RAQAMLI MA'LUMOTLARNI UZATISH USULLARI: TEXNOLOGIYALAR, PROTOKOLLAR VA SAMARADORLIK TAHLILI

Yo‘ldoshov Xojimurod
Farg‘ona davlat texnika universiteti
732-23 guruh talabasi

Annotatsiya. Ushbu maqolada raqamli ma'lumotlarni uzatishning zamonaviy usullari — simli va simsiz kanallar, modulyatsiya texnikalari, xatoliklarni tuzatish kodlari va ko‘p kirish protokollari — keng qamrovli tarzda tahlil etiladi. Modulyatsiya sxemalarining (ASK, FSK, PSK, QAM) spektral samaradorligi va shovqinga chidamliligi matematik ko‘rsatkichlar asosida qiyoslanadi. Shannon kanalining sig‘imi nazariyasi, Nyquist teoremasi va OFDM texnologiyasining ko‘p tashuvchili uzatishdagi roli batafsil ko‘rib chiqiladi. 5G NR, Wi-Fi 6E va optik tolali aloqa tizimlarining real ishlash ko‘rsatkichlari taqdim etiladi. Bit-xato ehtimoli (BER), spektral samaradorlik va kechikish (latency) mezonlari bo‘yicha qiyosiy jadval tuziladi. Natijalari zamonaviy tarmoq infratuzilmasini loyihalashda amaliy ahamiyat kasb etadi.

Kalit so‘zlar: raqamli modulyatsiya, ASK, FSK, PSK, QAM, OFDM, CDMA, MIMO, Shannon teoremasi, bit-xato ehtimoli (BER), spektral samaradorlik, 5G, optik tolali aloqa, xatoliklarni tuzatish kodlari.

Kirish

Zamonaviy axborot jamiyatida raqamli ma'lumotlar almashinuvi global tarmoq infratuzilmasining asosi hisoblanadi. 2025-yilda dunyo bo‘ylab internet trafigi kuniga 600 eksabaytdan oshganligi qayd etilgan [1]. Bu ko‘rsatkich uzatish tizimlariga qo‘yiladigan talablarni keskin oshirgan: yuqori o‘tkazuvchanlik, minimal kechikish, shovqinga yuqori chidamlilik va energiya samaradorligi bir vaqtda ta'minlanishi lozim.

Raqamli uzatish usullari analog tizimlardan tubdan farq qiladi: axborot diskret belgilar (bitlar) orqali uzatiladi, bu esa xatoliklarni aniqlash, tuzatish va signallarni regeneratsiya qilish imkonini beradi [2]. Ushbu xususiyatlar raqamli tizimlarni uzoq masofali aloqa, simsiz tarmoqlar va optik kanallar uchun ustun qiladi.

Maqolaning maqsadi: (1) asosiy modulyatsiya sxemalarini matematik jihatdan tavsiflab berish; (2) ko‘p kirish protokollarini solishtirish; (3) xatoliklarni tuzatish kodlarining samaradorligini baholash; (4) zamonaviy 5G va optik tizimlar ko‘rsatkichlarini tahlil etish.

Kanalning sig‘imi va nyquist-shannon nazariyasi

Nyquist formulasi (shovqinsiz kanal)

Harry Nyquist (1928) shovqinsiz kanalda maksimal ma'lumot uzatish tezligini aniqlashning asosiy formulasini taklif etdi [3]:

$$C = 2B \cdot \log_2(M) \quad [bit/s]$$

bu yerda B — kanal kengligi (Gerts), M — signal darajalarining soni. Masalan, B = 3000 Gts va M = 8 (3 bit/simvol) bo‘lsa, C = 18 000 bit/s ga teng bo‘ladi.

Shannon formulasi (shovqinli kanal)

Claude Shannon (1948) real kanallarda maksimal sig‘imni aniqlashning fundamental teoremasi [4]:

$$C = B \cdot \log_2(1 + S/N) \quad [bit/s]$$

bu yerda S/N — signal-shovqun nisbati (SNR). Ushbu formula **Shannon chegarasi** deb ataladi — hech qanday uzatish tizimi bu chegaradan oshib keta olmaydi, faqat unga yaqinlasha oladi. Zamonaviy LDPC va Turbo-kodlar Shannon chegarasiga 0.1–0.5 dB ichida yaqinlashishga erishadi [5].

Spektral samaradorlik

Spektral samaradorlik $\eta = R/B$ [bit/s/Hz] uzatish tizimining asosiy ko‘rsatkichlaridan biri. Bu mezon bir xil chastota resursidan qancha ko‘proq ma'lumot uzatish mumkinligini ifodalaydi [6]:

$$\eta = \log_2(1 + SNR) \quad [bit/s/Hz] \quad \text{— Shannon chegarasi}$$

Raqamli modulyatsiya usullari

Amplitudali Shift-Keying (ASK)

ASK modulyatsiyasida tashuvchi to‘lqinning amplitudasi raqamli ma'lumotga qarab o‘zgartiriladi [7]. Umumiy ifoda:

$$s(t) = A_m \cdot \cos(2\pi f_c\, t + \varphi), \quad A_m \in \{A_1, A_2, \ldots, A_M\}$$

ASKning asosiy kamchiligi — shovqin va signal susayishiga nisbatan yuqori sezuvchanlik. Shu sababli u odatda optik tolali aloqada (On-Off Keying — OOK ko‘rinishida) qo‘llaniladi, elektromagnit muhitda esa kamdan-kam ishlatiladi [8].

Chastotali Shift-Keying (FSK)

FSKda tashuvchi chastota ma'lumot bitiga qarab almashtiriladi. Ikkilik FSK (2-FSK) uchun:

$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi f_1 t) \quad \text{—'1' bit uchun } s(t) = A \cdot \cos(2\pi f_0 t) \quad \text{—'0' bit uchun}$$

FSK amplituda o‘zgarishlariga sezgir emas, shuning uchun ham shovqinli muhitlarda (tashqi aloqa, RFID) keng qo‘llaniladi. Biroq spektral samaradorligi ASK va PSK ga nisbatan pastroq [9].

Fazali Shift-Keying (PSK)

PSKda tashuvchi signalning fazasi modulyatsiyalanadi. M-PSK uchun signallar fazosi:

$$\varphi_m = 2\pi m/M, \quad m = 0, 1, \ldots, M-1$$

QPSK (M=4) ko‘rinishida 2 bit/simvol uzatiladi. 8-PSK da 3 bit/simvol. PSK shovqinga ASK ga nisbatan chidamliroq, ammo yuqori M qiymatlarida ($M \geq 16$) QAM ga yutib beradigan bo‘ladi [10].

Kvadraturli Amplituda Modulyatsiyasi (QAM)

QAM — amplituda va fazani bir vaqtda modulyatsiya qiluvchi eng samarali sxema [11]:

$$s(t) = I \cdot \cos(2\pi f_c t) - Q \cdot \sin(2\pi f_c t)$$

bu yerda I va Q — kvadratura komponentlari. 64-QAM da 6 bit/simvol, 256-QAM da 8 bit/simvol, 1024-QAM da 10 bit/simvol uzatiladi. Wi-Fi 6 va 5G NR 1024-QAM dan foydalanadi. QAMning kamchiligi — yuqori SNR talab qilishi (1024-QAM uchun SNR > 35 dB kerak) [12].

Ko‘p tashuvchili uzatish: ofdm texnologiyasi

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) zamonaviy simsiz va simli aloqa tizimlarining asosi hisoblanadi [13]. Asosiy g‘oya: keng polosali signal ko‘plab tor polosali ortogonal subkanalchaga ajratiladi.

N ta subkanalli OFDM signali [14]:

$$s(t) = Re\{ \Sigma(k=0 \text{ to } N-1)\ X_k \cdot e^{(j2\pi k \cdot \Delta f \cdot t)} \}, \quad 0 \le t \le T$$

bu yerda $\Delta f = 1/T$ — subkanallar orasidagi chastota intervali (ortogonallik sharti). OFDM ning asosiy afzalliklari:

Ko‘p yo‘lli tarqalishga (multipath fading) chidamlilik — tsiklik prefiks (CP) tufayli;

Samarali IFFT/FFT bilan apparat amalga oshirish;

Adaptiv modulyatsiya — har bir subkanalda alohida QAM darajasi;

MIMO-OFDM bilan birlashtirilganda spektral samaradorlik keskin oshadi.

LTE, Wi-Fi 4/5/6, DVB-T2 va 5G NR — barchasi OFDM asosida qurilgan. 5G NR da subkanal kengligi 15 kHz dan 240 kHz gacha moslashtirilishi mumkin [15].

Ko‘p kirish protokollari TDMA, FDMA, CDMA va OFDMA

Ko‘p foydalanuvchi bir vaqtda kanaldan foydalanishi uchun ko‘p kirish protokollari ishlab chiqilgan [16]:

Jadval 1. Ko‘p kirish protokollarining qiyosiy tavsifi

Protokol	Ajratish usuli	Qo‘llanilishi	Afzalligi	Kamchiligi
FDMA	Chastota bo‘yicha	1G (AMPS)	Oddiy amalga oshirish	Spektr isrofgarchiligi
TDMA	Vaqt bo‘yicha	2G (GSM)	Samarali spektr	Sinxronizatsiya kerak
CDMA	Kod bo‘yicha	3G (WCDMA)	Maxfiylik yuqori	Murakkab demodulyatsiya
OFDMA	Chast.+vaqt	4G/5G/Wi-Fi 6	Moslashuvchan	PAPR muammosi

MIMO texnologiyasi

MIMO (Multiple Input Multiple Output) bir necha uzatuvchi va qabul qiluvchi antenna orqali kanalning o‘tkazuvchanligini tubdan oshiradi [17]. N_T uzatuvchi va N_R qabul qiluvchi antenna uchun kanalning sig‘imi:

$$C_MIMO = B \cdot \Sigma(i=1 \text{ to } \min(N_T, N_R))\ \log_2(1 + \lambda_i \cdot SNR / N_T)$$

bu yerda λ_i — kanal matritsasining singular qiymatlari. 4×4 MIMO tizimi nazariy jihatdan bir antennalik tizimga nisbatan 4 barobargacha yuqori o‘tkazuvchanlik beradi. 5G da 32×32 yoki 64×64 Massive MIMO qo‘llaniladi [18].

Xatoliklarni aniqlash va tuzatish kodlari

Hamming kodi

Hamming kodi (1950) bir xatolikni tuzatish va ikki xatolikni aniqlash qobiliyatiga ega [19]. (n,k) Hamming kodi uchun:

$$n = 2^r - 1, \quad k = 2^r - r - 1, \quad r \text{ — tekshiruv bitlari soni}$$

Masalan, (7,4) Hamming kodida 4 ta ma'lumot biti va 3 ta tekshiruv biti bo‘lib, Hamming masofasi d_min = 3 ga teng. Bu kod o‘z-o‘zini tuzatuvchi xotira (ECC RAM) va saqlash tizimlarida qo‘llaniladi.

Reed-Solomon kodlari

Reed-Solomon (RS) kodlari ko‘plab xatoliklarni tuzatishga, ayniqsa to‘planib qolgan (burst) xatoliklarga qarshi kurashishga mo‘ljallangan [20]. RS(n, k) kodi:

$$t = \lfloor (n - k) / 2 \rfloor \text{ — tuzatiladigan simvollar soni}$$

RS kodlari CD/DVD/Blu-ray, QR-kodlar, kosmik aloqa (Voyager, Cassini) va DSL tizimlarida qo‘llaniladi. RS(255,223) kodi kosmik aloqada standart sifatida qabul qilingan.

Turbo va LDPC kodlari

Turbo kodlar (1993) va LDPC (Low Density Parity Check) kodlari Shannon chegarasiga eng yaqin yondashuvchi kodlar hisoblanadi [21]. 3GPP LTE standarti Turbo kodlash, 5G NR esa LDPC va Polar kodlardan foydalanadi. LDPC kodlarning asosiy afzalligi — yuqori parallel dekodlash imkoniyati va apparatda samarali amalga oshirish.

Qiyosiy tahlil va tajriba natijalari

Modulyatsiya sxemalarining BER tahlili

Gaussian shovqinli kanalda (AWGN) turli modulyatsiya sxemalarining bit-xato ehtimoli (BER) [22]:

$$BER_BPSK = Q(\sqrt{2 \cdot E_b/N_0}) \quad BER_QPSK = Q(\sqrt{2 \cdot E_b/N_0}) \quad BER_16QAM \approx (3/8) \cdot erfc(\sqrt{E_b / (10 \cdot N_0)})$$

bu yerda Q(x) — Q-funksiyasi (Gaussian xavf funksiyasi), E_b/N_0 — bit boshiga signal-shovqun energiyasi nisbati. BER = 10^{-6} da BPSK uchun $E_b/N_0 \approx 10.5$ dB, 64-QAM uchun esa ≈ 26.5 dB talab etiladi [23].

Jadval 2. Zamonaviy uzatish texnologiyalarining qiyosiy ko‘rsatkichlari

Texnologiya	Standart	Maks. tezlik	Spektral samar. (bit/s/Hz)	Kechikish	Modulyatsiya
Wi-Fi 6E	IEEE 802.11ax	9.6 Gbit/s	≤ 9.6	< 1 ms	1024-QAM OFDMA
5G NR (mmWave)	3GPP Rel.15	20 Gbit/s	≤ 30	< 1 ms	256-QAM OFDM
5G NR (Sub-6)	3GPP Rel.15	4.7 Gbit/s	≤ 7.8	1–4 ms	256-QAM OFDM
LTE-A	3GPP Rel.10	1 Gbit/s	≤ 3.0	5–15 ms	64-QAM OFDMA
Optik tolali (DWDM)	ITU G.694	400 Tbit/s	≤ 10 bit/s/Hz	< 0.1 ms	DP-QPSK/QAM
DSL (VDSL2)	ITU G.993.2	100 Mbit/s	≤ 4.0	1–2 ms	DMT (OFDM)

Jadvaldan ko‘rinib turibdiki, **optik tolali DWDM** tizimi eng yuqori umumiy o‘tkazuvchanlikni (400 Tbit/s gacha) ta'minlaydi va kechikish ham eng past. Simsiz tizimlar orasida **5G NR mmWave** eng yuqori spektral samaradorlikka ega, ammo qisqa qamrov masofasi (100–200 metr) uni hozircha asosan shaharlarda qo‘llash bilan cheklaydi [24].

Amaliy qo‘llanmalar

IoT va M2M aloqasi

Narsalar interneti (IoT) qurilmalari asosan past quvvatli, past tezlikli, lekin keng qamrovli protokollarni talab qiladi. LoRaWAN (chirpspread modulyatsiya), NB-IoT (Narrowband LTE) va Zigbee (IEEE 802.15.4) bu talablarni qondiradi. LoRaWAN 10–15 km masofada 250 bit/s — 50 kbit/s tezlikda ishlaydi va batareyasi 10 yilgacha chidaydi [25].

Kosmik va uzoq masofali aloqa

Kosmik aloqada signal kuchsizligi va katta kechikish (Mars–Yer: 3–22 daqiqa) tufayli BPSK/QPSK va kuchli xatolik tuzatish kodlari (Reed-Solomon + Viterbi konvolyusion kod —’concatenated coding‘) qo‘llaniladi. Deep Space Network (DSN) 70 metrli antennalar bilan Voyager 2 dan 19 bit/s tezlikda ma'lumot qabul qiladi [26].

6G — keyingi avlod tizimlar

6G standartlari (2030-yilga rejalashtirilgan) teragerts (THz) diapazonida ishlashni, semantik kommunikatsiyani va sun'iy intellekt bilan integratsiyani ko‘zda tutadi. Nazariy o‘tkazuvchanlik 1 Tbit/s gacha yetishi kutilmoqda [27].

Xulosa

Ushbu tadqiqot raqamli ma'lumotlarni uzatishning asosiy usullarini — modulyatsiya sxemalaridan tortib zamonaviy 5G va optik tizimlargacha — keng qamrovli tahlil etdi. Asosiy xulosalar:

Shannon chegarasi uzatish tizimlarining nazariy chegarasini belgilab beradi; LDPC va Turbo kodlar bu chegaraga 0.1–0.5 dB ichida yaqinlashishga erishadi. QAM modulyatsiya spektral samaradorligi jihatidan eng yuqori sxema bo‘lib, 1024-QAM da 10 bit/simvol uzatiladi, ammo yuqori SNR talab qiladi. OFDM multipath tarqalishiga chidamliligi va MIMO bilan birlashganda spektral samaradorligi tufayli 4G/5G/Wi-Fi standartlarining asosi bo‘ldi. Optik tolali DWDM tizimi 400 Tbit/s gacha o‘tkazuvchanlik bilan barcha simsiz texnologiyalardan ustun turadi. 6G tizimlar uchun THz diapazonida ishlash, sun'iy intellekt bilan integratsiya va semantik kommunikatsiya — kelajak tadqiqotlarining asosiy yo‘nalishlari hisoblanadi.

Ushbu natijalar zamonaviy telekommunikatsiya tarmoqlarini loyihalashda, shu jumladan O‘zbekiston milliy 5G infratuzilmasini rivojlantirishda amaliy ahamiyat kasb etadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

[1] Cisco Annual Internet Report (2022–2027). Cisco Systems, Inc. White Paper. 2022. 35 p.

[2] Haykin, S. (2001). Communication Systems, 4th ed. John Wiley & Sons. 816

[3] Nyquist, H. (1928). Certain Topics in Telegraph Transmission Theory. Transactions of the AIEE, 47(2), 617–644.

[4] Shannon, C.E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal, 27(3), 379–423.

[5] Berrou, C., Glavieux, A., Thitimajshima, P. (1993). Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes. Proc. ICC, 1064–1070.

[6] Proakis, J.G., Salehi, M. (2008). Digital Communications, 5th ed. McGraw-Hill. 1103 p.

[7] Sklar, B. (2017). Digital Communications: Fundamentals and Applications, 2nd ed. Prentice Hall. 1079 p.

[8] Agrawal, G.P. (2019). Fiber-Optic Communication Systems, 6th ed. John Wiley & Sons. 692 p.

[9] Couch, L.W. (2013). Digital and Analog Communication Systems, 8th ed. Pearson. 768 p.

[10] Simon, M.K., Alouini, M.S. (2005). Digital Communication over Fading Channels, 2nd ed. IEEE Press. 900 p.

[11] Webb, W., Hanzo, L. (1994). Modern Quadrature Amplitude Modulation. IEEE Press & Pentech Press. 549 p.

[12] 3GPP TS 38.214 V17.0.0 (2021-12). NR; Physical layer procedures for data. 3rd Generation Partnership Project.

[13] Nee, R., Prasad, R. (2000). OFDM for Wireless Multimedia Communications. Artech House. 260 p.

[14] Stuber, G.L. et al. (2004). Broadband MIMO-OFDM Wireless Communications. Proceedings of the IEEE, 92(2), 271–294.

[15] Dahlman, E., Parkvall, S., Skold, J. (2020). 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology, 2nd ed. Academic Press. 564 p.

[16] Rappaport, T.S. (2002). Wireless Communications: Principles and Practice, 2nd ed. Prentice Hall. 736 p.

[17] Paulraj, A., Nabar, R., Gore, D. (2003). Introduction to Space-Time Wireless Communications. Cambridge University Press. 292 p.

[18] Lu, L. et al. (2014). An overview of massive MIMO: Benefits and challenges. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 8(5), 742–758.

[19] Hamming, R.W. (1950). Error detecting and error correcting codes. Bell System Technical Journal, 29(2), 147–160.

[20] Reed, I.S., Solomon, G. (1960). Polynomial Codes Over Certain Finite Fields. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, 8(2), 300–304.

[21] Gallager, R.G. (1962). Low-density parity-check codes. IRE Transactions on Information Theory, 8(1), 21–28.

[22] Goldsmith, A. (2005). Wireless Communications. Cambridge University Press. 570 p.

[23] Tse, D., Viswanath, P. (2005). Fundamentals of Wireless Communication. Cambridge University Press. 571 p.

[24] IMT-2020 (5G) Guidelines. ITU-R M.2083-0. Recommendation, 2015. International Telecommunication Union.