

UCHUVCHISIZ UCHISH APPARATLARI GURUHIDA ALOQA
SIFATINI BASHORATLASH ASOSIDA KONSENSUS
PARAMETRLARINI ADAPTIV BOSHQARISH

Abdirayimov Renat Hamid o'g'li

*Muhammad al-Xorazmiy nomidagi TATU stajyor-o'qituvchisi,
renat.abdirayimov.001@gmail.com*

Qo'ziyev Shahzod Ulug'bek o'g'li

*Muhammad al-Xorazmiy nomidagi TATU assistenti,
shahzod4122@gmail.com*

Annotatsiya. Ushbu ishda uchuvchisiz uchish apparatlari (UUA) guruhida aloqa uzilishi va guruh bo'linishi sharoitida konsensus protokollari samaradorligining pasayishi tahlil qilingan hamda Byzantine-chidamli konsensus parametrlarini aloqa sifati va guruh bog'lanishi bashoratiga asoslanib PPO agenti yordamida oldindan moslashtiruvchi model taklif etilgan.

Kalit so'zlar: UUA guruhi, FANET, Byzantine konsensus, aloqa uzilishini bashoratlash, algebraik bog'lanish, PPO.

Kirish

Uchuvchisiz uchish apparatlari (UUA) guruhlarida qidiruv-qutqaruv va monitoring vazifalarida umumiy qarorlarni markazlashmagan holda qabul qilish uchun taqsimlangan konsensus protokollaridan foydalanadi [1-3]. Raft va PBFT protokollari tugunlar orasidagi aloqani barqaror deb faraz qiladi [1], uchuvchi ad hoc tarmoqlarda (FANET) esa yuqori harakatchanlik, to'siqlar va interferensiya sababli aloqa tez-tez uziladi. Harakatdagi UUA guruhida paketlar yo'qolishi 15-60% ni tashkil etgan, Raft konsensusining muvaffaqiyati statik muhitdagi 88% dan yuqori qiymatdan 46-62% gacha pasaygan [1]. Byzantine nosozliklarga chidamli protokollar $n \geq 3f + 1$ shartida ishlaydi, bu yerda n - tugunlar soni, f - zararli tugunlar soni [4]; guruh bo'linganda kichik bo'laklarda $2f + 1$ kquorum yig'ilmaydi. Mavjud adaptiv BFT (Byzantine Fault Tolerance) yechimlarida nosozlik taymer tugagach aniqlanadi va bu davrda o'tkazuvchanlik vaqtincha



nolga tushadi [2]. Demak, asosiy muammo - konsensus parametrlarining aloqa yomonlashuviga reaktiv moslashishi.

Mavjud yondashuvlar tahlili

Marshrutlash darajasida aloqa uzilishini bashoratlash samaradorligi ko'rsatilgan: FINT tizimida bashorat tiklanish vaqtini 1 s dan 1 ms dan kamgacha qisqartirgan [5], Traj-Q-GPSR paket yo'qotishni 23% gacha kamaytirgan [6], sifat trendini hisobga oluvchi PPO agenti qat'iy chegara qoidasiga nisbatan 15-25 qadam oldin harakat qilgan [7]. Konsensusda esa bashorat faqat barcha tugunlar ishonchli degan farazda statik formula bilan qo'llanilgan [1], Byzantine-chidamli protokollar esa reaktiv moslashadi [2, 3] (1-jadval).

1-jadval. Mavjud ishlarning qiyosiy tavsifi

Ish	Boshqaruv obyekti	Bashorat	Byzantine chidamlilik	O'rganuvchi boshqaruv
RoUBC [1]	konsensus	statik formula	—	—
ACBFT [2]	konsensus	—	+	—
D2BFT [3]	konsensus	—	+	faqat harakat
FINT [5]	marshrutlash	ML (markazlashgan)	—	—
Traj-Q-GPSR [6]	marshrutlash	trayektoriya	—	Q-learning
RoutePPO [7]	marshrutlash	sifat trendi	—	PPO
Taklif etilayotgan	konsensus	SNR, PDR, τ, λ_2	+	PPO (cheklovli)



Taklif etilayotgan yondashuv

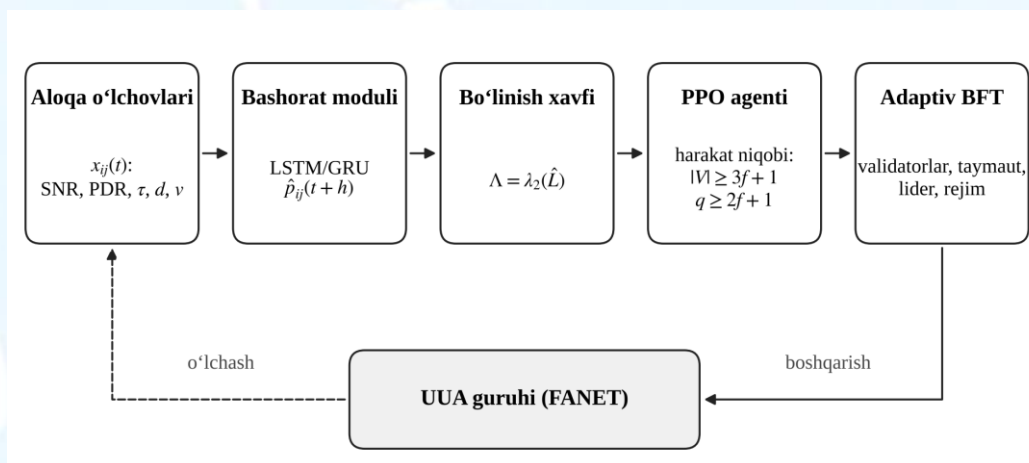
Model uch bosqichdan iborat (1-rasm). Birinchi bosqichda har bir (i, j) aloqa uchun $x_{ij}(t) = [\text{SNR}, \text{PDR}, \tau, d, v]$ holat vektori asosida LSTM/GRU tarmog'i $h \in [1; 3]$ s gorizontda uzilish ehtimoli $\hat{p}_{ij}(t+h)$ ni baholaydi. Ikkinchi bosqichda $\hat{w}_{ij} = 1 - \hat{p}_{ij}$ og'irliklari asosida tuzilgan Laplas matritsasining ikkinchi eng kichik xos qiymati - algebraik bog'lanish hisoblanadi:

$$\Lambda(t+h) = \lambda_2(\hat{L}(t+h)), \quad (1)$$

uning nolga yaqinlashishi guruh bo'linish arafasida ekanini bildiradi. Uchinchi bosqichda PPO (Proximal Policy Optimization) agenti [8] validatorlar to'plami, taymaut, yetakchi va ishlash rejimini tanlaydi; mukofot funksiyasi:

$$R_t = -\alpha \cdot L_t - \beta \cdot E_t + \gamma \cdot S_t, \quad (2)$$

bu yerda L_t - konsensus kechikishi, E_t - energiya sarfi, S_t - konsensusga erishilganlik ko'rsatkichi. Harakatlarni niqoblash orqali $|V_t| \geq 3f + 1$ va $q_t \geq 2f + 1$ shartlari doim saqlanadi.



1-rasm. Taklif etilayotgan modelning tuzilishi

Model NS-3/OMNeT++ va ROS 2 muhitida 10-50 ta UUA uchun statik PBFT, reaktiv, chegara asosidagi, RoUBC turidagi, bashoratsiz PPO va Kalman + PPO usullari bilan qiyoslanadi.



Xulosa

Yondashuvning ilmiy yangiligi - Byzantine-chidamli konsensus parametrlarini aloqa sifati va guruh bo'linishi bashoratiga asoslanib, xavfsizlik shartlari doirasida uzilishdan oldin moslashtirish. Yondashuv reaktiv usullarga nisbatan konsensus muvaffaqiyatini oshirishi va to'xtab qolish vaqtini kamaytirishi kutilmoqda; bu gipoteza simulyatsion tajribalarda tekshiriladi.

Adabiyotlar

1. Wang Z., Wang H., Li Z. et al. Robust permissioned blockchain consensus for unstable communication in FANET // IEEE/ACM Trans. Networking. – 2024. – Vol. 32, No. 1. – P. 699–712.
2. Wang J., Wang J., Tong Z. et al. ACBFT: Adaptive chained Byzantine fault-tolerant consensus protocol for UAV ad hoc networks // IEEE Trans. Veh. Technol. – 2025. – Vol. 74, No. 7. – P. 11324–11335.
3. Nanapu V., Banavathu G., Desikan K.E. D2BFT: A dual Byzantine fault tolerance approach for multi-agent drone surveillance with DRL // Computer Networks. – 2025. – Vol. 273. – 111750.
4. Castro M., Liskov B. Practical Byzantine fault tolerance // Proc. OSDI. – 1999. – P. 173–186.
5. Ismail L., Uomo D., Sgambelluri A. et al. P4 FANET in-band telemetry (FINT) for AI-assisted wireless link failure forecasting and recovery // Computer Networks. – 2024. – Vol. 250. – 110599.
6. Wu M., Jiang B., Chen S. et al. Traj-Q-GPSR: A trajectory-informed and Q-learning enhanced GPSR protocol for mission-oriented FANETs // Drones. – 2025. – Vol. 9, No. 7. – 489.
7. Cürmen N., Yıldırım Okay F., Özdemir S. RoutePPO: eBPF-based PPO for adaptive routing in UAV swarm networks // Proc. IEEE SmartNets. – 2026.
8. Schulman J., Wolski F., Dhariwal P. et al. Proximal policy optimization algorithms // arXiv:1707.06347. – 2017.