

UCHUVCHISIZ UCHISH APPARAT TARMOG'IDA YORDAMCHI TUGUN ORQALI OQIM MA'LUMOTLARINI UZATISH USULI

Yusupov Bahodir Karamatovich

t.f.f.d. (PhD), professor

Boboyev Nabi Tohir o'g'li

t.f.f.d. (PhD)

Komilov Alisher Abdumannob o'g'li

t.f.f.d. (PhD)

<https://doi.org/10.5281/zenodo.15648361>

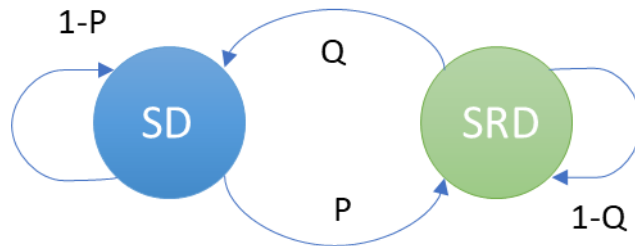
Annotatsiya. Mazkur tadqiqotda uchuvchisiz uchish apparatlari (UUA) ishtirokidagi o'z-o'zini tashkil qiluvchi simsiz tarmoqlarda oqimli ma'lumotlarni ishonchli uzatishni ta'minlash maqsadida tanlab qayta uzatish (SR-ARQ) usuliga asoslangan ikki bosqichli marshrutlash modeli taklif etiladi. Tadqiqot doirasida uzatish samaradorligini baholash uchun uch xil mezon – bosqichli, muvozanatli va moslashuvchan marshrut tanlash strategiyalari ishlab chiqildi. Har bir mezon NS-3 muhiti yordamida stasionar va mobil yordamchi tugun ssenariylari asosida modellashtirildi. Olingan natijalarda η (normallashtirilgan o'tkazuvchanlik qobiliyati) ko'rsatkichi har bir marshrutlash holati uchun tahlil qilindi. Natijalar marshrut tanlash strategiyasining yordamchi tugun holatiga bog'liq holda samaradorligi keskin o'zgarishini ko'rsatdi.

Аннотация. В данном исследовании предлагается двухэтапная модель маршрутизации на основе метода селективной повторной передачи (SR-ARQ) для обеспечения надежной передачи потоковых данных в самоконфигурируемых беспроводных сетях с участием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В рамках исследования разработаны три критерия выбора маршрута — поэтапный, сбалансированный и адаптивный — для оценки эффективности передачи данных. Каждому критерию была проведена моделизация в среде NS-3 на основе сценариев с неподвижным и подвижным вспомогательным узлом. В результате анализа были изучены значения η (нормализованной пропускной способности) для каждого маршрута. Результаты показали, что эффективность стратегии выбора маршрута значительно зависит от состояния вспомогательного узла.

Abstract. This study proposes a two-stage routing model based on the Selective Repeat Automatic Repeat reQuest (SR-ARQ) method to ensure reliable streaming data transmission in self-organizing wireless networks involving unmanned aerial vehicles (UAVs). Three route selection criteria — stepwise, balanced, and adaptive — were developed to evaluate transmission efficiency. Each criterion was simulated using the NS-3 environment under both stationary and mobile relay node scenarios. The resulting normalized throughput indicator (η) was analyzed for each routing case. The findings demonstrate that the effectiveness of the route selection strategy varies significantly depending on the state of the relay node.

Manba va qabul qiluvchi orasida ikki xil yo'l mavjud — bir bosqichli to'g'ridan-to'g'ri yo'l va ikki bosqichli marshrutlash orqali oraliq tugun orqali o'tuvchi yo'l. Qabul qiluvchining maqsadi — ma'lumotlarni tanlab qayta uzatishni so'rash usuli (SR-ARQ) yordamida ishonchli uzatishni ta'minlashdan iborat. UUA qoplangan tarmog'ida normallashtirilgan o'tkazuvchanlik qobiliyatini oshirish uchun yordamchi tugun orqali oqim ma'lumotlarini uzatish usulini qo'llash mumkin. $Y=\{SD,SRD\}$ to'plami taklif etilgan usulning mumkin bo'lgan holatlarini o'z ichiga

oladi (1-rasm) [1].



1-rasm – Oqimli ma’lumotlarni S manbadan D manzilga yordamchi tugun R orqali uzatish jarayoni holatlari (P, Q — o’tish ehtimolliklari)

D holat bo’yicha manba fragmentlarni bevosita qabul qiluvchiga uzatadi. Holat SRD da esa manba fragmentlarni yordamchi tugun orqali qabul qiluvchiga uzatadi. $y(k)$ ifodasi uzatish jarayonining k-bosqichdagi holatini bildiradi.

Taklif etilgan usulning o’ziga xos jihati — bu tanlab qayta uzatish so’roviga asoslangan tasdiqlash mexanizmini qo’llashidir. Qabul qiluvchi har bir qabul qilingan fragmentni ikki marotaba tasdiqlaydi: bir marta to’g’ridan-to’g’ri va bir marta yordamchi tugun orqali. Boshlang’ich qiymatlar: $ACK_{SD}(k)=ACK_{SRD}(k)=0$ Agar oldingi $(k-1)$ -bosqichda fragment muvaffaqiyatli uzatilgan bo’lsa va to’g’ridan-to’g’ri qabul qiluvchidan tasdiq olingan bo’lsa, u holda: $ACK_{SD}(k)=1$ Agar qabul qiluvchining tasdiqlovi yordamchi tugun orqali o’tkazilgan bo’lsa, u holda: $ACK_{SRD}(k)=1$.

To’plam $\vec{z}(k) = (y(k), ACK_{SD}(k), ACK_{SRD}(k))$ uzatish jarayoni holati $y(k)$ va k-bosqichdagi $ACK_{SD}(k)$ hamda $ACK_{SRD}(k)$ tasdiqlovlar mavjudligini o’z ichiga oladi (1-jadval).

Kadrlar orasidagi o’tish vaqti H_{ab} barcha holatlar uchun bir xil bo’lib, qiymati teng. Agar $\vec{z}_a$ dan $\vec{z}_b$ ga o’tish fragmentning muvaffaqiyatli uzatilishi bilan kechsa, unda ma’lumotning unumli qiymati $X_{ab}=1$ bo’ladi, aks holda $X_{ab}=0$. Normallashtirilgan o’tkazish qobiliyati η 1-formula asosida hisoblab chiqiladi [2].

1-jadval

Uzatish jarayoni holatlari kortejlari orasidagi o’tishlar

Paketlar massivi	y	ACK_{SD}	ACK_{SRD}
$\vec{z}_1$	SD	0	0
$\vec{z}_2$	SD	0	1
$\vec{z}_3$	SD	1	0
$\vec{z}_4$	SD	1	1
$\vec{z}_5$	SRD	0	0
$\vec{z}_6$	SRD	0	1
$\vec{z}_7$	SRD	1	0
$\vec{z}_8$	SRD	1	1

Ko’rib chiqilgan to’plam asosida ushbu ishda bosqichli, muvozanatli va moslanuvchan marshrut tanlash mezonlari taklif etilgan bo’lib, ular UUA tarmog’idagi qoplovchi tarmoqda normallashtirilgan uzatish qobiliyatini oshirishga xizmat qiladi.

Bosqichli mezon har bir bosqichda oqim ma’lumotlarini uzatish marshrutini oldingi fragmentning muvaffaqiyatli qabul qilinishini tasdiqlashga asoslangan holda belgilaydi. Agar manba tuguni oldingi fragment bo’yicha maxsus tasdiqlovchi xabarni olmasa, uzatish marshruti o’zgartiriladi.

$$y^{(b)} = \begin{cases} SD & \text{agar } y^{(a)} = SD \text{ va } ACK_{SD}^{(a)} = 1, \\ & \text{yoki } y^{(a)} = SRD \text{ va } ACK_{SRD}^{(a)} = 0 \\ SRD & \text{agar } y^{(a)} = SD \text{ va } ACK_{SD}^{(a)} = 1, \\ & \text{yoki } y^{(a)} = SRD \text{ va } ACK_{SRD}^{(a)} = 1 \end{cases} \quad (1)$$

Ma'lumotlar oqimini uzatish jarayoni avvalgi fragmentning tasdiqlanishiga qarab holatini o'zgartiradi.

Muvozanatli mezon asosida yordamchi tugundan foydalanishda manba tugun ma'lumot fragmentlarini SD va SRD marshrutlari bo'ylab navbatma-navbat uzatadi. Agar joriy fragment bevosita adresatga yuborilgan bo'lsa, keyingisi yordamchi tugun orqali uzatiladi. Shu tarzda, adresat fragmentlarning yarmisini yordamchi tugundan, yarmisini esa bevosita manbadan oladi [3].

$$y^{(b)} = \begin{cases} SD & \text{agar } y^{(a)} = SRD, \\ SRD & \text{agar } y^{(a)} = SD. \end{cases} \quad (2)$$

Mazkur mezon fragmentning muvaffaqiyatli qabul qilinganini tasdiqlovchi maxsus xabarlarni ishlatmaydi.

Moslashuvchan mezon yordamchi tugundan foydalanishni fragmentlar yetkazib berish koeffitsienti (PDR) asosida belgilaydi. PDR qiymati yuborilgan fragmentlar soniga nisbatan qabul qilingan tasdiqlar soni sifatida hisoblanadi:

$$y^{(b)} = \begin{cases} SD & \text{agar } y^{(a)} = SD, PDR_{SD}^{(a)} \geq PDR_{SRD}^{(a)} \\ & \text{yoki } y^{(a)} = SRD, PDR_{SD}^{(a)} < PDR_{SRD}^{(a)} \\ SRD & \text{agar } y^{(a)} = SD, PDR_{SD}^{(a)} < PDR_{SRD}^{(a)} \\ & \text{yoki } y^{(a)} = SRD, PDR_{SD}^{(a)} \geq PDR_{SRD}^{(a)} \end{cases} \quad (3)$$

Mazkur mezon qo'llanilganida, tugun har bir yuborilgan N fragment uchun ACK_SD va ACK_SRD bo'yicha qabul qilingan tasdiqlar sonini solishtiradi.

Fragmentlarni yetkazib berish koeffitsienti (PDR) quyidagi formula asosida hisoblab chiqiladi:

$$PDR = \frac{R_x}{T_x} \quad (4)$$

Bu yerda T_x — manba tomonidan yuborilgan fragmentlar soni, R_x esa — qabul qilingan tasdiqlar soni.

Ideal SR-ARQ usuli uchun, cheksiz bufer mavjud bo'lgan sharoitda, normallashtirilgan o'tkazuvchanlik qobiliyati η quyidagicha aniqlanishi mumkin [4]:

$$\eta = PDR \quad (5)$$

Taklif qilingan mezonlarni solishtirish uchun NS-3 modellashtirish muhiti qo'llanildi. Imitatsion model uchta tugunni o'z ichiga oladi, ular simsiz uzatish muhiti va statik marshrutlash yordamida bog'langan. Manba tugun ma'lumot oqimlarini yordamchi tugun orqali manzilgacha uzatadi. Ikki ssenariy ko'rib chiqildi: stasionar yordamchi tugun bilan va mobil yordamchi tugun bilan.

Har ikkala ssenariyda manba va manzil tugunlari stasionar holatda bo'lgan. Barcha tugunlar bir xil sozlamalarga ega edi (2-jadval). Barcha tugunlar 802.11n simsiz aloqa standartidan foydalangan. Ushbu standart uchun o'tkazish polosasi kengligi 5 GHz chastota diapazonida 20 MHz ni tashkil qiladi. Kanal modelida QPSK modulyatsiya usuli va kodlash koeffitsiyenti 1/2 bo'lgan, qabul qilish va uzatish uchun bitta antennali tizim qo'llanilgan. Uzatgichning quvvati 17.5 dBm bo'lgan [5].

Har bir sinovning davomiyligi 120 soniya. Har bir fragment hajmi taxminan 1250 bayt

(10 000 bit) ni tashkil qiladi. Manba tugun UDP protokoli yordamida manzilga 10 000 ta fragment uzatgan.

NS-3 muhiti har bir simsiz aloqa uchun bit xatoliklarini modellashtiradi: manba-manzil (SD), manba-yordamchi (SR) va yordamchi-manzil (RD). Modellashtirish jarayonida Friis uzatish formulasi hamda NIST bit xatolik modelidan foydalanildi. Bu model signalning qabul qilingan quvvatiga asoslanib fragmentlar yetkazib berish koeffitsiyentini imitatsiya qilish uchun qo'llanildi [6].

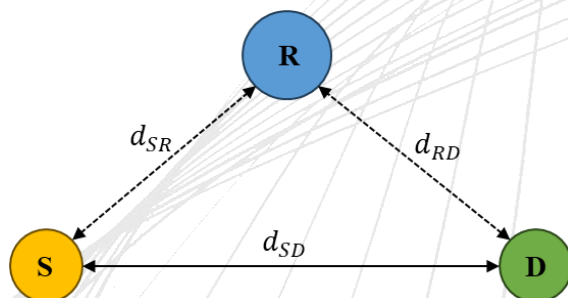
2-jadval

Marshrutni tanlash mezonlarini solishtirish uchun simulyatsiya parametrlari

Parametr	Qiymat
Sinov muddati	120 soniya
Simsiz ulanish	802.11n, 5GHz, MCS 1, $P_{Tx}=17.5$ dBm
Signalni susaytirish modeli	G.Friisning uzatish formulasi
Protokollar	UDP/IP
Uzatish tezligi	1 Mbit/s
Yuk tashish hajmi	1250 bayt

Birinchi ssenariyda barcha tugunlar statsionar (2-rasm). Yordamchi tugun ko'pter harakatini imitatsiya qiladi. Manba va manzil orasidagi d_{SD} masofa 480 metrni tashkil etadi. Ushbu imitatsion modellashtirish sharoitlarida PDR_{SD} qiymati 0.89 ga teng.

Masofalar d_{SR} va d_{RD} har bir sinovda teng deb qabul qilingan. Yordamchi tugun manba va manzil orasida, koordinatalari (240; y) bo'lgan nuqtada joylashgan, bu yerda y qiymati 360 metrdan 470 metrgacha 10 metrli qadam bilan o'zgaradi. y qiymatining ortishi bilan PDR_{SRD} qiymati 1 dan 0 gacha yomonlashadi. Har bir nuqta uchun 30 ta sinovdan iborat 10 ta nuqta modellashtirildi. Yo'lni tanlash bo'yicha taklif etilgan barcha mezonlar uchun o'rtacha PDR o'lchandi.



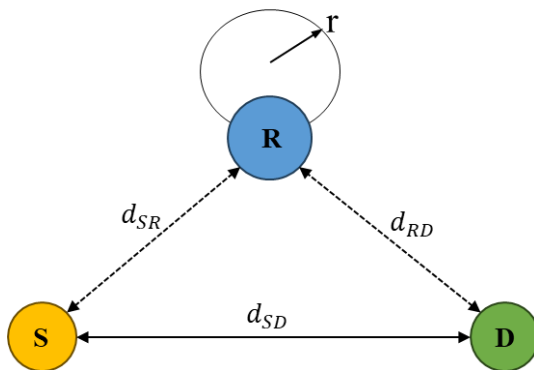
2-rasm – Statsionar yordamchi tugunli ssenariy (Ko'priks ssenariysi): manba S, manzil D va yordamchi tugun R; d_{ij} – tugunlar orasidagi masofa, bu yerda $i, j \in \{S, R, D\}$

Ikkinchi ssenariyda (3-rasm) manba va manzil statsionar, yordamchi tugun esa radiusi r bo'lgan aylana bo'ylab harakatlanadi. Bu holat qanotli UUA harakatini imitatsiya qiladi. Yordamchi tugun R aylana trayektoriyasi bo'yicha 50 metr radiusda harakatlanadi. Yordamchi tugunning chiziqli tezligi 50 m/s ga teng.

Manba va manzil o'rtasidagi masofa d_{SD} 480 metrni tashkil qiladi. Ushbu holatda PDR_{SD} qiymati ham 0.89 ga teng bo'lib, oldingi ssenariy bilan bir xil.

Yordamchi tugun mobil bo'lganligi sababli, d_{SR} va d_{RD} masofalar har bir sinov davomida o'zgarib turadi. Yordamchi tugun (240; 372) koordinata nuqtasi atrofida aylana bo'ylab harakatlanadi. Ushbu modellashtirish sharoitida PDR_{SRD} qiymati ham 0.89 deb belgilangan.

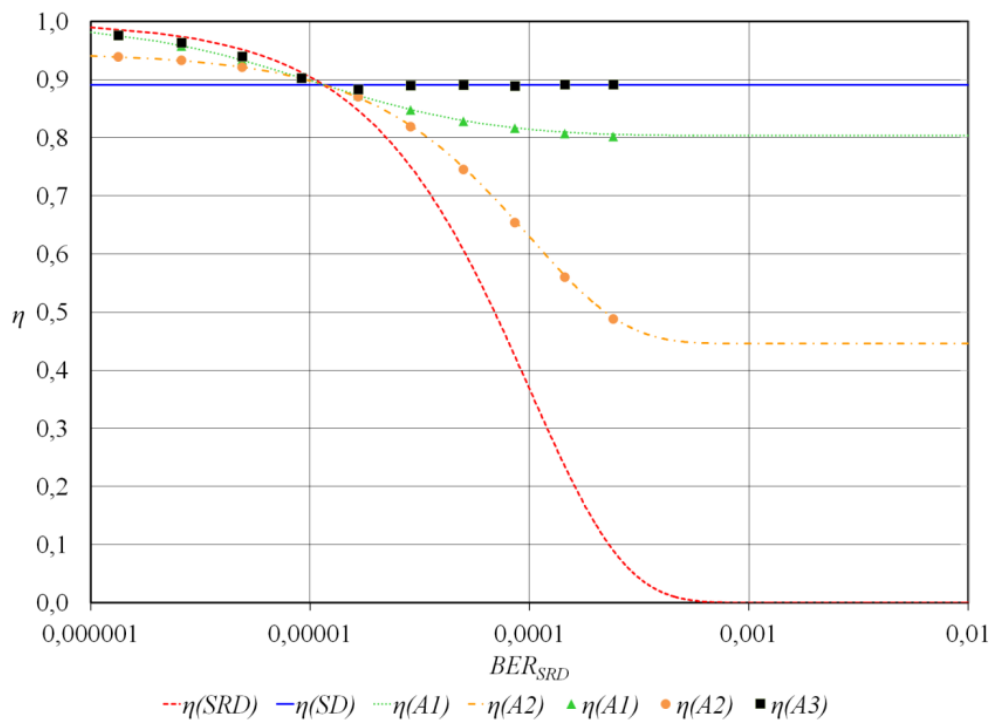
Ushbu ssenariy uchun 30 ta sinov o'tkazilib, yo'lni tanlash bo'yicha taklif etilgan barcha mezonlar uchun o'rtacha PDR qiymati o'lchandi.



3-rasm – Harakatlanuvchi yordamchi tugunli ssenariy (dron ssenariysi).

Yordamchi tugun radiusi r bo'lgan aylana bo'ylab harakatlanadi (manba – S, qabul qiluvchi – D, yordamchi tugun – R). d_{ij} — tugunlar orasidagi masofa, bu yerda $i, j \in \{S, R, D\}$.

Birinchi ssenariyga oid natijalar 4-rasmda keltirilgan. Egri chiziqlar analitik natijalarni, nuqtalar esa har bir marshrut tanlash mezonini bo'yicha o'tkazilgan imitatsion modelashtirish natijalarini ifodalaydi.



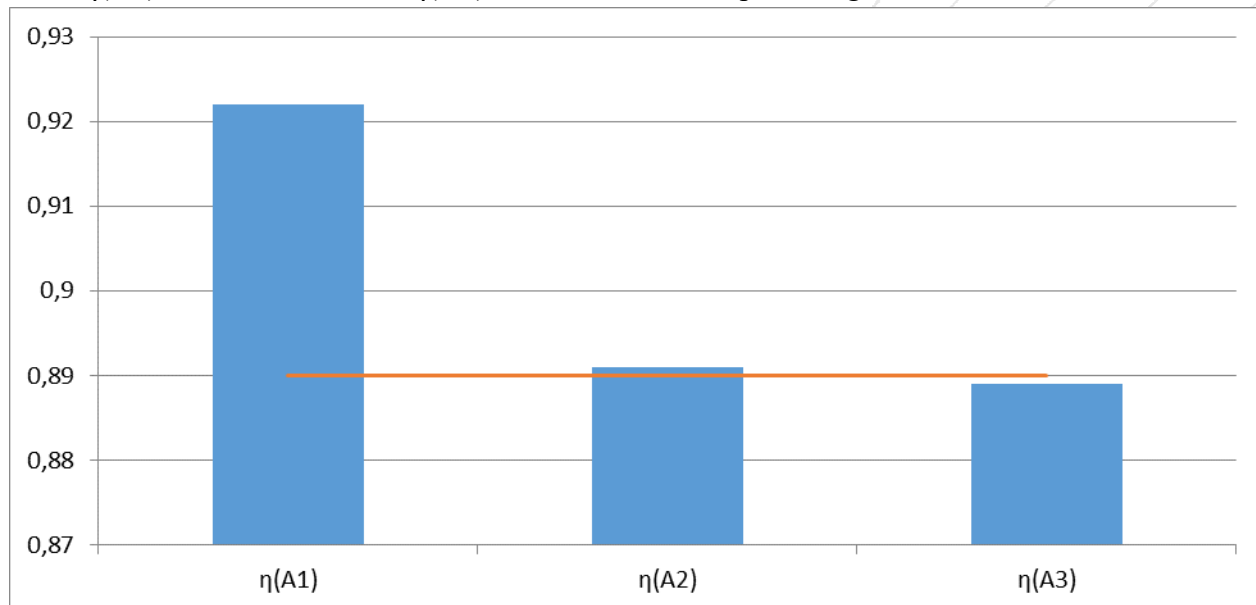
4-rasm – Statsionar yordamchi tugunli ssenariyda η ko'rsatkichining BER_{SRD} ga bog'liqligi: bosqichli $\eta(A1)$, muvozanatli $\eta(A2)$ va moslashuvchan $\eta(A3)$ marshrut tanlash mezonlari uchun

Ikki bosqichli marshrut uchun bit xatoligi oshgan sari uning normallashtirilgan uzatish qobiliyati $\eta(SRD)$ kamayadi. Bir bosqichli marshrut uchun uzatish qobiliyati $\eta(SD)$ doimiy qoladi. Teng muvozanatli va bosqichli mezonlar uchun imitatsion modelashtirish natijalari deyarli analitik natijalarga mos keladi.

Moslashuvchan mezon $\eta(A3)$ barcha modelashtirish nuqtalari uchun eng yaxshi natijalarni ko'rsatdi. Bosqichli mezon $\eta(A1)$ o'rtacha natijalarni berdi. Muvozanatli mezon $\eta(A2)$ eng yomon natijalarni ko'rsatdi. Agar $\eta(SRD)$ qiymati $\eta(SD)$ dan katta bo'lsa,

moslashuvchan mezon qiymatlari $\eta(\text{SRD})$ ga yaqin bo'ladi; aks holda ularning qiymatlari $\eta(\text{SD})$ ga yaqinlashadi.

Mobil yordamchi tugunli ssenariyda $\eta(\text{SD})$ va $\eta(\text{SRD})$ qiymatlari 0.89 ga teng bo'lib, 5-rasmda qizil chiziq bilan ko'rsatilgan. Natijalar ustunli diagramma ko'rinishida bosqichli $\eta(\text{A1})$, muvozanatli $\eta(\text{A2})$ va moslashuvchan $\eta(\text{A3})$ mezonlar uchun taqdim etilgan.



5-rasm – Harakatlanuvchi yordamchi tugun ishtirokidagi ssenariyda marshrut tanlash mezonlari bo'yicha bosqichma-bosqich $\eta(\text{A1})$, muvozanatli $\eta(\text{A2})$ va moslashuvchan $\eta(\text{A3})$ ko'rsatkichlarining o'rtacha qiymatlari

Bosqichli mezon $\eta(\text{A1})$ eng yaxshi natijalarni ko'rsatdi, ya'ni bu qiymatlar faqat bir bosqichli yoki faqat ikki bosqichli marshrut orqali uzatishga qaraganda 3% yuqori bo'ldi. Muvozanatli mezon uzatish qobiliyatining qiymatini 0.89 atrofida ko'rsatdi. Moslashuvchan mezon $\eta(\text{A3})$ eng yomon natijalarni berdi va bu qiymat, ushbu mezon umuman qo'llanilmagan holatga nisbatan 0.002 ga past bo'ldi. Mobil yordamchi tugun ishtirokidagi ssenariyda moslashuvchan mezon natijalari muvozanatli mezondan ham yomonroq bo'ldi.

Demak, yordamchi tugunning harakatchanligi marshrut tanlash mezonlarining samaradorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatdi. Masalan, ilgari eng yaxshi natijalarni ko'rsatgan moslashuvchan mezon ushbu ssenariyda eng samarasiz bo'ldi. Faqatgina bosqichli mezon η ko'rsatkichini 1% dan ortiq oshirishga imkon berdi.

Tahlil natijalari shuni ko'rsatadiki, stasionar yordamchi tugun ssenariyida moslashuvchan mezon η qiymati bo'yicha eng samarali natijani berdi. Biroq, yordamchi tugun harakatlanadigan holatda ushbu mezon o'z samaradorligini yo'qotdi va hatto muvozanatli yondashuvdan ham past ko'rsatkichlarni qayd etdi. Mobil ssenariyda eng yaxshi natijani bosqichli mezon berdi, u η ko'rsatkichini 1% dan ortiq oshirishga erishdi. Shunday qilib, yordamchi tugun holati (stasionar yoki mobil) marshrut tanlash strategiyasining natijalariga sezilarli darajada ta'sir ko'rsatadi. Tadqiqot natijalari UUA tarmoqlarida samarali va adaptiv marshrutlash algoritmlarini ishlab chiqish uchun asos yaratadi.

REFERENCES

1. Vasiliev, D. S. Relaying Algorithms with ARQ in Flying Ad hoc Networks / D. S. Vasiliev, A. V. Abilov // Proceedings of IEEE International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015). May 21-23, Omsk, Russia, 2015. — Omsk, 2015.
2. Lin S. Error Control Coding / Shu Lin, D. Costello // 2nd Edition, ISBN: 0130426725, — Prentice-Hall. — 2024.
3. Романов, С. В. Симуляторы беспроводных MANET-сетей / Жолобов А.Н., 123 Прозоров Д.Е., Романов С.В. // Инфокоммуникационные технологии, 2022. — №3. — С.28-33. [32] Sorokin A. A study of packet delivery performance in MANETs with OLSR protocol using NS-3 / A. Sorokin, D. S. Vasiliev, A. V. Abilov // Proceedings of the 4th Forum of Young Researchers in the Framework of International Forum “Education Quality – 2014”. – Izhevsk, Russia, 2014. –P. 399–404 / – ISBN 978-5-7526-0649-6.
4. Chappell, L. Wireshark Network Analysis The Official Wireshark Certified Network Analyst Study Guide / Laura Chappell // Protocol Analysis Institute, “Chappell University” — 2012. — ISBN 978-1-893939-94-3.
5. Meitis, D. Simulation of MANETs routing protocols for UAVs / D. Meitis, D. Vasiliev, A. Abilov // In Proceedings of the 4th Forum of Young Researchers in the Framework of International Forum “Education Quality – 2014”. April 23, Izhevsk, Russia. – 2014. – P. 358–363.
6. Chappell, L. Wireshark Network Analysis The Official Wireshark Certified Network Analyst Study Guide / Laura Chappell // Protocol Analysis Institute, “Chappell University” — 2012. — ISBN 978-1-893939-94-3.