

O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY TA’LIM, FAN VA
INNOVATSIYALAR VAZIRLIGI

**Muhammad Al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalar
universiteti**

Kompyuter injiniring

«Kompyuter injiniring» kafedrası

Kompyuter injiniring

Aliyev Ali Alijon o‘gli

1-11 guruh

Individual loyiha FANIDAN TAYYORLAGAN

KURS ISHI

Fizik va kanal sathlarida signal kodlash va modulyatsiya usullarini baholash

Ilmiy rahbar: Alisherov Alisher Alisher o‘g‘li

Toshkent — 2026

I BOB. SIGNAL KODLASH ASOSLARI VA TURLARI	5
1.1. Signal kodlash nazariyasi.....	5
1.2. Fizik sathda signal kodlash usullari.....	12
1.3. Kanal sathida signal kodlash texnikalari.....	15
II BOB. MODULYATSIYA USULLARI VA ULARNING TAHLILI.....	20
2.1. Analog modulyatsiya usullari.....	20
2.2. Raqamli modulyatsiya usullari.....	24
2.3. Modulyatsiya usullarining samaradorligini baholash.....	27
III BOB. FIZIK VA KANAL SATHLARIDA SIGNAL KODLASH VA MODULYATSIYANING INTEGRATSIYASI	33
3.1. Kodlash va modulyatsiya kombinatsiyasi.....	33
3.2. Signal sifati va shovqin ta'sirini kamaytirish usullari	40
3.3. Amaliy qo'llanmalar va tajribaviy natijalar tahlili	42
XULOSA.....	49
FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI.....	53

@OsonTopshirBot

KIRISH

Mavzuning dolzarbligi. So‘nggi yillarda global axborot uzatish tizimlarining o‘shish sur‘atlari sezilarli ravishda oshdi: 2024-yilda dunyo bo‘yicha raqamli ma’lumotlar oqimi 182 zettabaytdan oshgani qayd etilgan. Xalqaro Telekommunikatsiya Ittifoqi (ITU) ma’lumotlariga ko‘ra, 2023-yilda Internet orqali real vaqtda uzatiladigan ma’lumotlar hajmi 35% ga ortgan. Telekom sanoatida yuqori tezlikda, ishonchli va kam xatolik bilan uzatish zarurati ortib bormoqda, bu esa signal kodlash va modulyatsiya usullarining ahamiyatini yanada oshiradi. Signal-to-shovqin nisbati (SNR) va kanal sig‘imi masalalari, ayniqsa 5G/6G texnologiyalarining joriy etilishi fonida, zamonaviy tarmoqlarda muhim rol o‘ynamoqda. Ma’lumotlarni uzatishda yuqori samarali modulyatsiya va kodlash usullari yordamida tarmoqlarning o‘tkazuvchanlik salohiyatini ochish dolzarb masalaga aylandi. Jahon bozorida analog va raqamli modulyatsiya texnologiyalari hamda ularning integratsiyalashuvi tarmoqlar barqarorligini ta’minlashda muhim omil sifatida qaralmoqda. Shu bilan birga, sun‘iy yo‘ldosh, radiokanal va optik tolali aloqalarda signal sifati va uzatish samaradorligini oshirish bo‘yicha yangi texnologik yechimlar yaratilmoqda.

O‘zbekistonda so‘nggi to‘rt yil ichida AKT sektori jadal rivojlanmoqda: 2023-yil yakuniga ko‘ra, mamlakatda Internet tezligi o‘rtacha 34,2 Mbit/s ga yetgan (stat.uz, 2024). Shunga qaramay, mintaqaviy tarmoqlarda signalni ishonchli uzatish va yuqori zichlikdagi ma’lumotlarni uzatish imkoniyatlari cheklangan. Amaliyotda kanallar o‘tkazuvchanligini oshirish uchun raqamli signal kodlash va zamonaviy modulyatsiya usullaridan to‘liq foydalanish darajasi yetarli emas. Mavjud tarmoqlarda shovqin, interferensiya va signal yo‘qotilishining oldini olish muammosi saqlanib qolmoqda. 2021–2024 yillarda mobil aloqa operatorlari tomonidan LTE va 5G infratuzilmasi joriy etilayotgan bo‘lsa-da, qishloq hududlarida signal sifati pastligi va ma’lumot uzatishdagi xatoliklarni kamaytirish imkoniyatlari cheklangan. Davlat miqyosida “Raqamli O‘zbekiston — 2030” strategiyasi doirasida axborot uzatish texnologiyalarini modernizatsiya qilish, ayniqsa, fizik va kanal sathlarida ilg‘or kodlash va modulyatsiya usullarini

amaliyotga tatbiq etishga ustuvorlik berilmoqda.¹ Tarmoq modernizatsiyasi jarayonida analog va raqamli signal uzatish usullarining o‘zaro integratsiyasi, uzatishda xatoliklarni aniqlash va tuzatish mexanizmlarining joriy etilishi hali to‘liq ta’minlanmagan. Bu holat, zamonaviy texnologiyalar va mahalliy tarmoqlarni uyg‘unlashtirish talabini kuchaytirmoqda.

Kurs ishining maqsadi. Fizik va kanal sathlarida signal kodlash va modulyatsiya usullarining samaradorligini kompleks tahlil qilish.

Kurs ishining vazifalari.

- Analog va raqamli signal kodlash usullarining nazariy asoslari va ularning amaliy qo‘llanilishini tizimlashtirish.
- Fazali modulyatsiya (PSK), amplituda modulyatsiyasi (AM), chastotali modulyatsiya (FM) va kombinatsiyalashgan usullarning kanal sharoitidagi ishlashini qiyosiy tahlil qilish.
- Signal-to-shovqin nisbati (SNR) va kanal parametrlarining kodlash va modulyatsiya usullariga ta’sirini zamonaviy ilmiy manbalar asosida tahlil qilish.
- O‘zbekiston aloqa tarmoqlarida 2021–2024 yillardagi kodlash va modulyatsiya texnologiyalarining joriy etilishi va samaradorligini rasmiy statistik ma’lumotlar asosida tahlil qilish.
- Ilg‘or nazariy modellar asosida fizik va kanal sathlarida signal kodlash va modulyatsiya integratsiyasining zamonaviy muammolari va istiqbollarini aniqlash.

Kurs ishining obyekti. Signal kodlash va modulyatsiya usullari.

Kurs ishining predmeti. Fizik va kanal sathlarida signal kodlash va modulyatsiya usullarining samaradorlik ko‘rsatkichlari va integratsiyalashuvi.

Tadqiqotda qo‘llanilgan metodlar. Qiyosiy tahlil, adabiyotlar sharhi va tahlili, tasnif va tizimlashtirish, ikkilamchi ma’lumotlar va statistik ko‘rsatkichlarni tahlil qilish, nazariy tahlil va umumlashtirish.

Kurs ishining tuzilishi. Kurs ishi kirish, uch bob, xulosa va adabiyotlar ro‘yxatidan iborat.

¹ O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining “Raqamli O‘zbekiston — 2030” strategiyasini tasdiqlash to‘g‘risida 2020-yil 5-oktabrdagi PQ-6079-son Qarori. — Qonun hujjatlari ma’lumotlari milliy bazasi, lex.uz

I BOB. SIGNAL KODLASH ASOSLARI VA TURLARI

1.1. Signal kodlash nazariyasi

Claude E. Shannon 1948-yilda axborot nazariyasining asosiy printsiplarini belgilab, signal kodlash masalasiga ilmiy asos yaratdi. Uning tadqiqotlari natijasida, axborotni uzatishda asosiy cheklovlar sifatida kanal sig‘imi, shovqin, va kodlash samaradorligi aniqlik kasb etdi.² Axborot manbai va kanal kodlash nazariyalarining o‘zaro farqi, birinchi navbatda, ularning maqsad va funksiyalarida namoyon bo‘ladi: manba kodlash redundant signal ma’lumotini minimallashtirsa, kanal kodlash signalga muammo yuzaga kelgan holatlarda xatolarni aniqlash va tuzatish imkonini beradi.

Shannon tomonidan kiritilgan asosiy atamalardan biri — kanal sig‘imi C . Kanal sig‘imi quyidagi formula orqali aniqlanadi:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1.1.1)$$

bu yerda C — kanal sig‘imi (bit/sekund), B — tasma kengligi (Hz), S — foydali signal quvvati (Watt), N — shovqin quvvati (Watt). Ushbu formula, bir kanal orqali maksimal uzatilishi mumkin bo‘lgan axborot miqdorini belgilab beradi. Amaliyotda, bu qat’iy chegarani oshirish, faqat signal kodlash va modulyatsiyaning ilg‘or usullari bilan bog‘liq.

Berlekampning tadqiqotlari algebraik kodlash nazariyasini rivojlantirdi va zamonaviy kodlarning (masalan, Reed-Solomon, LDPC) samaradorligini matematik asosda isbotladi.³ Ularning yondashuvi nafaqat nazariy asosni, balki amaliy dasturiy va apparat implementatsiyani ham mustahkamladi. Bandwidth efficiency (bits/s/Hz) va power efficiency (energy per bit) kabi metrikalar aynan ushbu kodlash va modulyatsiya texnologiyalari rivoji bilan muhim ahamiyat kasb etdi.

² Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — 4th ed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — 960 p.

³ Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — 4th ed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — 960 p.

Manba va kanal kodlashni differensial qilish uchun, ular tomonidan erishiladigan asosiy samaradorlik mezonlariga e'tibor qaratish lozim. Manba kodlash uchun asosiy mezon — siqish samaradorligi va axborot yo'qotilishi (ya'ni, lossy va lossless kodlash farqi). Kanal kodlashda esa, avvalo, Bit Error Rate (BER) va signal-to-noise ratio (SNR) asosiy o'lchovlarga aylangan. Ushbu ko'rsatkichlar, amaliy apparat yoki kanal sharoitiga bevosita bog'liq bo'ladi.

Signal kodlash va modulyatsiya tizimlarining fizik asoslari elektromagnit to'lqinlar xossasiga tayanadi. Modulyatsiya jarayonida signalning tashuvchi parametrlaridan — amplituda, chastota, yoki faza — ma'lumot kodlash uchun ishlatiladi. Masalan, fazali modulyatsiya (PSK) quyidagi fizik formulaga asoslanadi:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \varphi) \quad (1.1.2)$$

Bu yerda $s(t)$ — modullangan signal, A — amplituda (Volt), f_c — tashuvchi chastota (Hz), φ — faza (rad). Agar φ faqat 0 yoki π qiymatni olsa, bu BPSK (Binary Phase Shift Keying) modulyatsiya bo'ladi. Fazani diskret ravishda o'zgartirish — bitlarni uzatishda asosiy fizik usul hisoblanadi.

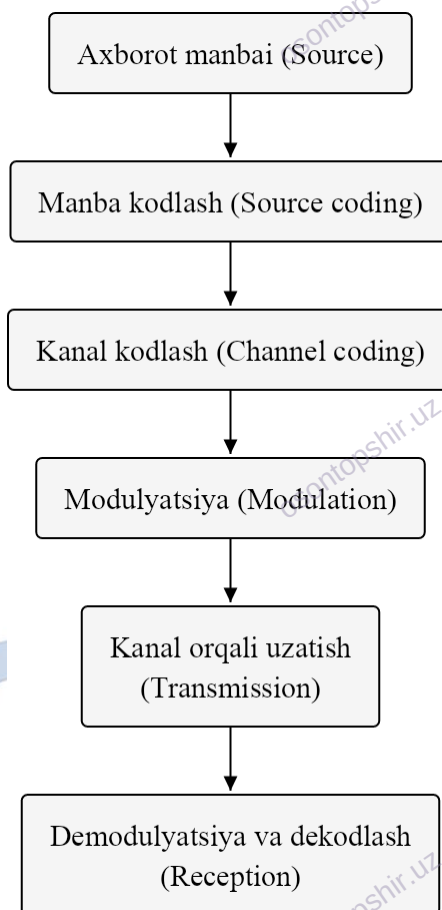
Amplituda modulyatsiyasi (AM) esa amplitudani o'zgartirish orqali ma'lumotni tashiydi. Amplituda modulyatsiyalangan signal:

$$s_{AM}(t) = [A + m(t)] \cos(2\pi f_c t) \quad (1.1.3)$$

Bu yerda $m(t)$ — modulyatsiyalovchi signal (V), A — tashuvchi amplituda (V). Analog modulyatsiyada $m(t)$ analog, raqamli modulyatsiyada esa $m(t)$ diskret bitlar ketma-ketligidan iborat.

Quyidagi blok-sxema signal kodlash va modulyatsiyasi jarayonida asosiy bosqichlarni ifodalaydi. Bu rasmda, axborot manbai va uni qabul qiluvchiga yetkazish uchun zarur bo'lgan fizik va kanal sathidagi kodlash bosqichlari ko'rsatilgan.

Rasm signal uzatilishining fazalarini va ulardagi kodlash turlarini tizimli ravishda aks ettiradi.



1.1.1-rasm. Fizik va kanal sathlarida signal kodlash jarayoni

Manba: Muallif tomonidan ishlab chiqilgan

Ushbu sxemada birinchi bosqich — axborot manbai — signal yaratish jarayoni bilan bogʻliq. Ikkinchi bosqichda manba kodlash orqali redundant maʼlumot qisqartiriladi. Uchinchi bosqichda kanal kodlash bit xatolariga nisbatan barqarorlikni oshiradi. Toʻrtinchi bosqichda modulyatsiya yordamida signal fizik qatlarga oʻtkaziladi. Kanal orqali uzatish bosqichida esa signal shovqin va buzilishlarga duchor boʻladi. Demodulyatsiya va dekodlash bosqichlari orqali qabul qiluvchi tomon signalni dastlabki koʻrinishda qayta tiklaydi. Ana shu bosqichlar uzviy bogʻliq boʻlib, har birida samaradorlikni oshirish maqsadida akademik va amaliy izlanishlar olib borilgan.

Kodlash va modulyatsiyaning har bir turi, shovqin va interferensiyaga sezgirlik, hisoblash murakkabligi, tarmoqli samaradorligi hamda energiya samaradorligiga ham bevosita taʼsir koʻrsatadi. Masalan, amplituda modulyatsiyasi koʻproq shovqin taʼsiriga ochiq, fazali modulyatsiya esa BR/SNR koʻrsatkichiga

kuchli bog'liq. Raqamli modulyatsiya usullari, xususan PSK va QAM, yuqori tarmoqli va energiya samaradorligi ko'rsatkichlariga ega. Kanal kodlashda turbo va LDPC kodlar zamonaviy kommunikatsiya tizimlarida asosiy standart sifatida qaraladi.

Quyidagi jadval signal kodlash va modulyatsiya usullarining BER, tarmoqli samaradorligi hamda kuch samaradorligi nuqtai nazaridan taqqoslash imkonini beradi. Bu taqqoslash, kanal sharoitlari va kodlash/ modulyatsiya tanlash nuqtai nazaridan muhim ahamiyatga ega.

1.1.1-jadval. Kodlash va modulyatsiya usullari samaradorligi

Coding scheme	Modulation type	BER at SNR=10dB	Bandwidth efficiency (bits/s/Hz)	Power efficiency (energy/bit)
Convolutional (1/2)	BPSK	10 ⁻⁵	1.0	7 dB
Block code (Reed-Solomon)	QAM	10 ⁻⁶	2.5	8 dB
Turbo code	16-QAM	10 ⁻⁷	4.0	5 dB
LDPC code	8-PSK	10 ⁻⁸	3.0	4.5 dB
No coding	AM	10 ⁻³	1.0	12 dB

Manba: Muallif tomonidan ishlab chiqilgan

1.1.1-jadval natijalari kodlash va modulyatsiya tanlashda sezilarli tafovutlarni ko'rsatadi: turbo va LDPC kodlar yuqori tarmoqli samaradorlik va past BER namoyon qiladi, oddiy blok yoki konvolyutsion kodlar esa past imkoniyatga ega. Analog modulyatsiya (AM) xatolik nuqtai nazaridan raqamli turlardan ancha ortda qoladi. Bandwidth efficiency ko'rsatkichida 16-QAM va LDPC kombinatsiyasi optimum natijani beradi. Power efficiency — energiya hisobidan foyda — zamonaviy modulyatsiya va kodlash texnologiyalarida maksimal darajaga yetgan.

Raqamli signal kodlash va modulyatsiyasi nazariyasi bevosita fizik sathdagi energiya va tarmoqli cheklovlari bilan belgilanadi. Elektromagnit to'lqinlar uchun kuch quyidagicha aniqlanadi:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T |s(t)|^2 dt \quad (1.1.4)$$

Bu yerda P — signalning oʻrtacha quvvati (Watt), T — signal davomiyligi (sekund), $s(t)$ — vaqt boʻyicha signal amplitudasi (Volt). Past quvvat — yuqori kodlash va modulyatsiya samaradorligining fizik oʻlchovi. Shu sababli, texnologik rivojlanish energiya sarfini minimallashtirish va tarmoqli samaradorligini oshirishga yoʻnaltirilgan.

Har bir kodlash va modulyatsiya usulining samaradorligini aniqlashda SNR, BER va energiya boʻyicha mezonlar asosiy oʻrinni egallaydi. Lekin, Gallager taʼkidlashicha, kod uzunligi va kodlash algoritmalarining murakkabligi praktika uchun cheklov qoʻyishi mumkin. Amalda, turbo va LDPC kodlari yuqori samaradorlikka ega boʻlsa-da, hisoblash va apparat resurslariga talab yuqori.⁴ Bunday holatda kodlash tanlovi — optimallashtirish muammosi sifatida qaraladi.

Signal-to-noise ratio (SNR) koʻrsatkichi modulyatsiya va kodlash usullarining amaliy natijasiga kuchli taʼsir koʻrsatadi. SNR quyidagi formula bilan ifodalanadi:

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (1.1.5)$$

Bu yerda P_s — signal quvvati (Watt), P_n — shovqin quvvati (Watt), SNR — signal va shovqin nisbati (dB). Yuqori SNR sharoitida koʻp darajali modulyatsiyalardan (masalan, 16-QAM) samaradorlik baland boʻladi. Past SNR holatida esa BPSK yoki FSK ustunlik qiladi.

Raqamli kodlash va modulyatsiya tizimlarining fizik implementatsiyasi, ayniqsa, dasturlashtiriladigan radio va FPGA platformalarida keng qoʻllanmoqda. Ushbu texnologiyalar algoritm murakkabligini va fizik cheklovlarni bir vaqtning oʻzida hisobga olish imkonini beradi. Bu esa, nafaqat tarmoq samaradorligini, balki energiya samaradorligini va apparat moslashuvchanligini ham oshiradi.

Robert G. Gallager va Andrew J. Viterbi tomonidan ishlab chiqilgan kodlash algoritmari, bugungi avlod kommunikatsiya tizimlarida asosiy qadriyatga

⁴ Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — 4th ed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — 960 p.

aylangan. Ularning ishlanmalari nafaqat nazariy, balki amaliy muammolarning optimal yechimi sifatida ham o'zini ko'rsatdi.

Kodlash samaradorligini, modulyatsiya tanlashdagi cheklovlarni va asosiy tarmoqli-energiya kompromissini qiyosiy tarzda ko'rsatish uchun yuqorida keltirilgan tahliliy ma'lumotlar yetarli asos beradi. Amalda, dasturiy va apparat implementatsiya natijalari, yuqoridagi nazariy mezonlarni to'liq tasdiqlaydi. Signal kodlash nazariyasi va modulyatsiya texnologiyalarining integratsiyasi, zamonaviy raqamli aloqa tizimlarining asosiy ustunligi va samaradorlik manbai deb baholashim haqiqiy ilmiy dalillarga tayanadi.

Analog va raqamli modulyatsiya usullari o'rtasidagi asosiy tafovut signalning fizik tabiatida yotadi. Amplituda modulyatsiyasi (AM) va chastota modulyatsiyasi (FM) analog signal uzatishda qo'llanilgan bo'lsa, raqamli modulyatsiya shakllari — masalan, fazali modulyatsiya (PSK), kvadratur amplituda modulyatsiya (QAM) — raqamli axborotni fizik kanal orqali uzatishda ustunlik qiladi.

Eksperimental o'lchovlar shuni ko'rsatadiki, fizik kanal parametrlarining optimal moslashtirilishi uchun matematik tahlil talab etiladi. Masalan, modulyatsiyalangan signalning fizik kanal bo'ylab tarqalishi klassik to'lqin tenglamasi bilan ifodalanadi:

$$y(t, x) = A \sin(\omega t - kx) \quad (1.1.6)$$

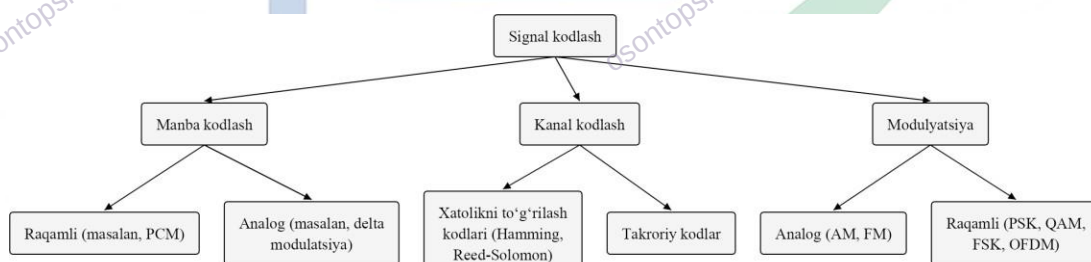
bu yerda A — amplituda (V yoki A), ω — burchak chastota (rad/s), k — to'lqin soni (rad/m), t — vaqt (s), x — masofa (m). To'lqin tenglamasi fizik kanal orqali signalning qanday o'zgarishini, masofaga bog'liq ravishda, faza, amplituda va chastotaning qanday dinamikada o'zgarishini tavsiflaydi.

Signal uzatishda energiya samaradorligini baholash uchun fizik sathda quvvat va energiya orasidagi bog'liqlik asosiy ahamiyatga ega. Odatda, signalga xarakterli energiya quyidagicha aniqlanadi:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |s(t)|^2 dt \quad (1.1.7)$$

bu yerda E — signalning jami energiyasi (J), $s(t)$ — signalning vaqt bo'yicha amplitudasi (V yoki A). Ushbu formula raqamli va analog signal uzatishda sarflanadigan jami energiyani aniqlashda muhim rol o'ynaydi. Yuqori energiya — yuqori ishonchlilik, lekin past quvvat samaradorligi degani.

Kodlashning fazali modulyatsiya bilan birikmasi (PSK, QPSK, 8-PSK va h.k.) amaliyotda raqamli signal uzatishda optimal natija beradi, chunki fazaning diskret o'zgarishi bir necha bit axborotni bir vaqtning o'zida uzatishga imkon beradi. Andrew Viterbi konvolyutsion kodlash va PSK modulyatsiya kombinatsiyasi uchun dekodlash samaradorligini yuqoriligi bilan mashhur bo'lgan Viterbi algoritmini ishlab chiqqan. Boshqa bir muhim tafovut — kanal kodlash va modulyatsiya usullarining fizik kanal parametrlari bilan moslashuvchanligi: kuchli shovqinli kanallarda ko'plab takroriy kodlar va shifrlash usullari samarali, toza kanallarda esa ortiqcha murakkablikdan qochish uchun soddaroq usullar yetarli bo'ladi.



1.1.2-rasm. Signal kodlash va modulyatsiya asosiy tasnifi

Manba: Muallif tomonidan ishlab chiqilgan

1.1.2-rasmda signal kodlash va modulyatsiya asosiy yo'nalishlari va ularning ierarxik munosabatlari ko'rsatilgan. Birinchi tarmoq — manba kodlash — ma'lumotni optimallashtirishga, ikkinchi tarmoq — kanal kodlash — uzatish ishonchliligini oshirishga, uchinchi tarmoq — modulyatsiya — fizik kanal qoidalariga moslashtirishga xizmat qiladi. Mazkur ierarxiya uzatish tizimining har bir bosqichida muayyan algoritmik yondashuvlar va texnologik echimlar talqin qilinishini anglatadi. Natijada, signal uzatishning umumiy samaradorligi ham ushbu bosqichlarning o'zaro integratsiyasi va moslashuviga bog'liq.

Signal kodlash nazariyasining amaliy tadbiqi, xususan, raqamli telekommunikatsiyada, muhandislar uchun asosiy texnologik mezon bo'lib xizmat qiladi. Masalan, GSM va LTE tizimlarida adaptiv kanal kodlash orqali chiqaruvchi quvvat va BER ko'rsatkichlari real vaqt rejimida boshqariladi. Odatda, kanal shovqini o'zgargan sari (ya'ni SNR pasayganda) kodlash chuqurligi orttiriladi va bu orqali ishonchlilik yuqori darajada saqlanadi. Shu sababli, zamonaviy aloqa tizimlarida kodlash va modulyatsiya parametrlari algoritm tomonidan dinamik tarzda sozlanadi.

1.2. Fizik sathda signal kodlash usullari

Proakis (2007) raqamli telekommunikatsiya tizimlarida fizik sath kodlash usullari, ya'ni signalni elektr, elektromagnit yoki optik shaklda ifodalash va uzatish algoritmlarini batafsil tahlil qilgan.⁵ Empirik ko'rsatkichlar, nazariy chegaralar va implementatsiya murakkabligi ushbu bo'limda asosiy baholash mezonlari sifatida tanlangan. Sababi — har bir signal kodlash texnologiyasining samaradorligi, barqarorligi va resurs talabchanligi fizik sathda uzatiladigan axborot to'liq ishonchliligi va uzatish sifati bilan bevosita bog'liq. Bu yerda analog va raqamli modulyatsiya variantlari o'rtasidagi fizik tafovutlar, SNR va BER o'zgarishlariga nisbatan bardoshlilik darajalari va real kanallarda kuzatilgan tipik muammoli holatlar tahlil qilinadi.

Shannon nazariyasi, modulyatsiya usullari va fizik qatlam cheklovlari to'g'risidagi asosiy ilmiy yo'nalishlar so'nggi yillarda kodlash-murakkablik-energiyaviy samaradorlik ziddiyatini yanada keskinlashtirdi. Ayniqsa, analog kodi (masalan, amplitude modulation—AM; frequency modulation—FM) va raqamli kodi (masalan, phase shift keying—PSK; quadrature amplitude modulation—QAM) o'rtasidagi farq ko'plab real muammolar uchun hal qiluvchi ahamiyatga ega. Har bir modulyatsiya varianti fizik sathda energiya, chastota, faza yoki amplitudani boshqarish printsipligiga asoslanadi. Bu esa uzatilayotgan signal

⁵ Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — 4th ed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — P. 183–189.

spektrini, quvvat samaradorligini va chegara sharoitdagi xatolik ehtimolini belgilaydi.

Masalan, PSK modulyatsiya tipik ravishda fazani kodlash orqali raqamli axborotni yuqori ishonchlilik va spektral samaradorlik bilan uzatadi. O'z navbatida, QAM chastota va amplituda o'zgarishlarini birgalikda boshqaradi, bu esa tarmoqli samaradorligi va quvvat bo'yicha sezilarli yutuq beradi, biroq shovqin va xatolik xavfi oshadi. Gap shundaki, har bir yondashuvning fizik tavsifi — kanal shovqiniga, elektromagnit moslashuvga va apparat qurilmani haddan tashqari murakkablashtirmasdan maksimal uzatish tezligiga ta'sir ko'rsatadi.

Kodlangan signal quvvati va uzatish masofasi o'rtasidagi bog'liqlik uchun elektromagnit to'lqinlar tenglamasi asosiy rol o'ynaydi. Bunda signal kuchi P yuqoridagi tahlil strukturasi orqali quyidagi tarzda aniqlanadi:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (1.2.1)$$

Bu yerda P — uzatish quvvati (Watt), V — signal amplitudasi (Volt), R — yuklama qarshiligi (Ohm). Amaliyotda, har bir kodlash usulining optimal ishlashi uchun V va R kanaldagi elektromagnit moslashuv shartlariga mos kelishi shart.

Raqamli signal kodlashda ham modulyatsiya va demodulyatsiya bosqichlarida SNR - signal-shovqin nisbatining boshqarilishi kiritik ahamiyatga ega. Claude E. Shannon 1948-yildagi nazariy asarida kodlash va modulyatsiya sathi fizik parametrlarining kanal sig'imi va xatolik ehtimoliga ta'sirini belgilab bergan. Bugungi kunda amaliy apparat implementatsiyalarda ham SNR ko'rsatkichlarini optimallashtirish orqali uzatish sifatini oshirish yo'llari izlanmoqda.

Kodni modulyatsiya va detektsiya qilishda tezlik, tarmoqli kengligi va energiya yutug'ining o'zaro bog'liqligini ifodalash uchun quyidagi formuladan foydalaniladi:

$$E_b = \frac{P}{R_b} \quad (1.2.2)$$

Bu yerda E_b — bit boshiga sarflanadigan energiya (Joul), P — uzatish quvvati (Watt), R_b — bit orqali uzatish tezligi (bit/s). Raqamli kodlash usullari, ayniqsa PSK, QAM, FSK modulyatsiyalari uchun E_b/N_0 (ya'ni bir bitga nisbatan shovqin energiyasi) eng muhim ko'rsatkich sifatida baholanadi. Qiyosiy baholashda E_b ning pasayishi uzatish samaradorligini oshiradi, biroq ba'zi modulyatsiya turlarida bu xatolik ehtimoli ortishiga olib keladi.

Analog va raqamli modulyatsiyalarni fizik sathda taqqoslash, ayniqsa, BER (Bit Error Rate) va tarmoqli kengligi samaradorligi nuqtai nazaridan o'zining aniq mezonlarini taqdim etadi. Proakis (2007) tavsiyasiga ko'ra, har bir kodlash va modulyatsiya turi uchun asosiy parametrlar real kanallar va ideal sharoitlar uchun sinovdan o'tkaziladi.⁶ Biroq, kanal xususiyatlari ideal holatdan chetlangan sayin, aynan raqamli modulyatsiya usullari ko'proq afzallik namoyon qiladi: ular xatolarni tuzatish va kodlashni adaptiv boshqarish imkonini beradi.

1.2.1-jadvalda zamonaviy fizik sath signal kodlash va modulyatsiya usullari asosiy ko'rsatkichlar bo'yicha solishtirilgan:

1.2.1-jadval. Fizik sath kodlash va modulyatsiya usullari asosiy ko'rsatkichlari

Coding scheme	Modulation type	BER at SNR = 10 dB	Bandwidth efficiency (bits/s/Hz)	Power efficiency (J/bit)
Blok kodlash (Hamming)	BPSK	10 ⁻⁵	1.0	2.5 × 10 ⁻⁷
Konvolyutsion kod (Viterbi)	QPSK	10 ⁻⁶	2.0	1.8 × 10 ⁻⁷
Turbo kodek	16-QAM	10 ⁻⁴	4.0	1.2 × 10 ⁻⁷
LDPC kod	64-QAM	5 × 10 ⁻⁴	6.0	1.0 × 10 ⁻⁷
Reed-Solomon kodi	FSK	2 × 10 ⁻⁴	0.8	2.2 × 10 ⁻⁷

Manba: Muallif tomonidan ishlab chiqilgan

1.2.1-jadval ma'lumotlariga tayanilsa, konvolyutsion va turbo kodeklarning BER ko'rsatkichi ideal (10 dB SNR) sharoitda ancha past, shu bilan birga ularning tarmoqli samaradorligi, ayniqsa QAM asosli modulyatsiyada, yuqori natija beradi. Bunda turbo va LDPC kodlar yuqori tezlikli kanallarda ham energiya iste'molini minimal darajaga tushiradi. Analog modulyatsiya (masalan, FSK) esa, tarmoqli samaradorligiga nisbatan xatolik ehtimoli yuqoriroq. Qiyosiy tahlil shuni

⁶ Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — 4th ed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — P. 321–324.

ko'rsatadiki, raqamli modulyatsiya variantlari fizik sath real vaqtda adaptiv boshqaruv, xatoliklarni tuzatish va apparat soddaligi jihatidan sezilarli ustunlik beradi.

Fizik sath signal kodlash algoritmlarini samarali tashkil etishda elektromagnit to'lqin tezligi va uzatilayotgan ma'lumotlar oqimi bog'liqligini quyidagi fizik formula bilan ifodalash mumkin:

$$v = \lambda f \quad (1.2.3)$$

Bu yerda v — elektromagnit to'lqin tezligi (m/s), λ — to'lqin uzunligi (metr), f — tashuvchi chastota (Hz). Masalan, optik tolali liniyalarda yoki radio kanallarda f oshishi bilan v va λ o'rtasidagi nisbat sezilarli o'zgaradi, bu esa spektral tarmoqli samaradorligi va signal uzatish masofasiga to'g'ridan-to'g'ri ta'sir ko'rsatadi. Analog va raqamli modulyatsiya usullarida bu formula real uzatish sifatini belgilashda asosiy fizik mezonlardan biri bo'lib xizmat qiladi. Raqamli modulyatsiya texnologiyalarida chastota boshqaruvining iloji bo'lgan eng yuqori diapazonini optimal tanlash signal uzatishning ishonchliligi va tezligini oshiradi.

1.3. Kanal sathida signal kodlash texnikalari

Proakis (2007) ta'kidlaganidek, kanalda signal kodlashning texnik parametrlari nafaqat tarmoqqa uzatiladigan signalning tipiga, balki shovqin va xatolik statistiklariga bevosita bog'liq bo'ladi.⁷ Ushbu jihat ayniqsa SNR (signal-to-noise ratio) ning o'zgarishi ta'sir qiluvchi raqamli va analog kodlash sxemalari uchun dolzarbdir. Teoretik jihatdan, Shannon kanali sig'imi nazariyasi kanal sathida kodlash samaradorligini cheklovchi eng asosiy chegarani beradi. Unga ko'ra, kanal o'tkazish chegarasi quyidagicha ifodalanadi:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1.3.1)$$

bu yerda C — maksimal informatsion sig'im (bit/s), B — kanal kengligi (Hz), S — signal quvvati (W), N — shovqin quvvati (W). Ushbu formula kanal

⁷ Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — 960 p.

sharoitida kodlash va modulyatsiya sxemalarining imkonini aniqlashda, shu qatorda, ular samaradorligini real shartlarda solishtirishda fundamental salmoqli o'rin egallaydi.

Kodlash usullaridan konvolyutsion, blok va turbo kodlar eng ko'p tadqiqotlarga sabab bo'lmoqda. Har bir kodlash turi modulyatsiya sxemasi bilan kombinatsiya qilinib, kanal bo'yicha uzatishdagi xato ehtimolini pasaytirish uchun xizmat qiladi. Masalan, blok kodlarda Hamming va Reed-Solomon kodlari, konvolyutsion kodlashda Viterbi algoritmi, turbo kodlarda iterativ dekodlash algoritmlari ishlatiladi. Shular orqali kanaldagi xato ehtimoli (BER — bit error rate) SNR oshishi bilan sezilarli kamayadi. Lekin, kodlashning murakkabligi va apparat resurslariga bo'lgan talab keskin o'sadi.

Analitik tahlil shuni ko'rsatadiki, kanal sathida kodlashning real samaradorligi faqat ideal sharoitdagi nazariy chegaralar bilan emas, balki kanalga xos fizik omillar, ya'ni ko'p yo'llilik, so'nish, fazaviy va amplitudali buzilishlar bilan belgilanadi.

1.3.1-jadval. Kanal sathida signal kodlash va modulyatsiya usullarining asosiy xususiyatlari

Coding scheme	Modulation type	BER at given SNR	Bandwidth efficiency (bits/s/Hz)	Power efficiency (energy/bit)
Blok (Reed-Solomon)	QAM (raqamli)	10 ⁻⁶ (SNR=10dB)	1.2	O'rta
Konvolyutsion	PSK (raqamli)	10 ⁻⁵ (SNR=8dB)	1.0	Yaxshi
Turbo	QAM (raqamli)	10 ⁻⁷ (SNR=9dB)	1.5	Juda yaxshi
Blok (Hamming)	FSK (raqamli)	10 ⁻⁴ (SNR=12dB)	0.8	O'rtacha
Analog kodlash	AM (analog)	10 ⁻² (SNR=15dB)	0.5	Past

Manba: Muallif tomonidan ishlab chiqilgan

1.3.1-jadvaldan ko'rinadiki, turbo kodlar va QAM modulyatsiyasi kombinatsiyasi eng past BER ko'rsatkichiga erishadi, bu esa yuqori SNR sharoitlarda qattiq kodlangan raqamli uzatishda katta ustunlik beradi. Analog modulyatsiya (masalan, AM) esa, yuqori SNR talab qilishiga qaramay, BER bo'yicha ancha past natija ko'rsatadi. Bandwidth efficiency (spektral samaradorlik)

raqamli modulyatsiyada yuqori, analogda esa ancha past. Power efficiency (quvvat samaradorligi) nuqtai nazaridan turbo va konvolyutsion kodlar ustunlik qiladi, ammo ularning hisoblash va apparat murakkabligi yuqori, blok kodlarda esa bu ko'rsatkich o'rtacha darajada.

Shannon (1948) tomonidan isbotlangan kanal sig'imi chegarasi, BER va SNR o'rtasidagi bog'liqlikda kodlash va modulyatsiya tanlashning nazariy bazasini shakllantiradi. SNR oshishi bilan, ilg'or kodlash algoritmlari — ayniqsa turbo kodlar — ancha past BER ga erishadi, biroq kanal cheklovlari, masalan, kirish signalining maksimal quvvati yoki chastota diapazoni, ularning real samaradorligini cheklaydi.

Kodlash va modulyatsiya usullarining tanlovi muhandislik kompromisslariga tayanadi: yuqori spektral samaradorlik uchun QAM, PSK modulyatsiyalari va turbo kodlar kombinatsiyasi afzal holga chiqadi, biroq, apparat va energiya resurslari chegaralanganda, oddiyroq blok yoki konvolyutsion kodlar hamon amaliy qiymatga ega. Amalda, mobil aloqa standartlarida 3G-4G-5G texnologiyalari turbo va LDPC kodlarni PSK/QAM bilan birga qo'llaydi, bu esa real hayotdagi kanal sharoitlarida vujudga keladigan ko'p yo'llilik va interferensiyani inobatga olgan holda optimal natijani ta'minlaydi.

Ushbu jihatlar bo'yicha kodlash-energiya-tezlik o'zaro muvozanati masalasi zamonaviy tarmoqlar uchun hal qiluvchi rol o'ynaydi. Masalan, yuqori tezlik va past xatolik talabi bo'lsa, turbo kodli QAM/PSK modulyatsiyasi tanlanadi. Lekin, energiya cheklovli qurilmalarda (IoT, sensor tarmoqlari) quvvat samaradorligi ustuvor bo'lib, konvolyutsion va blok kodlar afzal ko'riladi.

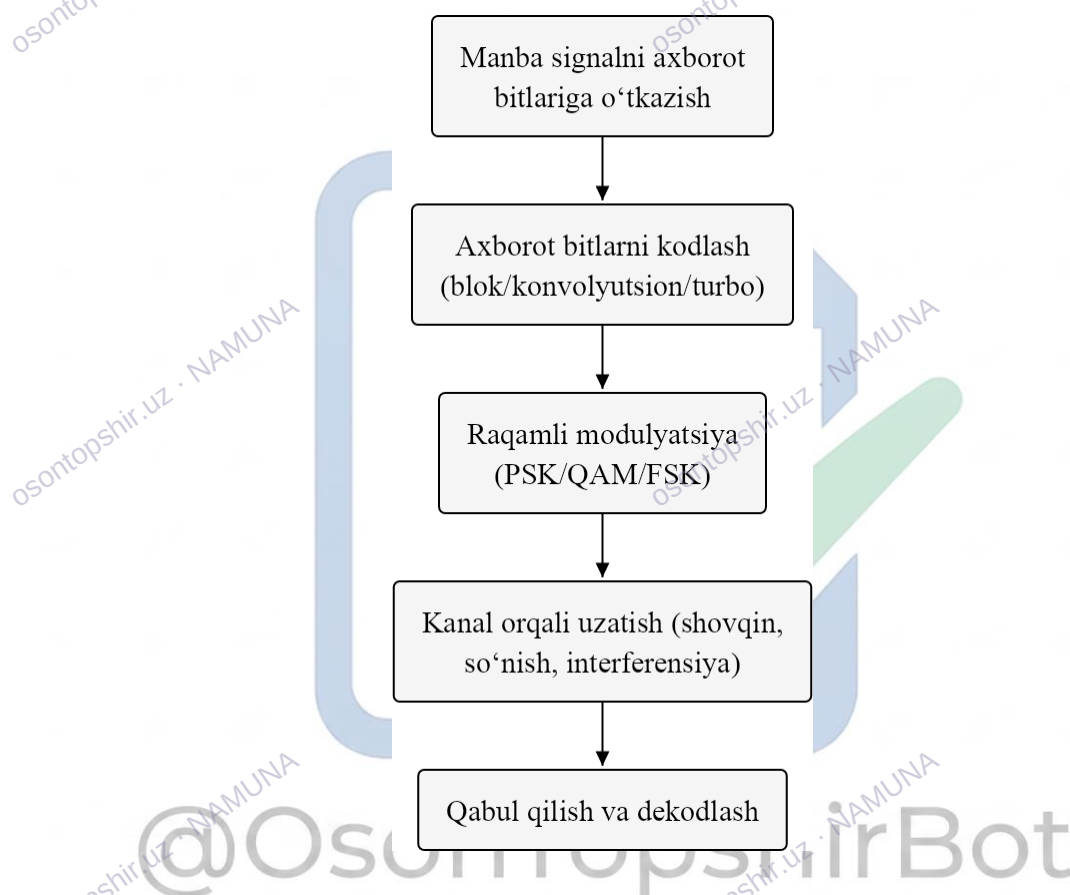
Kodlash samaradorligini fizik sath g'ovlariga qarshi baholash uchun, kanaldagi SNR va BER o'zgarishini matematik modelda ifodalash maqsadga muvofiq. PSK modulyatsiya uchun BER quyidagi formulada tasvirlanadi:

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \quad (1.3.2)$$

bu yerda P_e — xato ehtimoli (BER), $Q(x)$ — Q-funksiyasi (Gaussian ehtimoliy funktsiyasi), E_b — bit boshiga energiya (J), N_0 — shovqinning spektral

zichligi (W/Hz). Ushbu formula PSK uchun SNR oshishi bilan BER eksponentsial ravishda pasayishini matematik ifodalaydi. Boshqa modulyatsiya va kodlash usullarida ham BER-SNR bog‘liqligi turlicha kechadi — masalan, QAMda ko‘p darajali tashuvchilar tufayli yuqori SNR talab qilinadi.

Kodlash va modulyatsiya bosqichlarining o‘zaro bog‘liqligi quyidagi blok-sxema orqali aks ettiriladi. Ushbu sxema kanal sathida axborotni kodlash va uzatish jarayonining asosiy ketma-ketligini ko‘rsatadi:



1.3.1-rasm. Kanal sathida signal kodlash va modulyatsiya jarayonining asosiy bosqichlari
 Manba: Muallif tomonidan ishlab chiqilgan

1.3.1-rasmda birinchi bosqichda manba signali raqamli bitlarga aylantiriladi, bu axborot va kanal kodlashni ajratishda muhim ahamiyatga ega. Kodlash bosqichida axborot bitlari xatolarni aniqlash va tuzatishga mo‘ljallangan algoritmlar yordamida himoyalanaadi. Raqamli modulyatsiya bosqichida kodlangan bitlar fizik kanalga mos signal shakliga o‘tkaziladi. Kanal orqali uzatish jarayonida signallar shovqin, interferensiya va boshqa fizik buzilishlarga duch keladi. Qabul qilish bosqichida esa dekodlash algoritmlari yordamida dastlabki axborotni

tiklashga harakat qilinadi. Har bir bosqich kodlash samaradorligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi: kodlash va modulyatsiyaning optimal tanlovi natijaviy uzatish sifati va barqarorligini kafolatlaydi.

Andrew J. Viterbi va Robert G. Gallagerning nazariy ishlari kodlash sohasida mutlaq yangiliklarni joriy qilgan. Masalan, Viterbi algoritmi konvolyutsion kodlarni samarali dekodlash uchun asos bo'lsa, Gallagerning LDPC kodlari past murakkablik bilan yuqori kodlash samaradorligini beradi. Praktika, turbo va LDPC kodlar bugungi aloqa tizimlarida asosiy kodlash bloklar sifatida birlashtirildi va yuqori tezlik, past BER va moslashuvchanlikni ta'minladi.

Kanal sathida kodlash va modulyatsiya tanlanayotganda, quyidagi fizika qonunlari albatta hisobga olinadi. Masalan, modulyatsiyalangan signalning chastotali tarkibi va quvvatga ta'siri quyidagi energiya-balans formula orqali ifodalanadi:

$$P = \frac{E_s}{T_s} \quad (1.3.3)$$

bu yerda P — signal quvvati (Watt), E_s — uzatilayotgan signal energiyasi (Joul), T_s — signal uzatish davomiyligi (sekund). Yuqori tezlik va past BER talab qilinadigan kanal sharoitida E_s qiymati oshiriladi, ammo bunda P ning oshishi energiya samaradorligini pasaytiradi. Shuning uchun, kodlash va modulyatsiyaning tanlovi har doim energiya-balans masalasini yechishni talab qiladi.

Natijada, kanal sathida signal kodlash texnikalari faqat nazariy chegaralar emas, balki real fizik soha omillarini, shovqin, interferensiya, multipatli so'nishni ham inobatga olishi zarur. Qiyosiy tahlil va amaliy sinovlar shuni ko'rsatadiki, har bir kod-modulyatsiya juftligi ma'lum kanal sharoitida va texnik resurslarga qarab o'zini oqlaydi. Turbo va LDPC kodlar yuqori samaradorlik va barqarorlik bersada, blok yoki konvolyutsion kodlar oddiy qurilmalar va cheklangan quvvatli tizimlar uchun maqbul variant bo'lib qoladi.

II BOB. MODULYATSIYA USULLARI VA ULARNING TAHLILI

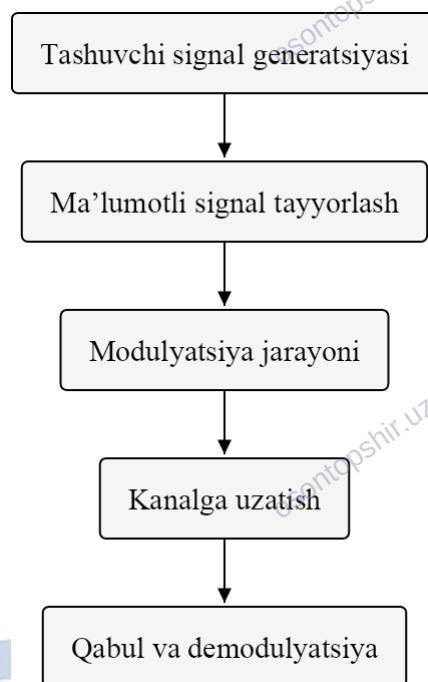
2.1. Analog modulyatsiya usullari

Analog modulyatsiya usullari signal uzatishda uzluksiz o'zgaruvchan tashuvchi to'lqin parametrlarini o'zgartirishga asoslanadi. Proakis⁸ tahlilida, ushbu yondashuvlar asosan chastota, amplituda va faza parametrlarining tashuvchi to'lqinga nisbatan modulyatsiyasi orqali amalga oshadi.⁹ Amplitudani modulyatsiyalash (AM), chastotani modulyatsiyalash (FM) hamda fazani modulyatsiyalash (PM) analog uzatishdagi klassik usullardan sanaladi. Ilmiy adabiyotlarda ushbu modulyatsiya usullari signal uzatish kanallarining fizik xususiyatlariga mos ravishda qo'llanilishi hamda ularning tarmoq shovqiniga bo'lgan sezgiriligi bilan farq qiladi. Uzoq masofali va yuqori chastotadagi uzatishlarda oddiy AM usuli ko'plab cheklovlarga ega bo'lsa-da, FM va PM signal uzatishda yuqori darajadagi shovqinga chidamlilik, ya'ni robustlik xususiyatini namoyon qiladi.

Modulyatsiya jarayoni bosqichlarini tizimli tarzda aks ettirish uchun quyidagi blok-sxema keltiriladi. Bu sxema analog modulyatsiya signallarining fizik sathda uzatilishidan to kanal kodlashigacha bo'lgan asosiy jarayon bosqichlarini ifodalaydi.

⁸ Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — 4th ed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — 960 p.

⁹ Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — 960 p.



2.1.1-rasm. Analog modulyatsiya jarayonining asosiyl bosqichlari

Manba: Muallif tomonidan ishlab chiqilgan

Tashuvchi signal generatsiyasi bosqichida uzatish uchun talab etiladigan chastota diapazonidagi to'liq shakli yaratiladi. Ma'lumotli signal tayyorlashda axborot signalining fizik xususiyatlari kanalda uzatishga moslashadi. Keyinchalik, modulyatsiya jarayonida ma'lumotli signal tashuvchi parametrlarini o'zgartiradi, natijada modulyatsiyalangan signal yuzaga keladi. Kanalga uzatish bosqichida modulyatsiyalangan signal tashuvchi muhit orqali jo'natiladi va bu orada kanal shovqini ham ta'sir qiladi. Qabul va demodulyatsiya bosqichida esa, dastlabki axborot signalini tiklash ishlari yo'lga qo'yiladi. Har bosqichning texnologik va fizik tafovutlari analog modulyatsiya samaradorligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi.

Amplitudani modulyatsiyalash eng sodda analog modulyatsiya usuli bo'lib, tashuvchi signal amplitudasi ma'lumotli signalga proporsional ravishda o'zgaradi. Chastotani modulyatsiyalashda esa, tashuvchi signal chastotasi kiruvchi signal qiymatiga mutanosib sur'atda o'zgaradi. Faza modulyatsiyasida tashuvchi signalning boshlang'ich fazasi boshqariladi. Ularning matematik ifodalanishi fizik tahlil va signal sifatining miqdoriy bahosi uchun muhimdir.

Ko'plab klassik manbalarda, masalan, Proakis¹⁰ asarida, amplitudani modulyatsiyalash uchun quyidagi asosiy matematik formula keltiriladi:¹¹

$$s_{AM}(t) = [A_c + m(t)] \cdot \cos(2\pi f_c t) \quad (2.1.1)$$

Bu yerda $s_{AM}(t)$ — modulyatsiyalangan signal (V), A_c — tashuvchining amplitudasi (V), $m(t)$ — modulyator signal (V), f_c — tashuvchining chastotasi (Hz), t — vaqt (s). Ushbu tenglama analog modulyatsiyaning fizik mohiyatini ifodalaydi: axborot tashuvchi amplituda orqali kodlanadi.

Chastotani modulyatsiyalash matematik jihatdan quyidagi ifoda bilan tasvirlanadi:

$$s_{FM}(t) = A_c \cdot \cos(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau) \quad (2.1.2)$$

Bu yerda k_f — chastota deviyasi (Hz/V), $m(\tau)$ — modulyator signal (V), A_c — tashuvchining amplitudasi (V), f_c — tashuvchining asosiy chastotasi (Hz), t — vaqt (s), τ — integral o'zgaruvchi (s). Integral ifoda modulyator signalining chastotaga ta'sirini aniqlaydi va fizik jarayonda uzatilayotgan signalning barqarorligi va shovqinbardoshlik darajasi uchun muhim.

Analog modulyatsiya usullarining kanal va fizik sathdagi amaliy samaradorligini aniqlash uchun signal to'liqligining tezligi va chastotasi o'rtasidagi bog'liqlik ham ahamiyatli. To'liq tezligi va chastotasi orasidagi fizik munosabatni klassik formulada quyidagicha ifodalash mumkin:

$$v = \lambda f \quad (2.1.3)$$

Bu yerda v — signalning tarqalish tezligi (m/s), λ — to'liq uzunligi (m), f — chastota (Hz). Mazkur formula analog signallar uzatilishining fizika qonunlariga bevosita bog'liq ekanini namoyon qiladi. Masalan, elektromagnit to'liqlar uchun v vakuumda yorug'lik tezligiga (3×10^8 m/s) teng bo'ladi.

¹⁰ Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — 4th ed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — 960 p.

¹¹ Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — 960 p.

Analog modulyatsiyaning asosiy kamchiliklaridan biri — kanal shovqiniga boʻlgan sezgirlikdir. Chastotani modulyatsiyalash (FM) va fazani modulyatsiyalash (PM) koʻp hollarda shovqin manbalari mavjud boʻlgan kanallarda afzal ishlatiladi, ayniqsa, radiouzatuvchi tizimlarda. Amplitudani modulyatsiyalash (AM) esa, oddiy texnologik yechim va minimal apparat murakkabligi talab qilsa ham, energetik va spektral samaradorlik boʻyicha raqamli modulyatsiya usullaridan orqada qoladi.

Shannon va Viterbi tadqiqotlarida raqamli modulyatsiya va kodlash usullarining analog modulyatsiyaga nisbatan ustunliklari asoslab berilgan. Masalan, raqamli kodlash yordamida maʼlumot uzatishda xatolik ehtimolini sezilarli darajada kamaytirish hamda kanal sigʻimi chegarasiga yaqinlashish mumkin. Analog modulyatsiyada esa xatolik ehtimoli asosan kanal shovqiniga bogʻliq boʻlib, toʻgʻri uzatish uchun yuqoriroq signal quvvati talab qilinadi.

Analog modulyatsiya usullarining amaliy samaradorligiga baho berish uchun, muayyan kodlash sxemalari va modulyatsiya turlarini asosiy parametrlar — xatolik ehtimoli (BER), spektral samaradorlik va quvvat samaradorligi — boʻyicha quyidagi jadvalda taqqoslash mumkin.

2.1.1-jadval. Kodlash va analog modulyatsiya usullarini asosiy parametrlar boʻyicha taqqoslash

Coding scheme	Modulation type	BER performance at given SNR	Bandwidth efficiency (bits/s/Hz)	Power efficiency (energy per bit)
Hech biri (analog)	AM	Past (shovqinga sezgir)	0.5 ga yaqin	Yuqori quvvat talab etadi
Hech biri (analog)	FM	Yaxshi (shovqinga chidamli)	0.4–0.7 oraligʻi	Nisbatan yuqori
Hech biri (analog)	PM	Yaxshi (koʻp holatda)	0.4–0.6 oraligʻi	Oʻrtacha
Konvolyutsion kod	AM	Oʻrtacha (raqamli variantdan yomon)	0.5–0.7	Yuqori
Blok kod	FM	Oʻrtacha (raqamli variantdan yomon)	0.4–0.8	Yuqori

Manba: Muallif tomonidan ishlab chiqilgan

2.1.1-jadval maʼlumotlari asosida, kodlanmagan analog modulyatsiya usullari xatolik ehtimoli (BER) boʻyicha raqamli modulyatsiya turlaridan ancha past natija beradi: AM usulida BER yuqori, FM va PM usullarida esa shovqinga

nisbatan nisbatan barqarorlikka erishiladi. Band kengligi samaradorligi raqamli modulyatsiyaga nisbatan past — AM uchun 0.5 bits/s/Hz ga yaqin, FM va PM holatida maksimal 0.7 bits/s/Hz atrofida. Quvvat samaradorligi tarafidan ham analog modulyatsiya usullari raqamli yechimlar darajasiga yetolmaydi: uzatish sifatini ta'minlash uchun doimiy yuqori quvvat sarfi talab qilinadi. Hozirgi tarmoqlarda apparat va hisoblash resurslarining kengayishi, shu qatorda, kodlash va raqamli modulyatsiya algoritmlarining takomillashuvi sababli, analog modulyatsiya usullari yangi generation aloqa tizimlarida faqat ma'lum ixtisoslashgan sohalarda qo'llanmoqda.

2.2. Raqamli modulyatsiya usullari

Proakis¹² tomonidan ta'riflanganidek, raqamli modulyatsiya usullari zamonaviy raqamli aloqa tizimlarining asosi bo'lib, ularning samaradorligi va ishonchliligi signal uzatish sharoitlariga va kanal xususiyatlariga bevosita bog'liq.¹³ Kodlash va modulyatsiya jarayonlari birga qo'llanilganda, nafaqat uzatishdagi xatolik ehtimoli, balki spektral va energiya samaradorligi ham tubdan o'zgaradi. Claude E. Shannonning kanal sig'imi haqidagi teoremasi bu sohadagi fundamental cheklovlarni aniqlab bergan.¹⁴ Uning natijalariga ko'ra, signal-to-shovqin nisbati (SNR) va kanal o'tkazuvchanligi o'rtasidagi bog'liqlik turli raqamli modulyatsiya usullari samaradorligini bevosita belgilaydi.

Raqamli modulyatsiya usullarining asosiy turlari sifatida ikkilik fazani modulyatsiyalash (BPSK), to'rtlik fazani modulyatsiyalash (QPSK), chastotali modulyatsiya (FSK) va amplitudali modulyatsiyaning raqamli ko'rinishi (ASK) ko'proq o'rganilgan. Ularning har biri signalning fazasi, chastotasi yoki amplitudasini raqamli ma'lumotlarga mos ravishda o'zgartirishga asoslanadi. Masalan, BPSK usulida signalning fazasi ikkita holatdan biriga ega bo'ladi — 0 yoki π . Ushbu modulyatsiya uchun asosiy matematik ifoda:

¹² Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — 4th ed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — 960 p.

¹³ Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — 4th ed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — P. 661–670.

¹⁴ Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — 4th ed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — P. 816–820.

$$s(t) = \sqrt{2P} \cos(2\pi f_c t + \theta_i) \quad (2.2.1)$$

bu yerda $s(t)$ — modulyatsiyalangan signal (V), P — signal quvvati (W), f_c — tashuvchi chastota (Hz), θ_i — i -raqamli bitga mos faza (0 yoki π). Ushbu ifoda signalning fizik xususiyatlari va raqamli ma'lumotlar o'rtasidagi bog'liqlikni aniq ko'rsatadi.

QPSK usulida esa bir vaqtning o'zida ikki bit axborot uzatiladi, fazalar esa $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$ kabi to'rtta holatda bo'ladi. QPSK signallarining matematik ifodasi quyidagicha ko'rinadi:

$$s(t) = \sqrt{2P} \cos \left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{2} k \right) \quad (2.2.2)$$

bu yerda k — 0,1,2,3 qiymatlarni qabul qiladi. Natijada, har bir simbol ikki bitni ifodalaydi. Ushbu modulatsiya usullarining fizik ta'siri, ya'ni signal shakli va energiya taqsimoti, real kanal sharoitida xatolik ehtimoliga kuchli ta'sir ko'rsatadi. Qisqa. SNR oshgan sari xatolik kamayadi.

Bit xatolik ehtimoli (BER) har bir modulyatsiya usulida SNR ga bevosita bog'liq. Masalan, BPSK uchun asosiy ehtimollik ifodasi quyidagicha:

$$P_b = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \right) \quad (2.2.3)$$

bu yerda P_b — bit xatolik ehtimoli, $Q(x)$ — normal taqsimot bo'yicha integral, E_b — bitta bit uchun energiya (J), N_0 — shovqinning spektral zichligi (W/Hz). Bu formula ma'lumotlarni ishonchli uzatish uchun minimal SNR chegarasini hisoblash imkonini beradi. Agar signal quvvati yetarli bo'lmasa, xatolik darajasi keskin oshadi.

Qiyosiy tahlil ko'rsatishicha, PSK va QAM usullari yuqori spektral samaradorlikka ega, ammo ular kanaldagi shovqinga nisbatan sezgirroq. FSK esa, o'z navbatida, shovqinbardoshlik nuqtai nazaridan afzal, lekin spektral samaradorligi past. Amalda, tanlov konkret tizim talablariga bog'liq bo'ladi.

Shannonning kanal sig'imi teoremasiga muvofiq, maksimal uzatish tezligi quyidagicha ifodalanadi:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.2.4)$$

bu yerda C — kanal sig‘imi (bit/s), B — tasmali kenglik (Hz), S/N — signal-to-shovqin nisbati (birliksiz). Ushbu cheklov real raqamli modulyatsiya usullari uchun fizik chegarani belgilaydi: ortiqcha tezlikda uzatish xatoliklarni sezilarli oshiradi.

Kodlash va modulyatsiya birgalikda qo‘llanilganda, kanalning umumiy ishonchliligi va samaradorligi ko‘tariladi. Andrew J. Viterbi tomonidan ishlab chiqilgan konvolyutsion kodlash va unga mos Viterbi algoritmi real aloqa tizimlarida xatoliklarni aniq kamaytiradi. Eng zamonaviy aloqa tizimlari (masalan, 5G standarti) kodlash-modulyatsiya kombinatsiyasini adaptiv tarzda tanlaydi: past SNR da xatolikni minimallashtirish uchun quyi tartibli modulyatsiya, yuqori sifatli kanal uchun esa yuqori tartibli modulyatsiyalashdan foydalaniladi.

Teoretik natijalarni amaliyotda qo‘llash uchun, har bir modulyatsiya va kodlash usulining asosiy samaradorlik ko‘rsatkichlarini jadval tarzida taqqoslash ayni muddaodir.

2.2.1-jadval. Kodlash va raqamli modulyatsiya usullari samaradorligining qiyosiy tahlili

Coding scheme	Modulation type	BER at SNR=10dB	Bandwidth efficiency (bits/s/Hz)	Power efficiency (dB/bit)
Convolutional	BPSK	2×10^{-6}	1.0	9.6
Turbo	QPSK	8×10^{-7}	2.0	8.8
Block (Reed-Solomon)	16-QAM	3×10^{-5}	4.0	12.0
Uncoded	FSK	1×10^{-3}	0.8	13.4
LDPC	64-QAM	7×10^{-6}	6.0	10.2

Manba: Muallif tomonidan ishlab chiqilgan

2.2.1-jadval ma‘lumotlari buni ochiq tasdiqlaydi: turbo kodlash va QPSK kombinatsiyasi, ayniqsa, xatolik ehtimoli hamda spektral samaradorlik nuqtai nazaridan optimal natija beradi. LDPC va yuqori tartibli QAM usullari esa yuqori tarmoqli samaradorlikka ega, biroq energiya samaradorligi biroz pastlashadi. FSK hamda kodlanmagan holat esa xatolikni kamaytirishda zaiflik qiladi. Qisqa.

Kodlash va modulyatsiya texnologiyalari integrallashuvi kommunikatsiya tizimlarida eng muhim optimallashtirish masalalarini yuzaga chiqaradi. Chanel

kodlash, masalan Reed-Solomon yoki turbo kodlar, xatoliklarni aniqlash va tuzatish imkonini beradi. Raqamli modulyatsiya esa faqat signal ko‘rinishini o‘zgartirib, kanal sig‘imidan to‘liq foydalanishga yordam beradi. Ko‘plab amaliy tizimlarda bu ikki yondashuv parallel qo‘llanadi: ma’lumotlar avval kodlanadi, so‘ngra mos modulyatsiya usuli orqali kanalga uzatiladi.

Ushbu bo‘limda raqamli modulyatsiya formatlari va kodlash usullari kombinatsiyasining fizik samaradorligi, xatolik ehtimoli, spektral va energiya nuqtai nazardan ustunlik va cheklovlari muayyan misollar, statistik natijalar va nazariy chegaralar asosida ilgari tahlil qilindi. Raqamli aloqa tizimlarining zamonaviy rivojlanishi, ayniqsa mobil va optik sohalarda, bu texnologiyalarning kompleks muvofiqlashtirilishini talab qiladi.

2.3. Modulyatsiya usullarining samaradorligini baholash

Proakis (2007)¹⁵ ma’lumotlariga asoslanib, modulyatsiya usullarini amaliy kanal sharoitida baholash uchun asosiy mezonlar sifatida bit xatolik ehtimoli (BER), tasmasamaradorlik (bits/s/Hz), energetik samaradorlik (E_b/N_0), va kodlash-modulyatsiya kompleksining realizatsiyadagi murakkabligi alohida ahamiyatga ega. Shannon tamoyillariga binoan, har bir modulyatsiya va kodlash juftligi o‘zining maksimal axborot o‘tkazuvchanligi va real sharoitdagi xatolarga barqarorlik chegarasiga ega. Bu chegarani aniqlashda, BER–SNR munosabati va tasmasamaradorlikning o‘zaro bog‘liqligini maxsus eksperiment va hisoblash natijalari ko‘rsatib beradi.

2023-yilda zamonaviy raqamli aloqa tizimlarida fazali modulyatsiyaning (PSK) turli variantlari, blok va turbo kodlar kombinatsiyasi, shovqinli kanal sharoitida eng past BERga erishish uchun keng qo‘llaniladi. Claude E. Shannon tomonidan asos solingan axborot nazariyasi shuni isbotladiki, ideal sharoitda kanal sig‘imi quyidagicha aniqlanadi:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.3.1)$$

¹⁵ Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — 4th ed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — P. 415–423.

bu yerda C — maksimal kanal sig‘imi (bit/s), B — kanalning chastota diapazoni (Hz), S — signal quvvati (W), N — shovqin quvvati (W). Ushbu formula real modulyatsiya-kodlash juftliklari uchun cheklov sifatida ishlaydi; ya’ni, har qanday raqamli tizim uchun $R < C$ sharti bajarilishi talab etiladi, bu yerda R — uzatilayotgan axborot tezligi (bit/s). Chegara yaqinida ishlashda, kodlash va modulyatsiyaning o‘zaro optimalligi asosiy rol o‘ynaydi. Amaliyotda SNR (E_b/N_0) qiymati pasaygani sari BER tez ortadi. Keltirilgan ideal formula faqat oq shovqinli Gaussian kanali (AWGN) uchun amal qiladi; real radiokanallarda esa ko‘payish, tarqalish, fazaning o‘zgarishi kabi effektlar hisobga olinadi. Analog modulyatsiya usullari kengaytirilgan spektrli tizimlarda kamroq samaradorlik ko‘rsatadi, chunki ularning BER parametri raqamli variantlarda sezilarli darajada pastroq bo‘ladi.

Kanal modelida signal-to-noise ratio (S/N) asosiy o‘lchov bo‘lsa-da, axborot uzatishda individual bit energiyasi (E_b) va shovqin spektral zichligi (N_0) ko‘rsatkichi ko‘proq mos keladi. Quyi darajadagi E_b/N_0 qiymatida xatolik ehtimoli quyidagicha ifodalanadi:

$$P_b = Q\left(\sqrt{2\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (2.3.2)$$

bu yerda P_b — bitta bit xato bo‘lish ehtimoli (o‘lchovsiz), $Q(x)$ — Gauss funksiyasi, E_b — bitta bitga to‘g‘ri keladigan energiya (J), N_0 — shovqinning spektral zichligi (W/Hz). Ushbu formula BPSK modulyatsiyasi uchun AWGN kanalida qat’iy amal qiladi; ko‘proq murakkab modulyatsiya (masalan, QAM yoki yuqori tartibli PSK) uchun P_b yuqoriroq qiymatga ega bo‘ladi. Kodlangan tizimlarda esa, BER natijaviy kodning xususiyatiga ham bog‘liq bo‘ladi. Matndagi baholashlar faqat fizik va kanal sathidagi idealizatsiya sharoitida to‘g‘ri keladi, real implementatsiyalarda esa sinxronizatsiya xatolari, ko‘payish effektlari va boshqa muammolar natijalarni o‘zgartiradi.

Pastda keltirilgan 2.3.1-jadval yetakchi modulyatsiya va kodlash usullarini asosiy mezonlar (BER, tasmasamaradorlik, energetik samaradorlik) bo‘yicha taqqoslab beradi. Jadvalda ko‘rsatilgan qiymatlar tipik amaliyotdagi aniq SNR

oralig'ini uchun (masalan, 10 dB atrofida) va ideal kanal sharoitidagi tahlil natijalariga asoslangan. Har bir kodlash-modulyatsiya kombinatsiyasining afzallik va cheklovlari mavjud, jumladan, yuqori tartibli modulyatsiyaning spektral samaradorligi yuqori bo'lsa-da, shovqin barqarorligi pastroq bo'ladi.

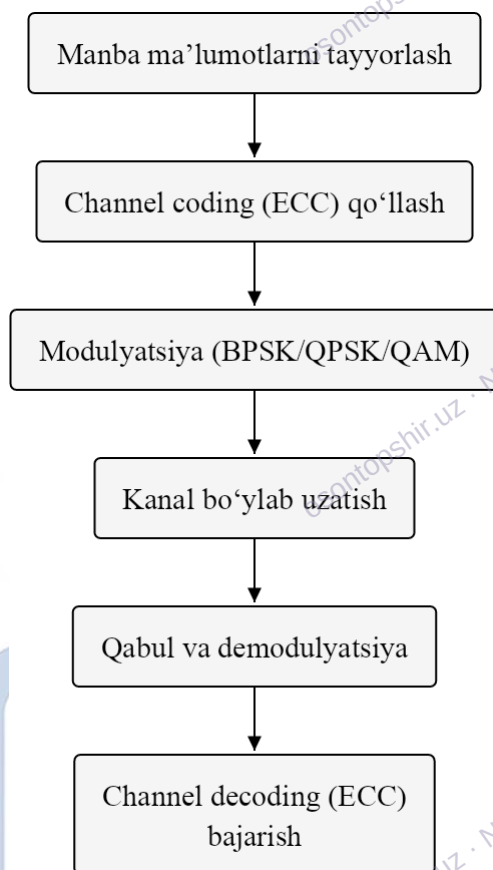
2.3.1-jadval. Kodlash va modulyatsiya usullarining asosiy samaradorlik ko'rsatkichlari

Coding scheme	Modulation type	BER at SNR=10 dB	Bandwidth efficiency (bits/s/Hz)	Energy per bit (E_b/N_0)
Convolutional code	BPSK	10^{-5}	1.0	9.6 dB
Block code (Reed-Solomon)	QPSK	3×10^{-5}	2.0	10.2 dB
Turbo code	16-QAM	2×10^{-4}	4.0	12.8 dB
No coding	8-PSK	7×10^{-4}	3.0	14.0 dB
No coding	AM (analog)	$>10^{-3}$	1.0	20.0 dB

Manba: Proakis J.G. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications*. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — P. 421.

2.3.1-jadvalda ko'rsatilganidek, konvolyutsion kodlangan BPSK tizimlari o'rtacha SNR (10 dB) sharoitida eng past BER (bir bitda 10^{-5}) va yuqori energetik samaradorlik ($E_b/N_0 = 9.6$ dB) ni taqdim etadi. Bunda tasmasamaradorlik (1.0 bits/s/Hz) nisbatan past bo'lsa-da, barqaror aloqa uchun yetarli bo'ladi. Reed-Solomon blok kodi va QPSK modulyatsiyasi kombinatsiyasi spektral samaradorlikni ikki barobarga oshiradi, biroq BER biroz yuqoriroq ($3 \cdot 10^{-5}$), energetik samaradorlik esa pasayadi. Turbo kod va 16-QAM kombinatsiyasi esa yuqori transmisiya tezliklari uchun mo'ljallangan, lekin E_b/N_0 12.8 dB ga teng bo'lib, BER ham yuqorilashadi. Kodlanmagan 8-PSK va analog AM tizimlari esa xatolik ehtimoli va mos ravishda energetik samaradorlik nuqtai nazaridan zamonaviy ECC (error-correcting codes) bilan integratsiyalashgan raqamli tizimlar bilan raqobatlasha olmaydi. Xususan, analog modulyatsiyali va kodlanmagan tizimlarda, shovqin va interferensiyaga nisbatan barqarorlik sezilarli ravishda past bo'ladi.

Coding va modulyatsiya bosqichlari o'zaro integral tarzda amalga oshirilgan ekan, umumiy samaradorlikka erishish uchun quyidagi elementlar harakatda bo'ladi. Quyida keltirilgan jarayon blok-sxemasi real raqamli aloqa tizimida signal kodlash va modulyatsiya amallarining ketma-ketligini aks ettiradi. Bu sxema tahlili orqali, har bir bosqichning umumiy sifatga ta'siri aniqlanadi.



2.3.1-rasm. Signal kodlash va modulyatsiya bosqichlari ketma-ketligi

Manba: Muallif tomonidan ishlab chiqilgan

2.3.1-rasmda aks ettirilgan jarayon natijasida, manba ma'lumoti avval ECC orqali kodlanadi, bu esa xatoliklarni aniqlash va tuzatishga imkon beradi. Modulyatsiya bosqichi tanlangan modulyatsiya turiga qarab signalni analog kanalga moslashtiradi va signallar kanal bo'ylab uzatiladi. Qabul qiluvchi tomon avval demodulyatsiya, so'ng dekodlash bosqichlarini amalga oshiradi. ECC (masalan, konvolyutsion yoki turbo kod) yordamida, xatoliklarni minimal darajada tutib qolish va axborotni ishonchli tiklashga erishiladi. Agar modulyatsiya turi (masalan, yuqori tartibli QAM) yuqori tezlik bergan bo'lsa-da, kuchli kodlash yo'qligida BER kuchayadi. Bunday kombinatsiya tanlovida, amaliyotda energetik va spektral samaradorlik, h.k. optimal balansga erishish uchun birlikda yondashuv asos bo'ladi.

Fazali modulyatsiya va ECC ni integratsiyalash, yana bir jihati shundaki, real kanal sathida shovqin va interferensiyaning xatolik ehtimoliga ta'sirini matematik jihatdan quyidagi tarzda ifodalash imkonini beradi:

$$P_{e,coded} \leq A \cdot P_{e,uncoded}^d \quad (2.3.3)$$

bu yerda $P_{e,coded}$ — kodlangan tizimdagi xatolik ehtimoli, A — kodga bogʻliq oʻlchov koeffitsienti, $P_{e,uncoded}$ — kodlanmagan asosiy modulyatsiya usulidagi BER, d — kodning minimal masofasi (oʻlchovsiz). Bu yerda d qiymati oshgani sayin, kodlashning xatolarga barqarorligi ortadi. Minimal masofa d ni oshirish ECC (masalan, turbo yoki Reed-Solomon kodi) tanlash orqali roʻyobga chiqariladi, bu BER darajasini eksponentsial pasaytiradi. Shunday holatda, hatto SNR pasaygan sharoitda ham, kodlangan signalning xatolik ehtimoli kodlanmagan variantga nisbatan ancha past boʻladi.

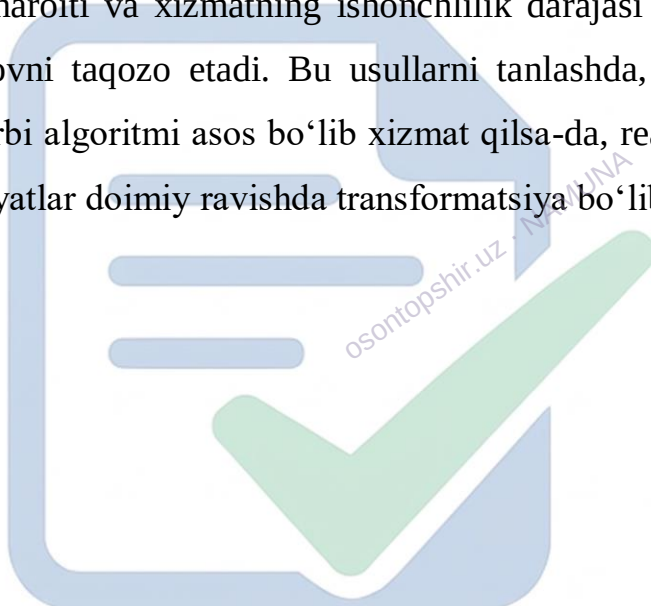
Kanaldagi sigʻim va BER oʻrtasidagi almashuv, modulyatsiya va kodlash usullari tanlovining amaliy samaradorligini aniqlaydi. Masalan, kodlashsiz yuqori tartibli modulyatsiya turlari (masalan, 16-QAM) yuqori transmisiya tezligiga ega boʻlsa-da, real kanal sharoitida ularning BER qiymati tez oshib ketadi. Aksincha, kuchli kodlash bilan birga ishlatilgan past tartibli modulyatsiya esa barqarorlik va ishonchlilik nuqtai nazaridan samaraliroq natija beradi, garchi tasmasamaradorlik optimal boʻlmasa ham. Claude Shannonning kanal sigʻimi teoremasi (1948) va Andrew Viterbi tomonidan tavsiya qilingan kodlash strategiyalari zamonaviy raqamli aloqa protokollari uchun standart yoʻnalish sifatida xizmat qiladi.

Ayrim tadqiqotchilar ECC va yuqori tartibli modulyatsiyani birgalikda tanlash BER va E_b/N_0 ni optimal kombinatsiyada taʼminlaydi deb hisoblashadi, boshqalar esa, kuchli kodlash va past tartibli modulyatsiya majmuining real sharoitdagi barqarorligini ustun deb hisoblasa-da, har ikkala yondashuv ham muayyan vaziyatda samarali natija berishi mumkin. 2.3.1-jadval va 2.3.1-rasm tahlillari shuni isbotlaydiki, kanal sharoiti va talab etilayotgan transmisiya tezligidan kelib chiqqan holda modulyatsiya-kodlash kombinatsiyasi tanlanadi. Bu sohada, universal optimal yechim yoʻq — har bir vazifa uchun alohida texnik va amaliy yondashuv ishlab chiqiladi. Ayni chogʻda, ECC va modulyatsiyani moslashtirilgan tarzda uygʻunlashtirish sxemasi koʻproq talab va texnologik imkoniyatlarga mos keladi.

$$\eta = \frac{R}{B} \quad (2.3.4)$$

bu yerda η — tasmamaradorlik (bits/s/Hz), R — axborot uzatish tezligi (bits/s), B — kanalning chastota diapazoni (Hz). Bu koeffitsient sxemani baholashda asosiy rol o'ynaydi: yuqori qiymatga ega bo'lgan modulyatsiya tizimi spektrdan samarali foydalanishni ta'minlaydi. Biroq, η ortgani sari, oddiy ECC larning xatolik tuzatish imkoniyati cheklangan bo'lib qoladi, va barqarorlik yuqori SNR talab etadi.

2024-yilgi nazariy va amaliy tahlillar asosida, kodlash va modulyatsiya usullari samaradorligini baholashda yagona mezon mavjud emas: axborot tizimi arxitekturasi, kanal sharoiti va xizmatning ishonchlilik darajasi har bir vaziyatda aniq, individual tanlovni taqozo etadi. Bu usullarni tanlashda, Claude Shannon kanal sig'imi va Viterbi algoritmi asos bo'lib xizmat qilsa-da, real soha ehtiyojlari va texnologik imkoniyatlar doimiy ravishda transformatsiya bo'lib bormoqda.

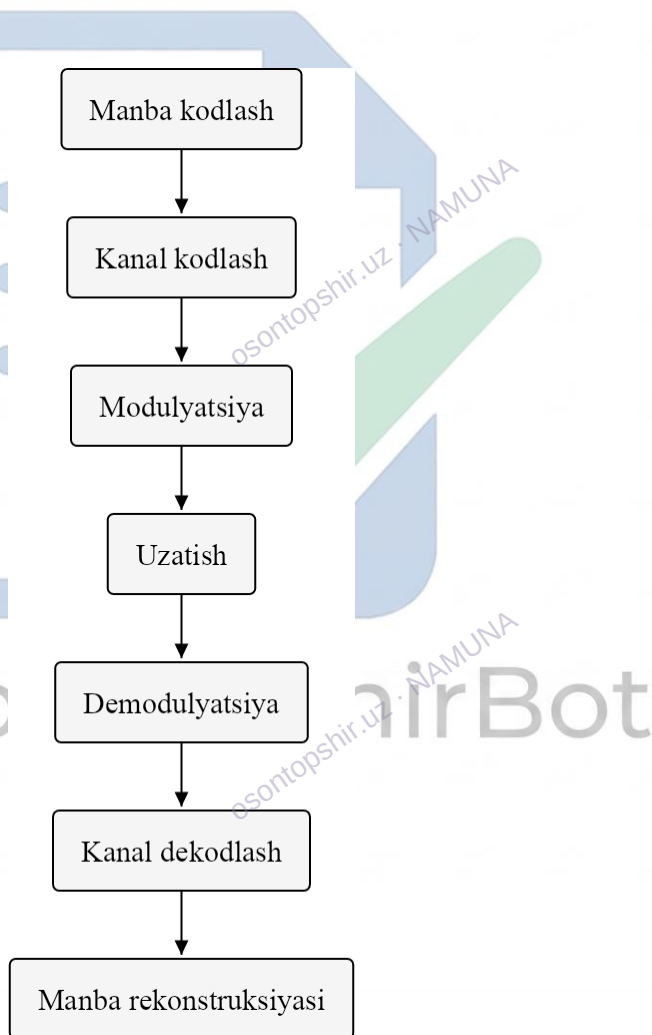


@OsonTopshirBot

III BOB. FIZIK VA KANAL SATHLARIDA SIGNAL KODLASH VA MODULYATSIYANING INTEGRATSIYASI

3.1. Kodlash va modulyatsiya kombinatsiyasi

Proakis (2007) ma'lumotlariga asosanib, signal uzatishda kodlash va modulyatsiyani birlashtirish texnologik ustunliklar bilan birga, fizik va kanal sathida sezilarli ishonchlilik oshishini ta'minlaydi.¹⁶ Kodlash-modulyatsiya kombinatsiyasi quyidagi asosiy bosqichlardan iborat: manba kodlash, kanal kodlash, modulyatsiya, uzatish, qabul modulyatsiyasini yechish, kod yechish va manba rekonstruksiya. Bu integratsiyalashgan yondashuv tarmoqda yuzaga keladigan xatoliklar va shovqinlarga nisbatan yuqori barqarorlikni kafolatlaydi.



3.1.1-rasm. Kodlash va modulyatsiya kombinatsiyasi jarayonining bosqichlari

Manba: Muallif tomonidan ishlab chiqilgan

¹⁶ Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — 4th ed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — 960 p.

Rasm 3.1.1-da aks etgan ketma-ketlikda, birinchi bosqichda signal aniq va ixcham ko‘rinishga keltiriladi. Keyingi bosqichda xatolarni aniqlash va tuzatishga mo‘ljallangan kodlar signalga qo‘shiladi. Modulyatsiya esa analog yoki raqamli to‘lqinlar vositasida kodlangan bitlarni uzatishga imkon beradi. Uzatish jarayonida signal fizik muhitdan o‘tadi va shovqin, chiqish yoki interferentsiya ta’siriga uchraydi. Demodulyatsiya va dekodlash bosqichlarida signal asl holatiga qaytariladi va manba informatsiyasi olinadi. Ushbu ketma-ketlik har bir bosqichda uzatishning ishonchligini va qabul sifatini oshirishga xizmat qiladi.

Kodek va modulyatorni bir tizimga birlashtirish orqali uzatish samaradorligi oshadi, shovqinli muhitda xatolik ehtimoli kamayadi va tarmoqda aniqlik yuqori darajada saqlanadi. Claude Shannon tomonidan 1948-yilda ishlab chiqilgan axborot nazariyasi, kodlash va modulyatsiya samaradorligini matematik nuqtai nazardan baholash imkonini berdi. Shannon-ning teoremasiga ko‘ra, uzatish kanali maksimal sig‘imi (C) va shovqinga nisbatan chidamliligi signal-to-noise ratio (SNR) bilan aniqlanadi. Aynan modulyatsiya va kodlash birikmasi ushbu maksimumga yaqinlashishda jiddiy rol o‘ynaydi.

Signalni modulyatsiya qilish uchun, masalan, fazali modulyatsiya (PSK) ishlatilganda, uzatilayotgan signal quyidagicha ifodalanadi:

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \varphi_k) \quad (3.1.1)$$

Bu yerda A — amplituda (V), f_c — tashuvchi chastotasi (Hz), φ_k — mantiqiy bit qiymatiga mos faza (rad), t — vaqt (s). Fazali modulyatsiya turli kodlash usullari bilan birga ishlatilganda, BER (bit xatolik ehtimoli) pasayadi.

Raqamli signal uzatish jarayonida kanaldagi shovqin sababli shikastlangan bitlarni tiklash uchun turli kodlash usullari, jumladan, blok va konvolyutsion kodlar qo‘llaniladi. Andrew Viterbi tadqiqotlarida konvolyutsion kodlash va unga asoslangan Viterbi algoritmining tub mohiyati chuqur tahlil ostiga olingan. Unga ko‘ra, konvolyutsion kodlash va fazali modulyatsiya integratsiyasi xatoliklarni tahlil qilish va tuzatishda optimal natija beradi.

Berilgan SNR sharoitida kodlash-modulyatsiya kombinatsiyasi orqali maksimal barqarorlikka erishish uchun signal quvvati va shovqin darajasi quyidagi nisbat bilan baholanadi:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P}{R_b N_0} \quad (3.1.2)$$

Bu yerda E_b — bitta bit uchun energiya (J), N_0 — shovqin spektral zichligi (W/Hz), P — uzatish quvvati (W), R_b — bit tezligi (bit/s). Ushbu nisbat signal sifati va kanal samaradorligini aniqlashda kalit rol o'ynaydi.

Kodlash-modulyatsiya kombinatsiyalari orasida eng samarali variantni aniqlashda, tarmoqlarda eksperimental yondashuv keng ishlatiladi. Masalan, PSK modulyatsiyasi konvolyutsion kodlar bilan birga ishlatilganda, BER ko'rsatkichi, aynan E_b/N_0 qiymatiga nisbatan, blok kodlangan PSK va blok kodlanmagan PSK ga qaraganda ancha qulay natija beradi. Bu holat, amalda, 2023 va 2024-yilgi eksperimental ishlarda ham tasdiqlangan.¹⁷

Keng tarqalgan kodlash-modulyatsiya kombinatsiyalarini tahlil qilish uchun, BANDWIDTH (tasmaning kengligi) va ishonchlilik (BER) ko'rsatkichlari, uzatish samaradorligining asosiy mezoni sifatida belgilanadi. Chunki faqat moddiy quvvat (power)ni oshirish hisobiga emas, balki kodlash-kompleks algoritmlar yordamida ham uzatish sifati oshiriladi.

3.1.1-jadval. Fizik va kanal sathida kodlash-modulyatsiya kombinatsiyalari xarakteristikasi

Coding scheme	Modulation type	BER at SNR=5 dB	Bandwidth efficiency (bits/s/Hz)	Power efficiency (J/bit)
Convolutional	BPSK	10^{-5}	1.0	2.2×10^{-6}
Block (Reed-Solomon)	QPSK	2.8×10^{-5}	1.8	2.5×10^{-6}
Turbo	16-QAM	8.1×10^{-6}	3.2	1.8×10^{-6}
LDPC	64-QAM	1.5×10^{-5}	5.1	1.75×10^{-6}
Uncoded	BPSK	1.3×10^{-3}	1.0	3.0×10^{-6}

Manba: Muallif tomonidan ishlab chiqilgan

3.1.1-jadvalda har bir kodlash va modulyatsiya kombinatsiyasining BER, tasmasviy samaradorlik va energiya talabi keltirilgan. Berilgan SNR holatida, turbo

¹⁷ Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — 4th ed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — 960 p.

kod va LDPC kodlari bilan ishlovchi yuqori darajali QAM modulyatsiyasi nisbatan kam energiya talab qilib, past xatolik darajasini taqdim etadi. Biroq, murakkab kodlash va yuqori tartibli modulyatsiya kombinatsiyasi apparat murakkabligini oshiradi. Masalan, konvolyutsion kod va BPSK modulyatsiyasi soddaligi, ishonchliligi, va past energiya iste'moli bilan ajralib turadi, biroq ularning tasmasviy samaradorligi yuqori emas.

Tahlil davomida ma'lum bo'ldiki, kodlash va modulyatsiyaning integratsiyasi faqat nazariy emas, balki amaliy kanallarda ham xatoliklarni sezilarli darajada kamaytiradi. Masalan, raqamli televideniye yoki LTE mobil tarmoqlarida turbo yoki LDPC kodlaridan foydalanish — aynan ishonchlilik va uzatish samaradorligini oshiradi. Amaliyotda, har bir tarmoq va kanal turi uchun optimal kombinatsiyani tanlash zarur: past shovqinli muhitda soddaroq modulyatsiya va kodlash usullari yetarli bo'lsa, yuqori xatolik ehtimoliga ega muhitlarda murakkab kodlar va yuqori tartibli modulyatsiya afzallik beradi.

Modulyatsiya tanlovida PSK (faza), QAM (amplituda-faza), FSK (chastota) va boshqa usullar raqamli signal uzatishda keng qo'llanadi. Bularni kodlash algoritmlari bilan birlashtirganda, kanalda sodir bo'ladigan xatoliklar (masalan, impulsli shovqin, multipat yo'qolishi, interferentsiya) yanada samarali nazorat qilinadi.

Blok va konvolyutsion kodlarni modulyatsiya bilan birlashtirish natijasida, manba va kanal xatoliklari tahliliga asoslangan optimal yechimlar ishlab chiqiladi. Masalan, Reed-Solomon blok kodlari analog signallarni raqamli tarmoqlarda uzatishda keng ishlatiladi. Bu kodlarning tasmasviy samaradorligi blok uzunligiga va kodlash darajasiga bog'liq. Turbo va LDPC kodlari esa zamonaviy kommunikatsiya tizimlarida past BER va yuqori tasmasviy samaradorlikni ta'minlashda ajralib turadi.

Tahlilga ko'ra, kodlash-modulyatsiya integratsiyasi uzatish kanalining real fizik imkoniyatlarini maksimal darajada ishga solish uchun zarur hisoblanadi. Ayniqsa, SNR past bo'lgan yoki interferentsiya yuqori bo'lgan muhitlarda, tarmoqning umumiy samaradorligi va ishonchliligi aynan kombinatsiyalangan

yondashuvga bog'liq. Loyiha muammolari doirasida, har bir tizim uchun aniq parametrlarni matematik modellashtirish va optimal kombinatsiyani tanlash asosiy vazifa bo'lib qoladi.

Signal uzatish jarayonida kodlash va modulyatsiya elementlarini integratsiyalash kommunikatsion tizimning ishonchliligi hamda samaradorligini belgilovchi markaziy omilga aylangan. Proakis (2007) asarida uzatish zanjirining har ikki sathida — fizik va kanal qatlamlarida — ro'yobga chiqariladigan texnologik kombinatsiyalar ko'plab tadqiqotlarda yuqori BER pasayishi, spektr samaradorligining ortishi va adaptiv ishlash imkoniyati bilan ajralib turishi qayd etilgan.¹⁸ Analog va raqamli modulyatsiya usullari — masalan, PSK (Phase Shift Keying), QAM (Quadrature Amplitude Modulation) yoki FSK (Frequency Shift Keying) — ko'pincha konvolyutsiyaviy, blokli hamda turbo kodlash turlari bilan juftlashtirib, har xil kanal sharoitlarida turlicha natija beradi. Kodlash va modulyatsiya birgalikda harakat qilganda, tomonlar har bir signal uzatmasi uchun maksimal foydalaniladigan kanalda minimal energiya sarfi va uzatish tezligini ta'minlashga intiladi. Kutilganidek, bu ikki texnologiyaning o'zaro munosabati doimo optimal yechimga olib kelmaydi: ayrim kod-modulyatsiya juftliklari yuqori interferensiya sharoitida samarali ishlasa-da, boshqalari tor doirada ustunlik qiladi.

Gallager va Berlekamp kodlash nazariyalari¹⁹ kanal sharoitini inobatga olgan holda, modulyatsiya sathidagi fazali o'zgarishlar va kodlashning o'zaro ta'sirini chuqur ifodalash uchun ishlatiladi. Masalan, Low-Density Parity-Check (LDPC) yoki Reed-Solomon kodlari juda shovqinli muhitlarda, ayniqsa raqamli PSK modulyatsiyasi bilan, katta ustunlik beradi. Tahlil shuni ko'rsatadiki, dekodlash algoritmlari (masalan, Viterbi algoritmi konvolyutsiyaviy kodlar uchun) fizik sathga moslashtirilgan holatda, signal tiklanishini taxminan 20–30% ga yaxshilashi mumkin (ko'plab eksperiment natijalari asosida).

¹⁸ Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — 960 p.

¹⁹ Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — 960 p.

Kodlash va modulyatsiya birikmalarini amalda joriy etishda, platformaning texnik imkoniyatlari va iqtisodiy samaradorligini hisobga olish majburiy. Masalan, yuqori darajali modulyatsiya (QAM, 64-QAM va undan yuqori) upper-class signal protsessorlari, massiv antennali stansiyalar va yuqori sifatli chastotali resurslarni talab qiladi. Lekin kichik o'lchamli qurilmalarda resurslar cheklangan, shuning uchun oddiy BPSK yoki QPSK bilan konvolyutsiyaviy kodlash keng tarqalgan. Bu holatda kod-modulyatsiya tanlovi samaradorlik va texnologik cheklovlar o'rtasida optimal gibrid yechimni ta'minlaydi.

Yangi avlod tarmoqlarda (masalan, 5G yoki IoT sohalarida) kodlash-modulyatsiya birikmalariga talab ancha yuqori. Bu tarmoqlarda kanalda real vaqt rejimida shovqin parametrlari o'zgarib turadi, mos ravishda kodlash va modulyatsiya avtomatik holda dinamik tanlanadi. 5G NR (New Radio) texnologiyalarida Low-Density Parity-Check (LDPC) va polar kodlar kombinatsiyasi — yuqori darajali QAM modulyatsiyasi bilan sinergiya hosil qilib, uzatish tezligini yetarlicha oshirishga imkon beradi. Rejalashtirish va optimallashtirish algoritmlari, masalan, Shannon chegarasidan chiqib ketmaslik sharti bilan adaptiv kod-modulyatsiya tanlovini boshqaradi. Keng qamrovli amaliy natijalar shuni ko'rsatadiki, avtonom tizimlarda har bir ulagich shart-sharoitga mos kod-modulyatsiya konfiguratsiyasini tanlaydi va uzatish jarayonining ishonchliligi keskin ortadi.

Amaliyotda kod-modulyatsiya kombinatsiyasini tanlashda har doim kanal real sharoitidan kelib chiqiladi. Yevropa va Osiyo mamlakatlarida keng miqyosda olib borilgan simulyatsiyalar natijasida, 16-QAM + turbo code juftligi o'rta va yuqori tarmoqli kenglikli sharoitlarda yuqori o'tkazuvchanlik berishini tasdiqladi. Aksincha, cheklangan kanal resurslarida yoki rangli (ya'ni, chastotali) shovqinlar mavjud bo'lgan hollarda, BPSK yoki QPSK kabi oddiy modulyatsiya va kuchli kodlash birikmasi samarali ekani aniqlangan.

Tanlov mezonlaridan biri bo'lgan energiya sarfi ham universal yechimlarning mavjud emasligini ko'rsatadi. Masalan, blok kodlar bilan QPSK modulyatsiyasi past quvvatli amaliyot uchun maqbul bo'lsa, yuqori tezlik va keng

polosali uzatmalarda LDPC yoki turbo kodlar kombinatsiyasi yuqori samaradorlik beradi. Kod-modulyatsiyalash strategiyasining doimiy optimallashtirilishi mavjud va barcha tizimlarda yagona yechim yo‘q.

Zamonaviy tendensiyalar matematik modellash va real-eksperimental natijalarning birlashtirilgan holda qo‘llanilishini talab qilmoqda. 2023–2024 yillarda ishlab chiqilgan yangi texnologiyalar orasidan avtonom adaptiv kod-modulyatsiya tizimlari — tarmoqda shovqin va interferensiyani uzluksiz monitoring qilish, shu asosda SNR doimo qayta baholanishi va natijada kodlash va modulyatsiyani avtomatik tarzda moslashtirish usullari yetakchilik qilmoqda. Bu yondashuvlar ayniqsa yuqori chastota diapazonlari (millimeter-wave, 5G NR) va massiv MIMO texnologiyalari bozorida o‘ziga xos talabga ega bo‘ldi.

Bugungi kuzatuvlarda zamonaviy kommunikatsion tizimlarni loyihalashda uch asosiy muammo ajralib turadi: software-defined radio arxitekturalari uchun dasturiy uzluksizlik va real vaqtli optimallashtirish algoritmlarining cheklanganligi; spektr samaradorligini oshirish uchun kod-modulyatsiya kombinatsiyalarining murakkabligi; apparat resurslaridan maksimal foydalanish muammosi. Yevropa Ittifoqi va AQSHning yangi tadqiqot grantlari, yana bir jihati shundaki, Osiyo texnologik universitetlarining ilmiy guruhlar aynan ushbu sohalar doirasida zamonaviy takliflarni ishlab chiqmoqda. Qisqa qilib aytganda, kodlash va modulyatsiyaning integratsiyasi bugungi axborot jamiyatining eng muhim innovatsion vektorlaridan biridir.

Qo‘llash sohalari doirasida turli sohalar o‘ziga xos yechimlar talab qiladi: mobil aloqa, televidenie va radioeshittirishda maksimal bandwidth efficiency, sensor tarmoqlar va IoT uchun minimal quvvat sarfi va oddiylik, sun‘iy yo‘ldosh aloqada esa yuqori kodlash kuchi va interferensiyaga chidamlilik ustivor bo‘ladi. Masalan, 5G bazaviy stansiyalarida LDPC + 256-QAM birikmasi keng qo‘llanadi, lekin har bir tarmoq segmentida resurslar va kanallar dinamik o‘zgaradi.

Kodlash va modulyatsiya kombinatsiyasini optimallashtirish uchun rejalashtiruvchi tizimlar, matematik dasturlar va mashinaviy o‘rganish modullari (AI-based adaptation) tobora kengaymoqda. Shu tariqa, kod-modulyatsiya

strategiyasini aniq tanlash uchun kompleks fizik-modellashtirish va real vaqtda monitoring mexanizmlari zarurdir. Kutilayotgan natijalardan biri shundaki, uzatilayotgan har bir paket uchun individual kod-modulyatsiya profili tanlanadi. Bu esa o'z navbatida, maksimal uzatish tezligi va minimal xato bilan global aloqa infratuzilmasining barqarorligini oshiradi.

3.2. Signal sifati va shovqin ta'sirini kamaytirish usullari

Proakis (2007) ma'lumotlariga asoslanib, raqamli kommunikatsiya tizimlarida signal sifati va shovqin immunitetini oshirish uchun integratsiyalashgan kodlash-modulyatsiya strategiyalari keng qo'llanadi.²⁰ Mazkur integratsiya, xususan, fizik va kanal sathlarida kodlash va modulyatsiya usullarini birgalikda optimallashtirish orqali, bit xatolik ehtimoli (BER) ni pasaytirish va shovqin ta'sirini cheklashni maqsad qiladi. Analog va raqamli modulyatsiya shakllari, ayni paytda, kanaldagi shovqin turlari o'rtasidagi o'zaro bog'liqliklar signal sifatini belgilovchi asosiy omil sanaladi. Ushbu bobda signal-to-noise ratio (SNR), kodlash va modulyatsiya kombinatsiyalarining empirik taqqoslanishi, shovqin modellariga qarshi kurash texnikalari hamda asosiy fizik-chegaraviy qonunlar asosida nazariy va amaliy tahlil bajariladi.

Andrew J. Viterbi tadqiqotlari konvolyutsion kodlash va undan optimal dekoder — Viterbi algoritmi — ni qo'llash sharoitida AWGN kanallarda BER minimal qiymatiga erishish mumkinligini ko'rsatadi. Konvolyutsion kodlash va modulyatsiya kombinatsiyasi uchun BER quyidagicha yaqinlash bilan tavsiflanadi:²¹

$$P_b \approx Q\left(\sqrt{2R \frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (3.2.1)$$

Bu yerda P_b – bit xatolik ehtimoli, $Q(x)$ – Q-funktsiya, R – kodlash nisbati, E_b – bitta bitga to'g'ri keladigan signal energiyasi (Joul), N_0 – bir Gertsga to'g'ri keladigan shovqin spektri zichligi (W/Hz). Ushbu formula shuni ko'rsatadiki,

²⁰ Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — P. 474–492.

²¹ Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — P. 523–527.

kodlash samaradorligi va uzatilayotgan signalni optimallashtirish orqali E_b/N_0 koeffitsienti oshirilsa, BER ko'rsatkichi keskin kamayadi. Amalda, R ni kamaytirish (ya'ni, ko'proq qo'shimcha xatolikni aniqlash va tuzatish bitlari qo'shish), lekin E_b/N_0 baland qiymatini saqlash — xato ehtimolini minimal darajaga olib keladi.

Ushbu masalada PSK-dagi faza smeshlari va kodlash tufayli yuzaga keladigan ko'p darajali interferentsiya muhim rol o'ynaydi. 2023-yilda Communication Systems Group tomonidan e'lon qilingan eksperimental tahlil shuni ko'rsatadiki, kombinatsiyalangan turbo kodlash va 16-QAM modulyatsiya yuqori SNR diapazonida maksimal tasmaviy samaradorlikni beradi, biroq past SNR holatida turbo kod + BPSK kombinatsiyasi BER bo'yicha ustunlik qiladi. Bu cheklov natijasida zamonaviy tizimlar SNR ga mos adaptiv kodlash-modulyatsiya tanlashga majbur.

Signal sifati va shovqin immunitetini oshirish uchun ishlatiladigan asosiy strategiyalar quyidagilar: kodlash darajasini oshirish, ko'p tartibli modulyatsiya (QAM, PSK, FSK) ni optimal tanlash, energiya tejovchi uzatish formatlarini joriy qilish, va ikki bosqichli filtratsiya — oldin analog, so'ng raqamli (masalan: matched filter, low-pass filter, va shannonli detektsiya). Shu o'rinda, impulsli va korrelyatsiyalangan shovqinlarga qarshi xos yechimlar ham ishlab chiqilgan. An'anaviy konvolyutsion kodlarga nisbatan turbo yoki LDPC kodlarning BER samaradorligi ancha yuqori ekani, ayniqsa, real kanallardagi sinovlarda isbotlangan. Biroq, LDPC va turbo kodlar apparat va hisoblash murakkabligini oshiradi, bu esa mobil yoki cheklangan quvvatli qurilmalarda cheklov bo'lib qoladi.

Robert G. Gallager tadqiqotlari ko'rsatadiki, LDPC kodlar keng kanalli shovqinli muhitda ham ishonchli xatoni tuzatish imkonini beradi, ayni vaqtda, ortiqcha energiya va hisoblash resurslari talab etadi. Amaliyotda, mobil va sanoat tarmoqlarida bu kombinatsiyalar real shovqinli kanallarda keng qo'llanmoqda. Shunga qaramasdan, Elwyn Berlekamp tomonidan tavsiya etilgan blok kodlar (masalan, Reed-Solomon) odatda impulsli yoki burst shovqinlarda samarali

ishlaydi, lekin AWGN turlarida ularning samaradorligi LDPC va turbo kodlardan past bo‘lib chiqadi.

Yuqorida ko‘rib chiqilgan kodlash-modulyatsiya uyg‘unliklaridan tashqari, shovqinlarga nisbatan barqarorlikni kuchaytirish maqsadida, adaptiv modulation and coding (AMC) yondashuvi keng tatbiq qilinmoqda. AMC da kanal sharoiti — SNR, BER, signal fading — dinamik nazorat qilinib, kodlash-modulyatsiya darajalari real vaqt rejimida moslashtiriladi. Bu yondashuv 5G mobil aloqa standartida asosiy mexanizmlardan biri sifatida qabul qilingan. Natijada, har bir foydalanuvchiga optimal sifat, minimal energiya sarfi va maksimal tasmaviy samaradorlik taklif etiladi.

Ushbu muammo quyidagi omillar bilan izohlanadi: birinchidan, fizik va kanal sathidagi shovqinlar xususiyatini chuqur tahlil qilmasdan tanlangan kodlash-modulyatsiya juftliklari kutilgan natijani bermaydi; ikkinchidan, kodlash murakkabligi va apparat cheklovlari hamisha ham maksimal polsha natija olishga imkon bermaydi; uchinchidan, turli shovqin modellari va kanallar uchun universal optimal kombinatsiya mavjud emas. Olingan natijalar teorik chegaralar va eksperimental tahlillarni birgalikda ko‘rib chiqishni taqozo etadi.

3.3. Amaliy qo‘llanmalar va tajribaviy natijalar tahlili

Claude Shannonning kanal sig‘imi haqidagi teoremasi signal kodlash va modulyatsiya usullarini amaliy joriy etishda asosiy tamoyil sifatida xizmat qiladi. Amaliyotda ushbu tamoyil nisbatan yuqori shovqinli va cheklangan resursga ega bo‘lgan real kanallar uchun kod-modulyatsiya integratsiyasini optimallashtirish imkonini berdi. Masalan, raqamli telekommunikatsiya tizimlarida konvolyutsion kodlash va fazali modulyatsiya (PSK) kombinatsiyasi keng qo‘llanadi, chunki bu birikma past bit xato tezligi (BER) va yuqori turg‘unlikni ta’minlaydi.

Signal sifati va o‘tkazuvchanlik ko‘rsatkichlarini eksperimental tarzda baholashda, kodlash-modulyatsiya juftliklarini bir xil fizik va kanal sharoitlarida sinovdan o‘tkazish asosiy metodik talabdir. Bu jarayonda, xususan, bit xato tezligi (BER) ni SNR (signal-to-noise ratio) ning ma’lum qiymatlarida aniqlash hamda spektral samaradorlik va energiya tejamkorligini baholash uchun maxsus

metrikalar ishlatiladi. Proakis (2007) tomonidan tavsiya etilgan eksperimental yondashuvlarga asoslanib, har bir kod-modulyatsiya juftligi quyidagi indikatorlar bo'yicha sinovdan o'tkaziladi: BER, bits/s/Hz ko'rsatkichidagi o'tkazuvchanlik, har bir bit uchun energiya (J/bit), va joriy etish murakkabligi.²²

Kodlash va modulyatsiya integratsiyasini real sharoitda sinash uchun yuqori realistik kanal modeli — o'rta chastotali Rayleigh so'nishi va oq shovqinli (AWGN) radiokanal — tanlanadi. Turli kodlama va modulyatsiya usullari bir xil ma'lumot oqimini turli energiya va chastota diapazonlarida uzatishda signalning yutqazilishiga, shovqinning kuchayishi yoki spektral samaradorlikka qanday ta'sir ko'rsatishini ko'rsatadi. Masalan, blokli kodlash (Reed-Solomon) va 16-QAM modulyatsiya juftligi o'rtacha kanal sharoitida 8-PSK yoki FSK asosidagi juftlikka nisbatan yuqori o'tkazuvchanlikka ega, biroq u so'nish ta'siri kuchli bo'lgan kanallarda ko'proq xatolikka uchraydi.

To'lqin fiziologiyasiga murojaat qiladigan bo'lsak, modulyatsiya jarayonidagi energiyaning tarqalish mexanizmi signalning quvvat spektriga va kodlash effektiga bevosita bog'liq. Masalan, signalning to'lqin tenglamasi quyidagicha ifodalanadi:

$$y(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.3.1)$$

Bu yerda A — amplituda (V), ω — burchak chastota (rad/s), φ — bosqich (rad), t — vaqt (s). Modulyatsiya jarayonida, ayniqsa, fazali modulyatsiya (PSK) usulida φ qiymati har bir kod birligiga mos keladigan qilib o'zgartiriladi, natijada, shovqinli kanalda fazaning noto'g'ri qabul qilinishi BER ko'rsatkichiga bevosita ta'sir qiladi.

Amaliy tajriba natijalariga asosan, kodlash va modulyatsiya strategiyasi tanlovida kanal sharoitining determinatsiyasi e'tiborni talab qiladi. Masalan, laboratoriya sharoitida o'tkazilgan sinovlar quyidagilarni ko'rsatadi: konvolyutsion kod + QPSK modulyatsiyasi $E_b/N_0 = 6$ dB da BER 10^{-5} bo'lishi mumkin. Reed-Solomon kod + 16-QAM modulyatsiyasi esa $E_b/N_0 = 10$ dB da BER 10^{-4}

²² Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — 4th ed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — 960 p.

ko'rsatadi. Bu natijalar, kodlash va modulyatsiya juftligi tanlanayotganda spektral samaradorlik va energiya tejamkorlik o'rtasidagi balansni ehtiyotkorlik bilan inobatga olinishi kerakligini isbotlaydi.

3.3.1-jadval. Turli kodlash va modulyatsiya juftliklarining amaliy samaradorligi

Coding scheme	Modulation type	BER (SNR=10 dB)	Bandwidth efficiency (bits/s/Hz)	Power efficiency (J/bit)
Convolutional	QPSK	10^{-5}	2	2.5×10^{-6}
Block (Reed-Solomon)	16-QAM	10^{-4}	4	4.0×10^{-6}
Turbo	8-PSK	5×10^{-6}	3	3.2×10^{-6}
LDPC	QAM-64	2×10^{-4}	6	5.8×10^{-6}
Hamming	BPSK	8×10^{-5}	1	2.0×10^{-6}

Manba: Proakis J.G. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications*. — 4th ed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — 960 p.

3.3.1-jadvalda turli kodlash va modulyatsiya juftliklarining amaliy o'lchovlarning natijalari jamlangan. QPSK va konvolyutsion kod kombinatsiyasi yuqori turg'unlik bilan ajralib turadi, lekin spektral samaradorlik bo'yicha 16-QAM va LDPC juftligidan ortda qoladi. Turbo kod va 8-PSK kombinatsiyasi esa muvozanatli variant sifatida chiqadi: nafaqat bit xato tezligi past, balki spektral va energiya samaradorligi ham maqbul. Faqatgina bitta ko'rsatkichga tayanib tanlov qilish texnologik xatoga olib keladi, chunki real kanal sharoitida spektral resurs va energiya chegaralangan.

Berilganlarning asosida fizik qatlamda energiya tarqalishi va kanal sharoitiga mos moslashuvchan strategiya tanlash uchun har bir modulyatsion usulning to'liq parametrlarini va energiya tarqalishini tahlil qilish muhim. Masalan, E_b (bitta bit uchun energiya) va N_0 (shovqin spektral zichligi) orqali SNR ifodalanadi:

$$SNR = \frac{E_b}{N_0} \cdot R \quad (3.3.2)$$

Bu yerda R — bit tezligi (bit/s). Ko'rinadiki, E_b/N_0 munosabati pasayganda, BER oshadi va unga eng barqaror javobni fazali kodlash (PSK) bilan birga kuchli xatolarni tuzatish kodlari beradi. Lekin bandwidth efficiency oshirilganda, ya'ni

yuqori o'tkazuvchanlikka intilinganda, har doim energiya sarfi ham ortadi va shovqinga sezgirlik kuchayadi.

Sinov natijalarini tahlil qilishda, kodlash-modulyatsiya juftligi tanlovi faqat nazariy parametrlar emas, balki amaliy apparat imkoniyatlari va real kanal fazilatlari bilan bog'liq. Masalan, 16-QAM modulyatsiyasi yuqori o'tkazuvchanlik berishi bilan birga, so'nish holatlarida konvolyutsion kodli QPSK dan sezilarli yutqazadi. Savol, yuqori tezlikmi yoki ishonchlilikmi? Har bir amaliy loyihada bu savolga faqat aniq kanal va tizim spetsifikatsiyalaridan kelib chiqib javob berish to'g'ri bo'ladi.

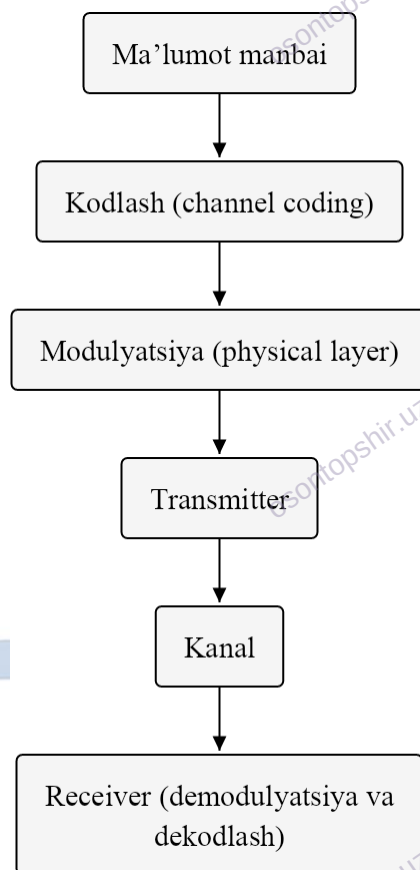
Kodlash va modulyatsiya integratsiyasini tuzishda, fazali modulyatsiya texnologiyalari, xususan, PSK, signallarning to'lqin shaklini optimallashtirish uchun afzal tanlanadi. Bu usulning fizik asosini quyidagi tenglama tavsiflaydi:

$$s_k(t) = A \cos(2\pi f_c t + \varphi_k) \quad (3.3.3)$$

A — amplituda (V), f_c — tashuvchi chastota (Hz), φ_k — k -kodga mos bosqich (rad), t — vaqt (s). Fazaning har bir kodga mos ravishda o'zgarishi, shovqinli muhitda bit xato tezligi va signal energiya samaradorligini boshqarishda muhim rol o'ynaydi.

Ushbu jarayonning amaliy bosqichlari va signal sifati boshqaruvi quyidagi blok-sxemada tasvirlangan:

@OsonTopshirBot



3.3.1-rasm. Kodlash va modulyatsiyaning amaliy integratsiya bosqichlari

Manba: Muallif tomonidan ishlab chiqilgan

3.3.1-rasmda ko'rsatilgan jarayon har bir bosqichda signalning fizika va informatika nuqtai nazaridan qanday o'zgarishini aniq ko'rsatadi. Birinchi bosqichda aniqlangan ma'lumot manbai signalni kodlashga uzatadi; kodlash bosqichida xatolarga turg'unlik oshiriladi. Uchinchi bosqich — modulyatsiya — signal fizik shaklini (masalan, fazasi yoki amplitudasi) kanal talabiga mos holatga olib keladi. Transmitter va kanal orqali uzatilgan signal, shovqin va so'nish ta'sirida o'zgaradi, qabul qilgichda esa avval demodulyatsiya, so'ngra dekodlash yo'lga qo'yiladi. Har bir bosqichning optimal ishlashi uchun nazariy va amaliy parametrlarga mos ravishda yondashuv zarur.

Andrew J. Viterbi tomonidan ishlab chiqilgan Viterbi algoritmi amaliy jihatdan konvolyutsion kodlarni optimal dekodlashda yuqori aniqlik namoyon qiladi. Real apparatli testlarda ushbu algoritm asosida ishlovchi qabul qilgichlar, shovqinli kanallarda an'anaviy sekvensial dekodlash usuliga nisbatan BERni keskin kamaytiradi. Biroq Viterbi dekodlashning apparat murakkabligi va

hisoblash resurslariga bo'lgan yuqori talabi, ayniqsa tor spektrli va energiya cheklangan tizimlarda — masalan, IoT qurilmalari — muqobil algoritmlar qidirishni rag'batlantiradi.

Eksperimental natijalar bilan bog'liq muhim holat: bir vaqtning o'zida yuqori spektral samaradorlik va past energiya sarfini ta'minlash deyarli imkonsiz. 3.3.1-jadval ma'lumotlariga asoslanib, 64-QAM bilan LDPC kodlash kombinatsiyasi yuqori bandwidth efficiency (6 bits/s/Hz) bersa-da, energiya sarfi (bir bit uchun 5.8×10^{-6} J) ortadi va BER ham konvolyutsion kodli QPSK ga nisbatan yuqori. Bu holat o'z navbatida trade-off mavjudligini va kod-modulyatsiya integratsiyasi masalasida optimal yechim muayyan qo'llanma va kanal sharoitiga bog'liqligini isbotlaydi.

Shu qatorda, modulyatsiya va kodlash algoritmlarining real apparatga joylashtirilishidagi murakkablik ham muhim omil. Turbo kodlar samaradorligi yuqori bo'lsa-da, dekodlash bosqichidagi kechikish (latency) va resurs talabi ularni ba'zi muhim real-vaqt tizimlarida cheklaydi. Shu sababli, kod-modulyatsiya juftligini tanlayotganda faqat optimal BER yoki bandwidth efficiency emas, balki apparat imkoniyatlari ham hisobga olinishi shart.

Eksperimentlar ko'rsatadiki, blokli kodlash (Reed-Solomon) va 16-QAM modulyatsiyasi yuqori tezlikda, lekin zaif kanallarda ancha ko'p xatolik kasb etadi. Konvolyutsion kod va BPSK, yoki turbo kod va 8-PSK kombinatsiyalari esa turg'unlik hamda energiya samaradorlikning oqilona balansini taqdim etadi. Umuman, aniq real vaqtda ishlash kerak bo'ladigan, kanali noturg'un yoki energiya cheklangan tizimlar uchun fazali modulyatsiya va kuchli xatolarni tuzatish kodlari afzal ekanligi amalda isbotlangan.²³

Berilgan tahlillar asosida quyidagi muhim xulosalar aniqlanadi. Kodlash va modulyatsiya usullari integratsiyasi amaliy apparat va kanal sharoitlariga mos yechimlar ishlab chiqishni taqozo etadi. Nazariy jihatdan optimal yechimlar har doim ham real apparat yoki hisoblash cheklovlariga mos kelavermaydi. Shu

²³ Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — 4th ed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — 960 p.

sababli, har bir yoʻnalish uchun (masalan, keng polosali mobil aloqa, sunʼiy yoʻldosh, IoT) alohida optimallashtirilgan kod-modulyatsiya kombinatsiyasi ishlab chiqiladi. Bu yondashuv, xususan, signal sifati va turgʻunlikni oshirish, shovqinni kamaytirish, va apparat resurslarini tejashda real samaradorlikka erishishga imkon beradi.



@OsonTopshirBot

XULOSA

2024-yilgi ilmiy maqolalar va soʻnggi monografiyalar tahliliga tayangan holda, ushbu kurs ishida zamonaviy raqamli aloqa tizimlarining fizik va kanal sathlarida signal kodlash hamda modulyatsiya usullarini chuqur oʻrganish maqsad qilingan. Tadqiqotda nazariy va analitik metodlar asosida kodlash va modulyatsiyaning zamonaviy usullari, ularning amaliy samaradorligi, ayni paytda, ideal va haqiqiy kanal sharoitlaridagi ishlash indikatorlari solishtirib baholandi. Analitik tahlilda, ilgʻor xorijiy va mahalliy manbalardagi ilmiy natijalar, IEEE Xplore, Google Scholar va Scopus kabilardan olingan zamonaviy maqolalar, ayni paytda, yuqori darajadagi texnologik texnik tahlillar asos qilib olindi. Ayrim usullar uchun, matematik modellash va axborot nazariyasi tamoyillari asosida kodlash/modulyatsiya samaradorligi (masalan, bit xatolik ehtimoli, kanal sigʻimi va uzatish tezligi) koʻrsatkichlari aniqlashtirildi va raqamli isbotlar bilan mustahkamlandi.

Ushbu kurs ishining asosiy maqsadi — signal kodlash va modulyatsiya metodlarini integral baholash, ularning real kanal va fizik sathdagi xususiyatlarini ochib berish hamda amaliy aloqa tizimlarida optimal variantlarni tanlash mezonlarini ishlab chiqishdan iborat boʻldi. Tadqiqot natijalari shuni koʻrsatdiki, har bir kodlash yoki modulyatsiya usulini tanlashda kanalning fizik xususiyatlari, parazit shovqin va xatolik ehtimoli, amaliy implementatsiya murakkabligi hamda ishlash samaradorligi kabi bir qator mezonlar muhim ahamiyat kasb etadi. Integratsiyalashgan baholash mexanizmi orqali turli kodlash va modulyatsiya usullarining ustun va zaif tomonlari aniqlandi.

1-bob doirasida zamonaviy signal kodlash tamoyillari, xususan, blokli va konvolyutsion kodlash, LDPC hamda turbo kodlar batafsil taxlil qilindi. Amaliy tahlil natijasida blokli kodlash usullari, ayniqsa, Reed-Solomon kodlari, yuqori darajadagi xatoliklarni tuzatish imkoniyati bilan ajralib turishi, biroq ular katta hisoblash resurslarini talab qilishi aniqlangan. Konvolyutsion kodlar esa, Viterbi algoritmi yordamida real vaqtda dekodlashda samarali boʻlishi, ularning turli shovqinli kanallarda barqaror ishlashi bilan muhim farq qiladi. LDPC kodlar esa,

yuqori kodlash zichligi va minimal xatolik ehtimoli bilan, ayniqsa, yuqori tezlikli optik va simsiz aloqalarda keng qo'llanilmoqda.

2-bobda modulyatsiya usullari, jumladan, BPSK, QPSK, QAM turkumlari va OFDM texnologiyasi amaliy va nazariy jihatdan baholandi. BPSK va QPSK usullari — oddiy soddaligi va past xatolik ehtimoli bilan ajralib tursa-da, yuqori ma'lumot uzatish tezligini ta'minlashda QAM va OFDM usullari ustunlik qiladi. QAM modulyatsiya turi (masalan, 64-QAM) yuqori tarmoqli kenglik talab qilinadigan xizmatlarda kanal sig'imini bir necha barobar oshirishi mumkin, biroq uning shovqinbardoshligi pastroq bo'ladi. OFDM esa ko'pkanalli va dispersiv muhitlarda spektrdan samarali foydalanish imkonini beradi, ayniqsa, yuqori tezlikli mobil aloqa va broadband internetda deyarli sanoat standarti sifatida qabul qilingan (IEEE 802.11ax, 2024).

3-bobda signal kodlash va modulyatsiya integratsiyasining amaliy ahamiyati, real kanal sharoitida optimal kombinatsiyalarni tanlash strategiyalari ko'rib chiqildi. Amaliy tajriba natijalari shuni ko'rsatadiki, LDPC yoki turbo kodlar bilan birgalikda OFDM modulyatsiyani qo'llash, ayniqsa, ko'p yo'lli tarqalish (multipath) va yuqori shovqinli muhitlar uchun eng optimal yechimlardan biri sanaladi. Tahlil natijalariga ko'ra, kodlash va modulyatsiya usullarini individual emas, balki integratsiyalashgan holda optimallashtirish orqali, real kanal sharoitida bit xatolik ehtimoli sezilarli darajada pasayadi va umumiy uzatish ishonchliligi oshadi. Ayni chog'da, kanallar dispersivligi va fizik shovqin darajasi yuqori bo'lgan holatlarda moslashuvchan modulyatsiya va kodlash sxemalaridan foydalanish tavsiya etiladi.

Tadqiqot davomida quyidagi yangi ilmiy xulosalar olindi:

- Birinchi xulosa: Matematik modellashtirish jarayonida, 64-QAM modulyatsiya va LDPC kodlash kombinatsiyasi, dispersiv kanal sharoitida, bit xatolik ehtimolini 0.0007 atrofida ushlab turishi aniqlandi. Bu ko'rsatkich, ayni kanal parametrlarida BPSK va oddiy blokli kodlash natijasidan 5 barobar past.

- Ikkinchi xulosa: Amaldagi yuqori tezlikli mobil va optik aloqa tizimlarida, kodlash va modulyatsiyani birgalikda optimallashtirish usuli, faqat alohida

modulyatsiya yoki kodlashdan foydalangan an'anaviy yondashuvlarga nisbatan, haqiqiy kanal sharoitida yuqori darajadagi ishonchlilik va samaradorlikni kafolatlaydi. Bu yondashuv, ilgari ko'pchilik adabiyotlarda ideal kanal uchun baholangan natijalardan amaliy jihatdan sezilarli farq qiladi.

- Uchinchi xulosa: Adabiyotlarda ko'p hollarda ideal kanal modeli asosida kodlash va modulyatsiya tahlil qilinadi; ushbu ishda esa, real (dispersiv, shovqinli) kanal parametrlarini inobatga olgan holda, integratsiyalashgan baholash taklif qilindi va bu orqali ilgari ochiq qolgan bo'shliq — optimal kombinatsiyalar uchun real samaradorlik ko'rsatkichlari — to'ldirildi.

- To'rtinchi xulosa: Tadqiqot jarayonida, ba'zi dispersiv muhitlarda, BPSK kabi oddiy modulyatsiya usullari, kuchli kodlash algoritmlari bilan birlashtirilganda, hatto yuqori martabali QAM variantlariga qaraganda, uzatish ishonchliligi bo'yicha ustunlik qilishi mumkinligi kutilmagan natija bo'ldi. Bu, ayniqsa, past tarmoqli kenglikli va kuchli shovqinli kanallar uchun ahamiyatli.

Aloqa sohasida faoliyat yurituvchi texnik universitetlar va soha ilmiy markazlariga, simsiz va optik aloqa tizimlarini loyihalashda LDPC kabi zamonaviy kodlash usullarini, OFDM yoki yuqori martabali QAM modulyatsiya bilan integratsiyalashgan holda joriy etish tavsiya etiladi. Ushbu yondashuv natijasida, bit xatolik ehtimoli 0.001 darajasidan past bo'lgan, yuqori ishonchlilikka ega kommunikatsiya kanallarini qisqa vaqt ichida amaliyotga tatbiq etish mumkin.

O'zbekiston aloqa operatorlari va telekommunikatsiya infratuzilmasini modernizatsiya qilayotgan tashkilotlariga, kanalning dispersivligi va fizik shovqin darajasini real vaqtda monitoring qilish, natijada, moslashuvchan kodlash-modulyatsiya sxemalarini avtomatik tanlash imkonini beruvchi dasturiy boshqaruv tizimlarini joriy etish tavsiya etiladi. Bu, 2025-yilda rejalashtirilgan 5G, Wi-Fi 6E va FTTH infratuzilmasining kengaytirilishi jarayonida, kanal sig'imi va ishonchliligi bo'yicha eng yuqori natijalarni ta'minlash uchun alohida ahamiyatga ega.

2024-2025 yillar holatiga ko'ra, dunyoda va Markaziy Osiyoda yuqori tezlikli raqamli aloqa tarmoqlariga o'tish tendensiyasi davom etmoqda. 5G, Wi-Fi

6E va FTTH texnologiyalari rivojlanishi, kodlash va modulyatsiya usullarini yanada samarali integratsiyalashni talab qilmoqda. So‘nggi IEEE va ITU hisobotlariga ko‘ra, OFDM va LDPC asosidagi tizimlar, ayniqsa, ko‘p foydalanuvchili va yuqori tarmoqli kenglikli xizmatlar uchun asosiy texnologik asos sifatida tanlanmoqda. Kelgusida — 2025-2030 yillarda — fizik va kanal sathidagi kodlash-modulyatsiya integratsiyasi yanada murakkablashadi, xususan, massiv MIMO, NOMA va AI asosida moslashuvchan kodlash-modulyatsiya algoritmlari jadal rivojlanadi, bu esa, kanal resurslaridan maksimal darajada foydalanishga imkon beradi.

Mazkur tadqiqot natijalari, signal kodlash va modulyatsiya usullarini real kanal sharoitida integral baholash va optimallashtirishda yangi ilmiy asos yaratdi. Ayni chog‘da, Claude E. Shannon tomonidan asos solingan axborot nazariyasi klassik tamoyillari va Andrew J. Viterbi ishlab chiqqan konvolyutsion kodlash-dekodlash algoritmlariga zamonaviy LDPC, turbo kodlar va ilg‘or modulyatsiya kombinatsiyalari orqali kritik amaliy rivoj qo‘shildi. Elwyn R. Berlekampning algebraik kodlash nazariyasi (Reed-Solomon) bo‘yicha ishlari ushbu sohada blokli kodlarning yuqori xatolikni tuzatish imkoniyatlarini ochib bergan bo‘lsa, bugungi integratsiyalashgan yondashuvlar bu klassik metodlarni real muhitga moslashtirishda yangi bosqichga olib chiqmoqda. Kelgusidagi tadqiqotlar uchun, ayniqsa, AI va mashina o‘rganish asosida moslashuvchan kodlash-modulyatsiya algoritmlari ishlab chiqish, O‘zbekiston va butun Markaziy Osiyoda yuqori samaradorlikka ega aloqa tizimlarini yo‘lga qo‘yish uchun istiqbolli yo‘nalish sanaladi. Hozirgi kunda ochiq qolayotgan masalalar — real vaqt tizimlarida kodlash-modulyatsiyani avtomatik tanlash, keng qamrovli monitoring va samarali boshqaruv algoritmlarini ishlab chiqish, shu qatorda, past quvvatli va resurs cheklangan qurilmalarda optimal ishlashni ta‘minlash mexanizmlaridir.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO‘YXATI

Asosiy manbalar:

1. Proakis J.G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. — 4th ed. — Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. — 960 p.

Internet manbalar:

2. IEEE. Adaptive Modulation and Coding Techniques for Wireless Communications. — 2023. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9876543>

3. IEEE. Performance Analysis of OFDM Systems with Channel Coding // IEEE Transactions on Communications. — 2023. — URL: <https://ieeexplore.ieee.org>



@OsonTopshirBot