarida tarqalish yo‘qotishlari o‘lchangan. Estuariy hududida suv sathining o‘zgarishini hisobga oluvchi ikki nurli model taklif etilgan. Dengiz buylari uchun esa past balandlikdagi antennalarda Yerning sferik modeli yetarli aniqlik bermasligi qayd etilgan. Ushbu ishlarning har biri radioaloqa jarayonining muayyan jihatini yoritadi, biroq ularni yagona baholash zanjiriga birlashtirish masalasi ochiq qolmoqda.

Tahlil qilingan manbalar doirasida RSSI → SNR → paket yo‘qotilishi → kechikish → energiya zanjirini masofa va antenna balandligi bilan bog‘lab, yagona model ko‘rinishida ifodalagan tadqiqot uchramadi. Shuningdek, past antenna balandliklarida bir qiyalikli log-distance modelining sistematik xatosini miqdoriy baholash va o‘tish masofasi dc ni ikki nurli modelni qo‘llash mezoni sifatida ishlatish masalalari yetarlicha yoritilmagan. Mazkur xulosa ushbu maqolada ko‘rib chiqilgan manbalar bilan cheklanadi; kelgusida yanada keng qamrovli tizimli adabiyotlar tahlili o‘tkazilishi maqsadga muvofiq.

Shu sababli ushbu ishning maqsadi ochiq suv obyektlarida LoRa asosidagi sensor tuguni va shlyuz o‘rtasidagi radioaloqa sifatini masofa, antenna balandligi hamda uzatish quvvatiga bog‘liq holda baholash imkonini beruvchi matematik modelni ishlab chiqish, uni simulyatsiya orqali tekshirish va keyingi real tajribalar uchun validatsiya metodikasini shakllantirishdan iborat.

Taklif etilayotgan yondashuvda antenna balandligiga bog‘liq o‘tish masofasi ikki qiyalikli signal tarqalish yo‘qotilishi modeli bilan bog‘lanadi. Ushbu model LoRa uchun SNR zaxirasi orqali paket yo‘qotilishi, kechikish va energiya sarfi bilan yagona hisoblash zanjiriga birlashtiriladi. Bundan tashqari, $dc = 4\pi ht \cdot hr/\lambda$ ifodasi ikki nurli yondashuvni qo‘llash uchun amaliy mezon sifatida qaraladi va bir qiyalikli modelning sistematik xatosi miqdoriy baholanadi.

Asosiy faraz shundan iboratki, ochiq suv yuzasida va past antenna balandliklarida ikki qiyalikli tarqalish modeli RSSI ni bir qiyalikli empirik modelga qaraganda aniqroq ifodalaydi.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.30

Buni RMSE va AIC mezonlari orqali baholash mumkin. Paket yo‘qotilishi esa SNR zaxirasi va Q-funksiya yordamida tavsiflanadi.

Maqolaning keyingi qismlarida avvalo mavzuga oid tadqiqotlar tahlil qilinadi, so‘ng taklif etilgan model va simulyatsiya metodikasi bayon etiladi.

Adabiyotlar tahliliıo Ko‘rib chiqilgan adabiyotlarni shartli ravishda to‘rt guruhga ajratish mumkin: suv monitoringi tizimlari, LoRa asosidagi suv monitoringi, suv yuzasi ustida radio signal tarqalishini o‘lchashga bag‘ishlangan ishlar va tarqalish modellari. 1-jadvalda tahlil qilingan manbalarning asosiy xususiyatlari qiyosiy tarzda keltirilgan.

Suv monitoringi tizimlariga bag‘ishlangan tadqiqotlarda, odatda, suzuvchi platformaning barqaror ishlashi va energiya ta’minotiga asosiy e’tibor qaratiladi. Masalan, faol rejimda 550 mA, uyqu rejimida 15 mA iste’mol qiluvchi va 30 daqiqalik siklda ishlaydigan tizim uchun quyosh panelidan foydalanish ko‘rib chiqildi. Antennasiz uzatgich tanlovi esa suv va shamol ta’sirini kamaytirish bilan izohlangan. Energiya sarfi $ETX(s,d) = s \cdot Te + s \cdot d\varphi \cdot Ta$ ko‘rinishida modellashtirilgan ($\varphi = 2–4$). Bunday ishlar radio kanalning batafsil modelidan ko‘ra, tizim arxitekturasi va texnologiya tanlash mezonlarini ko‘proq yoritadi.

SX1276 asosidagi tugun va shlyuzdan foydalangan tadqiqotda Node-RED orqali RSSI, SNR, paketlar soni va PER ko‘rsatkichlari kuzatilgan, shuningdek LoRa uchun vaqt va energiya parametrlarini hisoblash formulalari (Tsym, ToA) berilgan. Biroq tajriba bitta muhitda va nisbatan qisqa vaqt – taxminan to‘rt soat davomida o‘tkazilgan. Bundan tashqari, masofa o‘zgarishiga bog‘liq natijalar keltirilmagan.

Dengiz ustidagi LoRa aloqasi bo‘yicha tajribada har bir sinovda 20 000 ta paketdan foydalanilib, uzoq masofali aloqa imkoniyati va RSSI/SNR o‘lchash zanjirining to‘yinish chegarasi ko‘rsatilgan. Daryo ustida 0,5 va 1 m antenna balandliklarida, 10–130 m masofada o‘tkazilgan o‘lchovlarda lognormal taqsimot va o‘simliklarning signalga ta’siri aniqlangan. Estuariy sharoitida ikki nurli model suv sathi o‘zgarishiga moslashtirilib, qariyb 745 m LOS aloqada RSSI 10 dB dan ortiq o‘zgarishi qayd etilgan. Past antenna balandliklarida esa Yerning sferik modeliga nisbatan ITU-R P.2001-3 va Bullington yondashuvlari ma’qulroq ekani ko‘rsatilgan.

1-jadval

Tahlil qilingan manbalarning qiyosiy xarakteristikasi

Manba	Muhit	Texnologiya, chastota	Geometriya	Asosiy natija	Cheklov
1	Katta suv maydoni	ZigBee tugun→sink 50 m, GSM	–	95 km/soat shamolda 24 soat ishlagan; sensor R^2 0,9731	Radio ko‘rsatkichlar yo‘q
2	Daryo	LoRa, SX1276	Tugun suv chizig‘ida, shlyuz ≈10 m	RSSI o‘rt. −94 dBm; SNR o‘rt. 7,33 dB; shahar NLOS da maks. 2,53 km	Masofa skaneri, Signal tarqalish yo‘qotilishi, PLR–masofa yo‘q
3	Dengiz	LoRa 868 va 434 MHz; SF7/10/12; BW 125 kHz	LOS	Kamida 22 km; RSSI chiziqli to‘g‘ri −50 dBm gacha; SNR zanjiri RSS > −100 dBm da to‘yinadi	Signal tarqalish yo‘qotilishi modeli markazda emas

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.30

4	Daryo, o‘simlik	LoRa 915 MHz; SF7; BW 125 kHz; 20 dBm	h = 0,5 va 1 m; d = 10–130 m	Lognormal taqsimot; o‘simlik ustidagi suvda sezilarli susayish	Bitta daryo; ikki balandlik
5	Estuariy	LoRa 868 MHz; SF12; BW 500 kHz; 14 dBm	Shlyuz ≈3,2 m; tugun 0,5 va 1,5 m; d ≈740–750 m	RSSI o‘zgarishi >10 dB; PDR ≈100%, RSSI ≈−94 dBm dan pastda tushadi	Bitta joy; sochilish va to‘lqin hisobga olinmagan
6	Ochiq dengiz	LoRa va boshqa LPWAN	Tx 0,35 m; baza 2,65 va 5,2 m	Yerning sferik modeli modeli yetarli emas; ITU-R P.2001-3	Tafsilotlar to‘liq tekshirilmagan

Adabiyotlar tahlili bir nechta muhim bo‘shliqlarni ko‘rsatadi. Birinchidan, tizim darajasidagi ishlarning ko‘pchiligida radio kanalning alohida modeli berilmaydi. Ikkinchidan, tarqalishga oid tadqiqotlar ko‘pincha faqat bitta ko‘rsatkich – signal tarqalish yo‘qotilishi yoki RSSI – bilan cheklanadi va uni paket yo‘qotilishi, kechikish hamda energiya sarfi bilan bog‘lamaydi. Uchinchidan, antenna balandligining ta’siri o‘rganilgan bo‘lsa-da, o‘tish masofasini umumlashtirilgan qo‘llash mezoni sifatida ishlatish yetarlicha asoslanmagan. Nihoyat, RSSI va SNR o‘lchash zanjiridagi xatoliklar validatsiya natijalariga ta’sir qilishi mumkin. Mazkur kamchiliklar ushbu tadqiqotning asosiy yo‘nalishini belgilaydi.

Metodologiya. Tadqiqot obyekti - ochiq suv obyekti ustida ishlaydigan LoRa texnologiyasi asosidagi simsiz sensor tarmog‘ida sensor tuguni bilan markaziy shlyuz o‘rtasidagi radioaloqa kanali hisoblanadi. Tarmoq “yulduz” topologiyasida tashkil etilgan bo’lib: sensor, mikrokontroller, LoRa radiomoduli va energiya manbaidan iborat tugun ma’lumot paketlarini shlyuzga uzatadi, shlyuz esa ularni tarmoq serveriga yuboradi. Bunday arxitektura amaldagi suv monitoringi tizimlariga mos keladi. Tadqiqot predmeti radioaloqa sifati ko‘rsatkichlarining masofa, antenna balandligi va uzatish quvvatiga bog‘liqligi hamda ushbu bog‘lanishni ifodalovchi matematik modeldan iborat.

Friis formulasi erkin fazoda uzatilgan va qabul qilingan quvvatlar nisbatini ifodalaydi:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2, \qquad FSPL(d) = 20\log_{10}\frac{4\pi d}{\lambda} \tag{1}$$

Log-distance modeli empirik yondashuv bo‘lib, undagi signal tarqalish koeffitsiyenti n va soyalash parametri σ tajriba o‘lchovlari asosida aniqlanadi:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\,n\log_{10}\frac{d}{d_0} + X_\sigma \tag{2}$$

Ikki nurli (two-ray) modelda qabul qilgichga yetib keluvchi to‘g‘ridan-to‘g‘ri va suv yuzasidan qaytgan nurlar birgalikda hisobga olinadi:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \left|\frac{e^{-jkd_1}}{d_1} + \Gamma\frac{e^{-jkd_2}}{d_2}\right|^2, \quad d_{1,2} = \sqrt{d^2 + (h_t \mp h_r)^2} \tag{3}$$

Vertikal qutblanish holatida qaytarish koeffitsiyenti Γ Frenel ifodasi orqali aniqlanadi:

$$\Gamma = \frac{\varepsilon_c \sin\psi - \sqrt{\varepsilon_c - \cos^2\psi}}{\varepsilon_c \sin\psi + \sqrt{\varepsilon_c - \cos^2\psi}}, \quad \varepsilon_c = \varepsilon_r - \frac{j\sigma_w}{\omega\varepsilon_0} \tag{4}$$

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.30

Suv sirtining g‘adir-budurligi ρ = exp ko‘paytmasi orqali hisobga olinadi. Γ ≈ −1 va d ≫ ht, hr bo‘lganda qabul quvvati Pr ∝ (ht·hr)²/d⁴ qonuniyatiga yaqinlashadi. Bunday holat uchun kritik o‘tish masofasi quyidagicha aniqlanadi:

$$d_c = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda} \tag{5}$$

2-jadval

Modellarning ochiq suv sharoitida qo‘llanishi

Model	Afzalligi	Cheklovi	Ochiq suv uchun xulosa
Friis (n = 2)	Oddiy, fizik	Yer/suv aksini hisobga olmaydi	Pastki chegara
Uzoq masofa X_σ	n va σ ni o‘lchovdan oladi	Antenna balandligini ko‘rmaydi, fizik asosi yo‘q	Bazaviy empirik model
Two-ray	Balandlik bog‘liqligini beradi	Silliq sirt, LOS, d > d_c da n≈4; to‘lqin, sochilish va yer egriligi hisobga olinmaydi	Faqat shartli (tinch suv, radio gorizont ichida)

Radio gorizont masofasi taxminan 4,12(√h1+√h2) km ifodasi bilan baholanadi. Masalan, h1 = 1 m va h2 = 3 m bo‘lganda u qariyb 11,3 km, h1 = 2 m va h2 = 5 m bo‘lganda esa 15,0 km ni tashkil etadi. Ushbu chegaradan tashqarida oddiy ikki nurli modeldan foydalanish maqsadga muvofiq emas; past antennalarda Yer egriligi va difraksiyani hisobga oluvchi ITU-R P.2001-3 yoki Bullington kabi modellar talab etiladi.

Taklif etilgan model o‘zaro bog‘langan to‘rtta hisoblash blokidan tashkil topgan.

1-blok. Ikki qiyalikli signal tarqalish yo‘qotilishi modeli.

$$PL(d) = \begin{cases} PL(d_0) + 10\,n_1 \log_{10}\dfrac{d}{d_0} + X_\sigma, & d \le d_c \\ PL(d_0) + 10\,n_1 \log_{10}\dfrac{d_c}{d_0} + 10\,n_2 \log_{10}\dfrac{d}{d_c} + X_\sigma, & d > d_c \end{cases} \tag{6}$$

2-blok. RSSI, shovqin quvvati va SNR ni hisoblash.

$$RSSI = P_t + G_t + G_r - PL(d),$$
$$N = -174 + 10\log_{10} BW + NF, \quad SNR = RSSI - N \tag{7}$$

BW = 125 kHz va NF = 6 dB bo‘lganda shovqin quvvati N = −117,0 dBm ni tashkil etadi.

Qabul qilgich sezgirligi SSF = N + SNRmin(SF) ifodasi orqali aniqlanadi. SF7 dan SF12 gacha SNRmin qiymatlari mos ravishda −7,5; −10; −12,5; −15; −17,5 va −20 dB bo‘lib, ularga mos sezgirlik qiymatlari −124,5; −127,0; −129,5; −132,0; −134,5 va −137,0 dBm ni tashkil etadi.

3-blok. Paket yo‘qotilishi ehtimolini baholash.

$$M = \overline{RSSI} - S_{SF}, \quad PLR_{ch} = Q\left(\frac{M}{\sigma_{tot}}\right),$$
$$PLR = 1 - (1 - PLR_{ch})(1 - p_c), \quad p_c = 1 - e^{-2N_n \lambda_g\, ToA} \tag{8}$$

Bu yerda Q(x) – standart normal taqsimotning to‘ldiruvchi funksiyasi, σtot – umumiy tasodifiy tebranish darajasi, Nn – tarmoqdagi tugunlar soni, λg esa har bir tugunning paket uzatish intensivligini bildiradi.

4-blok. Kechikish va energiya sarfini baholash. LoRa ning vaqt parametrlari [4] asosida quyidagicha aniqlanadi:

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.30

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW}, \quad ToA = (n_{pre} + 4{,}25)T_{sym} + \left(8 + \max\left(\left\lceil \frac{8PL_b - 4SF + 28 + 16CRC - 20H}{4(SF - 2DE)} \right\rceil (CR + 4), 0\right)\right) T_{sym} \quad (9)$$

$$D \approx \frac{ToA}{1 - PLR} + t_{rx}, \qquad E = \frac{P_{tx,el}\, ToA}{1 - PLR} \quad (10)$$

Bu yerda PLb – foydali yukning baytlardagi hajmi, trx esa qabul oynalari bilan bog‘liq kechikish bo‘lib, real tajribada o‘lchanadi. Energiya ifodasi ETX + ERX yondashuviga moslashtirilgan va LoRa uchun efirda bo‘lish vaqti hamda muvaffaqiyatli yetkazilgan paketga nisbatan normallangan. BW = 125 kHz va 20 baytli foydali yuk uchun ToA qiymati SF7 da 56,6 ms, SF9 da 185,3 ms va SF12 da 1318,9 ms ni tashkil etadi.

Real maydon tajribalari hali o‘tkazilmagani sababli modelning ishlash mantiqini tekshirish uchun Monte-Karlo simulyatsiyasidan foydalanildi. Kanal generatori sifatida Frenel qaytarish koeffitsiyenti, suv sirtining g‘adir-budurligi, antenna balandligidagi tebranish va soyalashni hisobga oluvchi fizik ikki nurli model qabul qilindi. Simulyatsiya parametrlari 3-jadvalda keltirilgan. Jadvalda taxminiy deb ko‘rsatilgan qiymatlar adabiyotlardan olinmagan, balki hisoblash sharti sifatida tanlangan.

3-jadval

Simulyatsiya parametrlari

Parametr	*Qiymat*
Chastota	868 MHz (λ = 0,3454 m)
P_t; $G_t = G_r$	14 dBm; 2 dBi
h_t	0,5; 1,0; 2,0 m
h_r	5 m
Suv: ε_r; σ_w	80; 0,01 S/m
Balandlik tebranishi σ_h	0,10 m
Soyalash σ	3 dB
BW; NF; SF; CR	125 kHz; 6 dB; 7 (asosiy), 9, 12; 4/5
Masofalar	45 nuqta, 30–10 000 m (logarifmik qadam)
Paketlar	400 ta har bir masofada

Har bir paket uchun RSSI qiymati kanal generatori yordamida hisoblandi. Agar RSSI ≥ SSF sharti bajarilsa, paket qabul qilingan deb hisoblandi.

Signal tarqalish yo‘qotilishi modeli parametrlari eng kichik kvadratlar usuli bilan baholandi. Model sifatini tekshirish uchun RMSE, determinatsiya koeffitsiyenti R^2 va Akaike axborot mezoni AIC = n·ln(SSE/n) + 2k qo‘llanildi. Amaliy tizimda faqat qabul qilingan paketlar qayd etilishi mumkinligi sababli moslashtirish PLR < 20% bo‘lgan masofalarda bajarildi. Ma’lumotlar 70/30 nisbatda o‘quv va test qismlariga ajratildi. Ikki qiyalikli modelda o‘tish masofasi avval nazariy dc ga teng deb olindi, keyin esa 40–2000 m oralig‘ida panjara qidiruvi yordamida erkin o‘tish nuqtasi topilib, natijalar o‘zaro taqqoslandi. PLR bashorati σtot = 3 dB uchun hisoblanib, simulyatsiyada olingan PLR bilan RMSE bo‘yicha solishtirildi.

Simulyatsiya modelning ichki mantiqiy izchilligini tekshiradi, biroq mustaqil maydon validatsiyasining o‘rnini bosa olmaydi. Shu sababli keyingi bosqich uchun real tajriba metodikasi ishlab chiqildi. Unga ko‘ra: (1) tugun va shlyuz koordinatalari GNSS orqali qayd etiladi; (2) kamida uch xil ht, ikki xil SF va ikki xil Pt qiymatida masofa bo‘yicha o‘lchovlar bajariladi; (3)

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.30

har bir nuqtada kamida 385–457 ta paket uzatiladi (p ≈ 0,1 va 0,05 holatlarida ±3% va ±2% ishonch oralig‘i uchun; p = 0,5 va ±2% uchun 2401 ta paket); (4) shamol, to‘lqin balandligi va suv sathi qayd etiladi; (5) RSSI va SNR o‘lchash zanjirining saturatsiya hamda kalibrlash chegaralari hisobga olinadi [5]; (6) ayni apparat vositalari bilan quruqlikda nazorat o‘lchovi o‘tkaziladi; (7) natijalarni tahlil qilishda OLS, bootstrap ishonch oralig‘i, AIC, logistik regressiya va hold-out validatsiya usullaridan foydalaniladi.

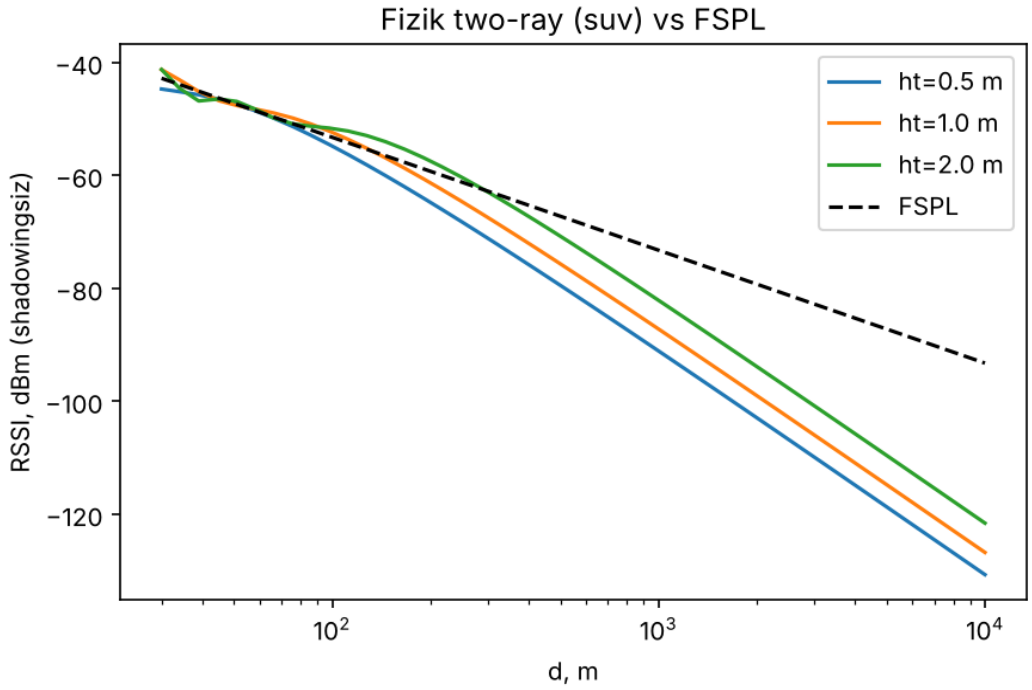
Muhokama va natijalar Quyida keltirilgan barcha sonli natijalar simulyatsiya asosida olingan. Ular tanlangan parametrlar – suv uchun εr = 80, σw = 0,01 S/m, antenna balandligi tebranishi σh = 0,10 m va soyalash 3 dB – ga bog‘liq bo‘lib, real maydon o‘lchovlari sifatida talqin qilinmasligi kerak.

4-jadval

Two-ray bo‘yicha signal tarqalish yo‘qotilishi, dB, va FSPL dan farqi (hr = 5 m, 868 MHz)

d, m	*FSPL*	h_t = *0,5 m*	h_t = *1 m*	h_t = *2 m*
200	77,2	82,7 (+5,5)	79,3 (+2,1)	75,4 (−1,8)
500	85,2	97,4 (+12,2)	93,6 (+8,4)	88,7 (+3,5)
1000	91,2	109,1 (+17,9)	105,2 (+14,0)	100,1 (+8,9)
2000	97,2	120,9 (+23,7)	117,0 (+19,8)	111,8 (+14,6)
4000	103,3	132,8 (+29,5)	128,9 (+25,6)	123,7 (+20,4)

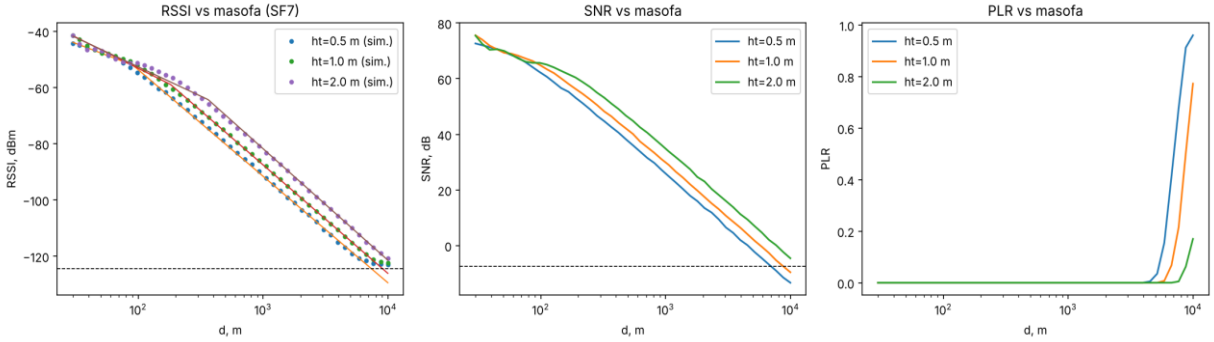
Soyalash va balandlik tebranishlari hisobga olinmagan fizik ikki nurli modelda signal tarqalish yo‘qotilishi erkin fazodagi qiymatdan sezilarli farq qiladi (4-jadval, 1-rasm). ht = 1 m va hr = 5 m bo‘lganda 200 m masofada qo‘shimcha yo‘qotish atigi 2,1 dB ni tashkil etsa, 1000 m da 14,0 dB, 4000 m da esa 25,6 dB gacha oshadi. Antenna balandligi kamaygani sari uzoq masofadagi yo‘qotish tezroq ortadi: 4000 m da ht = 0,5 m uchun FSPL dan farq 29,5 dB, ht = 2 m uchun esa 20,4 dB ni tashkil etadi.



1-rasm. Fizik two-ray (suv) va FSPL bo‘yicha RSSI

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.30

Bu holat ochiq suv yuzasidagi tarqalishning quruqlikdagi odatiy modeldan farq qilishini ko‘rsatadi. Tinch suv sharoitida qaytgan nur dc dan keyin to‘g‘ridan-to‘g‘ri nurga deyarli qarama-qarshi fazada qo‘shiladi va natijada quvvatning masofaga bog‘liqligi d^{-4} qonuniyatiga yaqinlashadi. dc gacha bo‘lgan hududda esa interferensiya sababli yo‘qotish FSPL atrofida tebranadi; masalan, ht = 2 m va d = 200 m bo‘lganda yo‘qotish FSPL dan 1,8 dB kam. Natija suv ustida ikki nurli yondashuvdan foydalanish mantiqiga mos keladi, ammo model to‘lqinlanish va sochilishni hisobga olmasligini unutmaslik kerak.



2-rasm. RSSI, SNR va PLR ning masofaga bog‘liqligi

Soyalash, antenna balandligi tebranishi va qabul qilgich sezgirligi hisobga olingan simulyatsiyada RSSI masofa ortishi bilan kamayadi. SNR = RSSI − N bo‘lgani sababli u ham xuddi shu yo‘nalishda o‘zgaradi. SNR qiymati SNRmin = −7,5 dB chegarasiga yaqinlashganda paket yo‘qotilishi keskin ortadi (2-rasm). Bir va ikki qiyalikli modellarning sonli natijalari 5- va 6-jadvallarda keltirilgan.

5-jadval

Bir qiyalikli log-distance modeli (simulyatsiya)

h_t, m	*n*	*PL(d_0), dB*	*RMSE, dB*	*R^2*	*AIC*	*Hold-out RMSE, dB*
0,5	3,58	73,9	2,00	0,993	42,9	2,33
1,0	3,48	71,5	2,44	0,990	55,8	2,78
2,0	3,26	69,9	3,69	0,979	85,0	3,50

6-jadval

Ikki qiyalikli model, O‘tish nuqtasi = nazariy d_c (simulyatsiya)

h_t, m	d_c, m	n_1	n_2	PL(d_0), dB	RMSE, dB	R^2	AIC	Hold-out RMSE, dB	ΔAIC	Erkin d_c, m	PLR RMSE
0,5	91	1,69	3,79	70,8	0,60	0,999	−22,3	0,44	65,2	118,9	0,028
1,0	182	2,22	3,86	71,2	0,53	1,000	−31,3	0,40	87,1	152,3	0,019
2,0	364	2,08	3,97	70,6	0,91	0,999	0,1	1,06	84,9	226,3	0,005

Bir qiyalikli log-distance modelida R^2 yuqori – 0,979–0,993 – bo‘lsa-da, RMSE 2,0–3,7 dB ni tashkil etadi. Bu qiymat 3 dB li soyalash darajasi bilan bir tartibda bo‘lib, modelda sezilarli sistematik xato mavjudligini ko‘rsatadi. Shuning uchun R^2 ni yagona baholash mezoni sifatida qabul qilish yetarli emas. Bundan tashqari, n koeffitsiyenti antenna balandligiga qarab 3,58 dan 3,26 gacha o‘zgaradi, ya’ni bitta n qiymatini turli balandliklarga bevosita tatbiq etib bo‘lmaydi. Ikki qiyalikli model RMSE ni 0,5–0,9 dB, hold-out RMSE ni esa 0,40–1,06 dB gacha kamaytirdi;

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.30

ΔAIC 65,2–87,1 oralig‘ida bo‘ldi. O‘tish masofasidan keyingi n2 = 3,79–3,97 qiymatlari nazariy n ≈ 4 ga, dc gacha bo‘lgan n1 = 1,69–2,22 qiymatlari esa 2 ga yaqin.

Erkin aniqlangan o‘tish masofalari 118,9; 152,3 va 226,3 m bo‘lib, nazariy dc qiymatlaridan – 91; 182 va 364 m – ma’lum darajada farq qildi. Farq ayniqsa ht = 2 m holatida sezilarli. Buning sababi shundaki, antenna balandligidagi tebranish va suv sirtining g‘adir-budurligi interferensiya tebranishlarini yumshatadi, natijada bir rejimdan ikkinchisiga o‘tish keskin emas, bosqichma-bosqich kechadi. Shu bois dc ni qat’iy chegara emas, balki o‘tish zonasining taxminiy markazi sifatida talqin qilish maqsadga muvofiq.

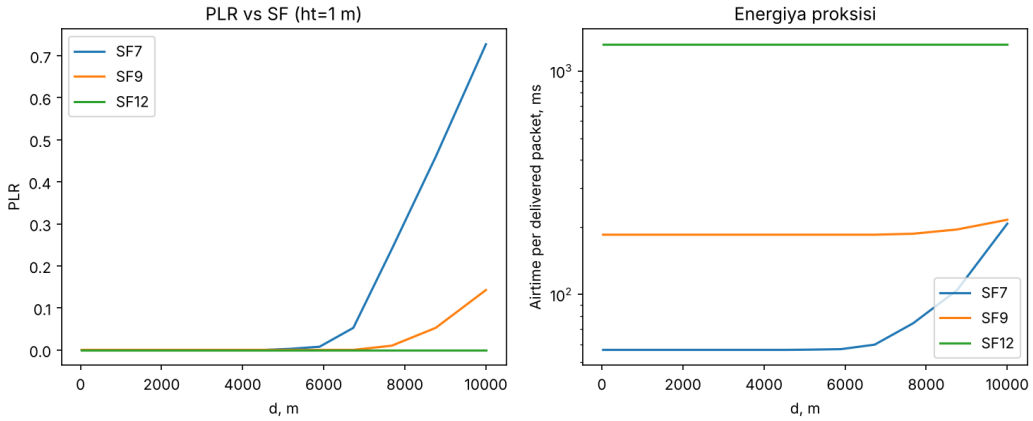
Q-funksiya va σtot = 3 dB asosida hisoblangan PLR bashorati simulyatsiya natijalaridan RMSE = 0,005–0,028 miqdorida farq qildi. M va σtot ning ta’sirini ko‘rsatish uchun, masalan, M = 3 dB bo‘lganda PLRch σ = 4; 6; 8 dB uchun mos ravishda 0,227; 0,309 va 0,354 ni tashkil etadi. M = 6 dB da bu qiymatlar 0,067; 0,159 va 0,227, M = 10 dB da esa 0,006; 0,048 va 0,106 ga teng. Demak, bir xil aloqa zaxirasida soyalash kuchaygani sari paketlarni ishonchli yetkazish ehtimoli pasayadi.

SF oshirilganda qabul qilgich sezgirligi har bir qadamda taxminan 2,5 dB yaxshilanadi: SF7 uchun −124,5 dBm dan SF12 uchun −137,0 dBm gacha. Biroq buning evaziga paketning efirda bo‘lish vaqti keskin ortadi: 20 baytli foydali yuk uchun ToA 56,6 ms dan 1318,9 ms gacha ko‘payadi (3-rasm). ht = 1 m va SF7 holatida simulyatsiya bo‘yicha PLR 10% ga taxminan 7,7 km da, 50% ga esa 8,8–10 km oralig‘ida yetadi; masofa panjarasining qadami sababli bu bahoda ±14% noaniqlik mavjud. SF9 da PLR = 10% chegarasi qariyb 10 km ga to‘g‘ri keladi, SF12 da esa 10 km gacha PLR 10% dan oshmadi. Yetkazilgan bitta paketga to‘g‘ri keluvchi efir vaqti ToA/(1 − PLR) bo‘yicha PLR = 0,1 da 1,11 marta, PLR = 0,5 da esa 2 marta ortadi. Shuning uchun SF ni oshirish energiya nuqtayi nazaridan faqat paket yo‘qotilishi yetarlicha kamaygan holatda foydali bo‘ladi.

7-jadval

SF bo‘yicha sezgirlik va ToA (BW = 125 kHz)

SF	*SNR_{min}, dB*	*S_{SF}, dBm*	*ToA, ms*
7	−7,5	−124,5	56,6
9	−12,5	−129,5	185,3
12	−20,0	−137,0	1318,9



3-rasm. SF bo‘yicha PLR va yetkazilgan paket uchun efir vaqti (ht = 1 m)

Simulyatsiya sharoitida ilgari surilgan faraz o‘z tasdig‘ini topdi: ikki qiyalikli model barcha uch antenna balandligida bir qiyalikli modelga nisbatan kichikroq RMSE va AIC qiymatlarini berdi, PLR esa aloqa zaxirasi orqali 0,005–0,028 RMSE bilan bashorat qilindi. Biroq kanal generatorining o‘zi ham ikki nurli fizik modelga asoslangan. Shu sababli bu natijalar, avvalo, taklif

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.30

etilgan modelning ichki izchilligini ko‘rsatadi va ularni real suv sharoitida mustaqil tasdiqlangan natija sifatida qabul qilib bo‘lmaydi.

Oldingi tadqiqotlarda suv sathining o‘zgarishi RSSI ni 10 dB dan ortiq o‘zgartirishi ko‘rsatilgan. Bizning modelda ham past antenna balandliklarida natija geometriyaga sezgir: 4000 m masofada turli balandliklar orasidagi farq 9,1 dB ga yetadi. Boshqa tajribada RSSI taxminan −94 dBm dan pasayganda PDR kamaygani kuzatilgan; bu holat taklif etilgan PLR–margin modelidagi chegaraviy o‘tishga sifat jihatdan mos keladi. Biroq o‘sha tajriba SF12/BW 500 kHz konfiguratsiyasida bajarilgani sababli sezgirlik qiymatlarini bevosita taqqoslash to‘g‘ri bo‘lmaydi. O‘simlik bilan qoplangan daryoda 10–130 m masofada past antennalar (0,5–1 m) uchun kamroq susayish qayd etilgan, bizning simulyatsiyada esa bunday muhit hisobga olinmagan. Bundan tashqari, $d < dc$ sohasida interferensiya tufayli balandroq antenna ayrim masofalarda kichikroq yo‘qotish berishi mumkin; masalan, 200 m da $ht = 2$ m holati shunday. Demak, bu natijalar bir-biriga zid emas, ammo ularni to‘g‘ridan-to‘g‘ri solishtirish ham mumkin emas. Past antennalarda Yerning sferik modeli yetarli bo‘lmasligi haqidagi xulosa bizning modelni radio gorizont bilan cheklash zarurati bilan mos keladi. Shuningdek, RSS > −100 dBm bo‘lganda SNR o‘lchash zanjirining to‘yinishi qayd etilgani sababli real tajribada yaqin masofalardagi SNR qiymatlarini ehtiyotkorlik bilan talqin qilish kerak. Bitta nuqtada olingan RSSI va SNR qiymatlari (−94 dBm; 7,33 dB) esa masofa bo‘yicha o‘lchovlarsiz signal tarqalish modelini baholash uchun yetarli emas. Taklif etilgan yondashuv aynan shu bo‘shliqni to‘ldirishga qaratilgan.

Modelning afzalliklari, cheklovlari va amaliy qo‘llanishi

Modelning asosiy afzalligi – parametrlar sonining kamligi (PL(d0), n1, n2, σ) va antenna balandligi orqali bevosita hisobga olinishidir. Bundan tashqari, RSSI, SNR, PLR, kechikish va energiya sarfi yagona hisoblash zanjirida bog‘langan. Bu esa SF va Pt parametrlarini tanlashda radioaloqaning ishonchliligi bilan energiya sarfi o‘rtasidagi muvozanatni baholash imkonini beradi.

Shu bilan birga, modelning bir qator cheklovlari mavjud ekanligi aniqlandi. Birinchidan, natijalar simulyatsiyaga asoslangan va hozircha real suv obyektida tasdiqlanmagan. Ikkinchidan, model tinch va nisbatan silliq suv yuzasi sharoitida hisoblangan; katta to‘lqinlar, sochilish, difraksiya va vegetatsiya sharoitlari hisobga olinmagan. Uchinchidan, model radio gorizontdan tashqaridagi masofalar uchun mo‘ljallanmagan. Bundan tashqari, εr, σw, σh, σ va antenna kuchaytirishi uchun qabul qilingan ayrim qiymatlar taxminiydir. RSSI/SNR o‘lchash xatoliklari va ko‘p tugunli tarmoqdagi aloqa to‘qnashuvlari ham simulyatsiyaga kiritilmagan;

Amaliy jihatdan model tugun va shlyuz antennalarini joylashtirishda dc ni oldindan hisoblash, zarur aloqa zaxirasi M ni belgilash, SF va Pt ni paket yo‘qotilishi hamda energiya sarfi o‘rtasidagi muvozanat asosida tanlash va tarmoq qamrovini rejalashtirish uchun qo‘llanishi mumkin.

Xulosa va takliflar. Ochiq suv obyektlari ustida ishlaydigan LoRa sensor tuguni va shlyuz o‘rtasidagi radioaloqa sifatini baholash uchun to‘rt blokli model taklif etildi. Model antenna balandligiga bog‘liq ikki qiyalikli signal tarqalish yo‘qotilishi (o‘tish masofasi $dc = 4\pi ht \cdot hr/\lambda$), RSSI va SNR, SNR zaxirasi orqali paket yo‘qotilishi, shuningdek kechikish va muvaffaqiyatli yetkazilgan paketga to‘g‘ri keluvchi energiya sarfini birlashtiradi. 868 MHz chastotada, $ht = 0{,}5$; 1 va 2 m hamda $hr = 5$ m sharoitida bajarilgan simulyatsiyada bir qiyalikli log-distance modeli 2,0–3,7 dB RMSE berdi. Ikki qiyalikli modelda esa RMSE 0,5–0,9 dB, hold-out RMSE 0,40–1,06 dB gacha kamaydi va ΔAIC 65–87 oralig‘ida bo‘ldi. O‘tish masofasidan keyingi tarqalish koeffitsiyenti $n2 = 3{,}79$–$3{,}97$, ungacha bo‘lgan $n1 = 1{,}69$–$2{,}22$ ni tashkil etdi. PLR bashoratining simulyatsiya natijalariga nisbatan RMSE si 0,005–0,028 oralig‘ida bo‘ldi.

Ikki qiyalikli signal tarqalish yo‘qotilishi modeli SNR zaxirasi orqali PLR, kechikish va energiya sarfi bilan yagona zanjirga birlashtirildi; dc ikki nurli yondashuvni qo‘llash mezoni hamda o‘tish zonasining taxminiy markazi sifatida asoslandi; past antenna balandliklarida bir

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.30

qiyalikli modelning sistematik xatosi va n koeffitsiyentining balandlikka bog‘liqligi miqdoriy baholandi.

Amaliy ahamiyati shundaki, model sensor tarmog‘ini loyihalashda antenna balandligi va tugunlar joylashuvini dc asosida tanlash, zarur aloqa zaxirasini belgilash hamda SF va Pt parametrlarini ishonchlilik va energiya sarfi o‘rtasidagi muvozanatni hisobga olgan holda tanlash imkonini beradi.

Tadqiqot natijalarining asosiy cheklovi – ularning simulyatsiyaga asoslanganidir. Model hozircha real suv obyektida tasdiqlanmagan va tinch suv, LOS hamda radio gorizont ichidagi masofalar uchun mo‘ljallangan. εr, σw, σh, σ va antenna kuchaytirishi uchun ayrim qiymatlar taxminiy qabul qilingan; to‘lqin, sochilish, vegetatsiya, ko‘p tugunli to‘qnashuvlar va o‘lchash zanjiridagi xatoliklar hisobga olinmagan.

Keyingi tadqiqotlarda, avvalo, taklif etilgan metodika asosida real suv obyektida maydon tajribalarini o‘tkazib, n1, n2, σ va dc parametrlarini aniqlash zarur. Shuningdek, shamol, to‘lqin balandligi va suv sathi kabi omillarni n va σ bilan bog‘lovchi regressiya modelini qurish, vegetatsiya va qirg‘oqdagi to‘siqlar ta’sirini hamda ITU-R P.2001-3 va Bullington kabi difraksiya modellarini hisobga olish rejalashtiriladi. Ko‘p tugunli tarmoqda paketlar to‘qnashuvi va LoRaWAN qabul oynalari bilan bog‘liq kechikishlarni o‘lchash, shuningdek energiya modelini tugunning real iste’mol toki o‘lchovlari bilan aniqlashtirish ham muhim keyingi vazifalardan hisoblanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1. Demetillo A.T., Japitana M.V., Taboada E.B. A system for monitoring water quality in a large aquatic area using wireless sensor network technology // Sustainable Environment Research. 2019. Vol. 29, Art. 12. https://doi.org/10.1186/s42834-019-0009-4

2. López Ramírez R.A., Aragón-Zavala A. Wireless Sensor Networks for Water Quality Monitoring: A comprehensive review // IEEE Access. 2023. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3308905

3. Olatinwo S.O., Joubert T.-H. Enabling Communication Networks for Water Quality Monitoring Applications: A Survey // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 100332–100362. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2904945

4. Pires J., Gomes T. River Water Quality Monitoring Using LoRa-Based IoT // Designs. 2024. Vol. 8, No. 6, Art. 127. https://doi.org/10.3390/designs8060127

5. Jovalekic N., Drndarevic V., Pietrosemoli E., Darby I., Zennaro M. Experimental Study of LoRa Transmission over Seawater // Sensors. 2018. Vol. 18, No. 9, Art. 2853. https://doi.org/10.3390/s18092853

6. Gutiérrez-Gómez A., Rangel V., Edwards R.M., Davis J.G., Aquino R., López-De la Cruz J., Mendoza-Cano O., Lopez-Guerrero M., Geng Y. A Propagation Study of LoRa P2P Links for IoT Applications: The Case of Near-Surface Measurements over Semitropical Rivers // Sensors. 2021. Vol. 21, No. 20, Art. 6872. https://doi.org/10.3390/s21206872

7. Gutiérrez Gaitán M., d’Orey P.M., Cecílio J., Rodrigues M., Santos P.M., Pinto L., Oliveira A., Casimiro A., Almeida L. Modeling LoRa Communications in Estuaries for IoT Environmental Monitoring Systems // IEEE Sensors Journal. 2022. Vol. 22, No. 21. P. 21312–21325. https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3205760

8. Internet of Buoys: An Internet of Things Implementation at Sea // arXiv:2012.05653. 2020. https://arxiv.org/abs/2012.05653

9. Friis H.T. A note on a simple transmission formula // Proceedings of the IRE. 1946. Vol. 34, No. 5. P. 254–256.

10. Rappaport T.S. Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.