MODULYATSIYA TURLARI: AM, FM, PM, ASK, FSK, PSK

Axmedov Jaloliddin
Farg‘ona Davlat Texnika Universiteti
ATT fakulteti 732-23 guruh talabasi

Annotatsiya. Ushbu maqolada zamonaviy telekommunikatsiya tizimlarining poydevori hisoblanmish modulyatsiya usullari keng va tizimli tarzda ko‘rib chiqiladi. Analog modulyatsiya usullari amplituda modulyatsiyasi (AM), chastota modulyatsiyasi (FM) va faza modulyatsiyasi (PM) hamda raqamli modulyatsiya usullari amplitudali manipulyatsiya (ASK), chastotali manipulyatsiya (FSK) va fazali manipulyatsiya (PSK) - ularning matematik asoslari, fizik mohiyati, texnik xususiyatlari va amaliy qo‘llanilish sohalari nuqtai nazaridan tahlil qilinadi. Maqola muhandislik oliygohlarining talabalari, telekommunikatsiya mutaxassislari va signal qayta ishlash sohasida izlanuvchi tadqiqotchilar uchun mo‘ljallangan.

Kalit so‘zlar: modulyatsiya, demodulyatsiya, tashuvchi signal, axborot signali, AM, FM, PM, ASK, FSK, PSK, bandlanganlik, shovqinga chidamlilik, raqamli aloqa, spektral samaradorlik.

Kirish

Axborot uzatish insoniyat tarixidagi eng muhim texnologik ehtiyojlardan biridir. Qadimdan tortib hozirgi kungacha odamlar signal va xabarlarni uzoq masofaga uzatishning turli usullarini kashf etib kelgan: tutun signallaridan tortib telegrafga, radioto‘lqinlardan tortib optik tolali kabellargacha. Ammo bu taraqqiyotning markazida doimo bitta asosiy muammo turadi - axborotni fizik muhit orqali eng samarali va xatosiz qanday uzatish mumkin?

Shu savolga javob beruvchi fundamental texnologiya - bu modulyatsiya hisoblanamiz. Modulyatsiya (lotincha modulatio – o‘lchov, ritm) axborot signalining parametrlarini yuqori chastotali tashuvchi to‘lqinning biror xususiyatiga (amplituda, chastota yoki faza) kiritish jarayonidir. Bu jarayon nafaqat signalni uzoq masofaga uzatish imkonini beradi, balki bir vaqtda ko‘plab kanallardan foydalanish, shovqinga

chidamlilikni oshirish va chastota spektridan samarali foydalanish imkoniyatlarini ham ta'minlaydi.

Bugungi kunda modulyatsiya usullarini bilmasdan turib zamonaviy texnologiyalarni mobil aloqa (4G, 5G), sun'iy yo‘ldosh aloqasi, Wi-Fi, Bluetooth, raqamli radio va televizion eshittirish kabi tizimlarni tushunib bo‘lmaydi. Amalda, siz hozir ushbu maqolani o‘qish uchun foydalanayotgan qurilma ham bir necha modulyatsiya usullarini bir vaqtda qo‘llaydi. Ushbu maqolada biz modulyatsiyaning olti asosiy turini – uchta analog va uchta raqamli – batafsil ko‘rib chiqamiz. Har bir tur uchun fizik ma'no, matematik ifoda, afzallik va kamchiliklar, hamda real hayotdagi qo‘llanilish misollari keltiriladi.

Modulyatsiyaning umumiy nazariyasi

Tashuvchi signal va axborot signali

Har qanday modulyatsiya tizimida ikkita asosiy signal mavjud bo‘ladi:

- **Tashuvchi signal (carrier signal)** – yuqori chastotali, doimiy sinusoidal to‘lqin. Uning vazifasi axborotni uzoq masofaga "olib o‘tish"dir.
- **Axborot (modullovchi) signal** – past chastotali, uzatilishi kerak bo‘lgan haqiqiy signal. Bu ovoz, ma'lumot, video yoki boshqa axborot bo‘lishi mumkin.

Tashuvchi signalning umumiy matematik ko‘rinishi quyidagicha:

$$c(t) = Ac * \cos(2\pi * fc * t + \phi)$$

Bu yerda: Ac - amplituda (signal kuchi), fc - tashuvchi chastota (Gts), t - vaqt (s), ϕ - boshlang‘ich faza (radian). Modulyatsiya bu uchta parametrdan birini axborot signali asosida o‘zgartirish orqali amalga oshiriladi.

Modulyatsiyaning asosiy tasnifi

Barcha modulyatsiya usullari ikki katta guruhga bo‘linadi:

Tur	Usullar	Qo‘llanilish
Analog	AM, FM, PM	Radio, televizor, analitik o‘lchash
Raqamli	ASK, FSK, PSK (va ularning kombinatsiyalari)	Internet, mobil aloqa, sun'iy yo‘ldosh

Analog modulyatsiya usullari

Analog modulyatsiyada axborot signali ham, tashuvchi tamomila uzluksiz (kontinual) signallar bo‘lib, modulyatsiya jarayonida tashuvchining biror parametri uzluksiz ravishda o‘zgarib turadi. XIX asr oxiri va XX asrning birinchi yarmida kashf etilgan bu usullar hozirga qadar keng qo‘llanilmoqda.

Amplituda Modulyatsiyasi (AM - Amplitude Modulation)

Tarix va kashfiyot: AM texnologiyasi 1906 yilda amerikalik muhandis Reginald Fessenden tomonidan ixtiro qilingan va birinchi marta ovozli radio eshittirish uchun qo‘llanilgan. 1920-yillarga kelib AM radioeshittirish butun dunyo bo‘ylab keng tarqalib, axborot tarqatishning inqilobiy vositasiga aylandi. Bugun ham ko‘plab mamlakatlar AM to‘lqinida uzun va o‘rta to‘lqin diapazonida eshittirishni davom ettirmoqda.

Fizik mohiyat va matematik ifoda: AM modulyatsiyasida tashuvchi signalning amplitudasi axborot signaliga mutanosib ravishda o‘zgartiriladi, chastota va faza esa o‘zgarishsiz qoladi.

Modullovchi signal: $m(t) = Am * \cos(2\pi * fm * t)$

AM signalining umumiy ko‘rinishi:

$$s(t) = [Ac + Am * \cos(2\pi * fm * t)] * \cos(2\pi * fc * t)$$

Bu yerda modulyatsiya indeksi (chuqurligi): $\mu = Am / Ac \quad (0 \leq \mu \leq 1)$

Modulyatsiya indeksi $\mu = 0$ bo‘lsa, modulyatsiya yo‘q (faqat tashuvchi). $\mu = 1$ bo‘lsa to‘liq modulyatsiya. $\mu > 1$ bo‘lsa ortiqcha modulyatsiya (signal buziladi va demodulatsiya qilib bo‘lmaydi).

Chastota spektri: AM signali uchta komponentdan iborat: tashuvchi fc, yuqori yon tasma fc + fm, quyi yon tasma fc - fm. Shuning uchun AM signalining umumiy kengligi B = 2 * fm ga teng. Bu nisbatan keng polosani talab qiladi.

✓ Afzalliklari	X Kamchiliklari
Oddiy va arzon qurilmalar	Shovqinga zaif chidamliligi
Uzoq masofaga tarqalishi	Past energetik samaradorlik (tashuvchiga kuch sarflanadi)
Qulay demodulatsiya (oddiy detektor)	Keng chastota polosi talab qilinadi
O‘rta va uzun to‘lqinda keng tarqalgan	Shovqin amplitudaga ta'sir qiladi

Qo‘llanilish sohalari: AM qo‘llaniladi: O‘rta to‘lqin (MW: 530-1710 kHz) va uzun to‘lqin (LW: 148-283 kHz) radioeshittirish; aviatsiyada VHF AM aloqa (118-137 MHz); qisqa to‘lqin (SW) xalqaro eshittirish; ba'zi maxsus o‘lchash asboblarida.

Chastota Modulyatsiyasi (FM - Frequency Modulation)

Tarix va kashfiyot: FM texnologiyasini 1933 yilda amerikalik muhandis Edwin Howard Armstrong ixtiro qildi. Armstrong AM radiosining shovqinga zaif ekanligini anglab, prinsipal jihatdan yangi yondashuvni taklif qildi. Dastlab FM uchun etarlicha chastota bo‘shligi yo‘q deb qarshilik ko‘rsatilgan bo‘lsa-da, 1940-yillardan boshlab FM radioeshittirish tizimli ravishda joriy etila boshlandi va bugungi kunda FM eng ommaviy analog radioeshittirish standarti hisoblanadi.

Fizik mohiyat va matematik ifoda: FM modulyatsiyasida tashuvchi signalning chastotasi axborot signaliga mutanosib ravishda o‘zgartiriladi. Amplituda va faza o‘zgarishsiz qoladi.

FM signali: $s(t) = Ac * \cos[2\pi * fc * t + 2\pi * kf * \int m(\tau)\, d\tau]$

Modulyatsiya indeksi: $\beta = \Delta f / fm = kf * Am / fm$

Bu yerda Δf - maksimal chastota og‘ishi (deviatsiya), kf - chastota sezgirligi koeffitsiyenti. Carson qoidasiga ko‘ra FM signalining taxminiy kengligi: $B_FM \approx 2 * (\Delta f + fm) = 2 * fm * (\beta + 1)$

FM va AM o‘rtasidagi asosiy farq: FM ning AM dan asosiy ustunligi – shovqinlar asosan amplitudaga ta'sir qiladi, chastotaga emas. Shuning cartoon FM qabul qilgich oddiy limitlash (limiting) orqali amplituda shovqinlarini bartaraf etadi. Bu FMni amalda AM dan ancha sifatli qiladi.

Afzalliklari	X Kamchiliklari
Yuqori sifatli ovoz uzatish	Keng chastota polosi talab qilinadi (AM ga nisbatan)
Shovqinga yuqori chidamliligi / Dinamik diapazon katta	Signal markaziy stansiyadan uzoqlashsa, tez yo‘qoladi
Interferensiyaga chidamliligi (capture effect)	Qabul qilgich AM ga nisbatan murakkabroq (Qopqon effekt ba'zan noqulaylik qiladi)

Qo‘llanilish sohalari: FM qo‘llaniladi: UHF radioeshittirish (87.5-108 MHz barcha FM radio stantsiyalar); raqamli audio eshittirish bazasi; analog televizorning ovoz trakti; audio signallarni professional uzatish; ba'zi telemeasurement tizimlarida.

Faza Modulyatsiyasi (PM – Phase Modulation)

Fizik mohiyat: Faza modulyatsiyasida tashuvchi signalning boshlang‘ich fazasi axborot signaliga mutanosib ravishda o‘zgartiriladi. Amplituda va chastota nominal qiymatlarda saqlanadi.

PM signali: $s(t) = Ac * \cos [2\pi * fc * t + kp * m(t)]$

Bu yerda kp - faza sezgirligi koeffitsiyenti (rad/volt). PM va FM o‘rtasida juda yaqin matematik bog‘liqlik mavjud: PM ni aniqlash uchun axborot signalini integrallasak FM hosil bo‘ladi va aksincha. Shuning uchun ular ba'zan burchak modulyatsiyasi (angle modulation) deb birlashtiriladi.

PM va FM o‘rtasidagi farq: Amaliy jihatdan PM va FM ning ajratuvchi belgisi – chastota deviatsiyasining axborot signali chastotasiga bog‘liqligi. FM da deviatsiya doimiy ($\beta = \Delta f / fm$), PM da esa faza og‘ishi doimiy va chastotaga bog‘liq emas. Bu ayrim tizimlarda PM ni FM dan afzal qiladi.

Qo‘llanilish sohalari: PM qo‘llaniladi: Raqamli modulyatsiya tizimlarining asosi (PSK PM ning raqamli versiyasidir); yulduzlar to‘pi (constellation) diagrammalarida fazani belgilash; fazali PLL (Phase-Locked Loop) sxemalarida; sonar va radar tizimlarida.

Raqamli modulyatsiya usullari (Manipulyatsiya)

Zamonaviy raqamli kommunikatsiya tizimlarida uzatiladigan axborot diskret ya'ni 0 va 1 lardan iborat ikkilik ketma-ketlik ko‘rinishida bo‘ladi. Bunday axborotni analog tashuvchi yordamida uzatish uchun maxsus usullar qo‘llaniladi. Raqamli modulyatsiyada tashuvchining amplitudasi, chastotasi yoki fazasi diskret qiymatlarda o‘zgartiriladi. Bu jarayonni texnik adabiyotda ko‘pincha manipulyatsiya deb atashadi.

Amplitudali Manipulyatsiya (ASK - Amplitude Shift Keying)

Ishlash prinsipi: ASK - raqamli modulyatsiyaning eng oddiy turi. Bunda tashuvchi signalning amplitudasi uzatilayotgan raqamli belgiga mos ravishda diskret

ravishda o‘zgartiriladi. Eng oddiy holda – OOK (On-Off Keying) - "1" uchun signal bor, "0" uchun signal yo‘q.

Ikkilik ASK signali (OOK): $s(t) = Ai * \cos(2\pi * fc * t)$, $Ai \in \{0, Ac\}$

Ko‘p darajali ASK (M-ASK) da M xil amplituda qiymati ishlatiladi. Masalan, 4-ASK da amplitudalar {A1, A2, A3, A4} bo‘lib, har bir simvol log2(4) = 2 bit axborot olib yuradi. Shunday qilib, spektral samaradorlik oshadi.

Spektral xususiyatlari: ASK signalining kengligi AM ga o‘xshash tashuvchi atrofida yon tasmalar hosil bo‘ladi. Ammo raqamli belgida keskin o‘tishlar bo‘lgani uchun amalda filtratsiya muhim ahamiyat kasb etadi.

Afzalliklari	Kamchiliklari
Oddiy realizatsiya	Shovqin va quvvat o‘zgarishlariga zaif
M-ASK bilan yuqori spektral samaradorlik	Kanal quvvati o‘zgarsa xato ehtimoli oshadi
Past energiya sarfi (OOK)	Noproporsional kanal sharoitlarida samarasiz

Qo‘llanilish: ASK qo‘llaniladi: Optik tolali aloqada (OOK eng keng tarqalgan ko‘rinish – lazer yoritib/o‘chirib uzatiladi); RFID texnologiyasida; infraqizil pultlarda; ba'zi modem standartlarida (QAM ning tarkibi sifatida).

Chastotali Manipulyatsiya (FSK - Frequency Shift Keying)

Ishlash prinsipi: FSK da tashuvchi signalning chastotasi raqamli belgiga mos ravishda diskret o‘zgartiriladi. Amplituda o‘zgarishsiz qoladi.

Ikkilik FSK:

$$\mathbf{s(t) = Ac * \cos(2\pi * f1 * t) \quad agar\ bit = 1}$$

$$\mathbf{s(t) = Ac * \cos(2\pi * f0 * t) \quad agar\ bit = 0}$$

Bu yerda f1 va f0 ikkita turli chastota (mark va space chastotalar). Ularning orasidagi farq $\Delta f = |f1 - f0|$ deyiladi va bu FSK signalining muhim parametri hisoblanadi.

BFSK va MFSK: Ikkilik FSK (BFSK) da faqat ikkita chastota ishlatiladi. Ko‘p darajali FSK (MFSK) da M xil chastota ishlatiladi, bu esa bir simvolda ko‘proq bit uzatish imkonini beradi. Masalan, 8-FSK da 8 ta chastota bo‘lib, har bir simvol 3 bit olib yuradi.

Kogerent va nokogerent FSK: FSK ikkita asosiy sinfga bo‘linadi: kogerent FSK (qabul qiluvchi fazani biladi – murakkabroq, ammo yaxshiroq) va nokogerent FSK (faza ma'lumoti kerak emas – oddiyroq, ammo bir oz zaifroq). Amaliyotda nokogerent FSK ko‘proq qo‘llaniladi, chunki amalga oshirish ancha osonroq.

Afzalliklari	X Kamchiliklari
ASK ga nisbatan shovqinga chidamliroq	Keng chastota polosi talab qilinadi
Doimiy konvert (amplituda o‘zgarmaydi)	MFSK da spektral samaradorlik pasayadi
Oddiy nokogerent qabul qilgich	PSK ga nisbatan spektral samaradorlik pastroq
Ionosfera va HF kanallar uchun qulay	Ko‘p darajali versiyalarda daraja murakkab

Qo‘llanilish: FSK qo‘llaniladi: Qisqa to‘lqin (HF) radio aloqa va teleks; eski telefon modemlarida (Bell 103: 300 baud); AFSK ovozli chastotalar orqali FSK (packet radio, APRS GPS treker); Bluetooth fizik qatlami (GFSK - Gaussian FSK); tibbiy biosensorlarda.

Fazali Manipulyatsiya (PSK – Phase Shift Keying)

Ishlash prinsipi: PSK - zamonaviy raqamli aloqaning asosiy ustunlaridan biri. Bunda tashuvchi signalning fazasi uzatilayotgan raqamli belgiga mos ravishda diskret o‘zgartiriladi. Amplituda va chastota o‘zgarishsiz qoladi.

PSK signalining umumiy ko‘rinishi: $si(t) = Ac * \cos(2\pi * fc * t + \phi i)$, where $\phi i = 2\pi(i - 1)/M$

PSK turlari: PSK ning bir necha asosiy turi mavjud:

Tur	Faza holatlari	Bir simvolda bitlar	Qo‘llanilish
BPSK	2 ta (0°, 180°)	1 bit	GPS, DVB-S, eshik chidamliligi uchun
QPSK	4 ta (0°, 90°, 180°, 270°)	2 bit	Wi-Fi, WiMAX, 3G/4G
8-PSK	8 ta (45° oralig‘ida)	3 bit	DVB-S2, mikrotolqin liniyalari
16-PSK	16 ta (22.5° oralig‘ida)	4 bit	Yuqori tezlikli modemlar

BPSK: Ikkilik Fazali Manipulyatsiya (BPSK) PSK ning eng oddiy va shovqinga chidamli turi. Faqat ikkita faza holati: 0° (bit "1" uchun) va 180° (bit "0" uchun). Matematik jihatdan bu shunchaki tashuvchining belgisini o‘zgartirishga teng: $s(t) = \pm Ac * \cos(2\pi * fc * t)$. BPSK eng yuqori shovqin immunitetiga ega bo‘lgan PSK turi bo‘lib, GPS tizimlari, sun'iy yo‘ldosh aloqasi va shovqinli muhitlarda qo‘llaniladi.

QPSK: To‘rt Fazali Manipulyatsiya (QPSK) da to‘rtta faza holati ishlatiladi: 0°, 90°, 180°, 270°. Har bir simvol 2 bit axborot olib yuradi. Bu BPSK ga nisbatan 2 barobar ko‘proq ma'lumot o‘tkazish imkonini beradi, shu bilan birga xuddi shuncha chastota kengligini ishlatadi. Shuning uchun QPSK – spektral samaradorlik va shovqin immuniteti o‘rtasida muvozanatning ajoyib misoli hisoblanadi.

DPSK - Differensial Fazali Manipulyatsiya: DPSK da mutlaq faza qiymati emas, balki qo‘shni simvollar orasidagi faza o‘zgarishi ma'lumot olib yuradi. Bu qabul qilgich tomonidagi faza mos ko‘chirish muammosini hal etadi va amaliy tizimlarda keng qo‘llaniladi.

Afzalliklari	X Kamchiliklari
Yuqori spektral samaradorlik	Kogerent qabul - fazani bilish kerak
Shovqinga yaxshi chidamliligi	Ko‘p darajali PSK (16-PSK va yuqori) da kanal sifati yaxshi bo‘lishi shart
Doimiy amplituda - kuchaytirgichlarga qulay	Qabul qilgich murakkab (fazani kuzatish tizimi kerak)
QPSK - zamonaviy standartlarning asosi	Yuqori SNR talab qilinadi

Qo‘llanilish: PSK qo‘llaniladi: Wi-Fi (IEEE 802.11 - BPSK va QPSK asosiy rejimlar); 3G (UMTS/W-CDMA - QPSK); 4G LTE (QPSK va QAM kombinatsiyasi); GPS navigatsiya tizimi (L1/L2 signallar BPSK); DVB-S/S2 sun'iy yo‘ldosh aloqasi; Zigbee (IoT); Bluetooth.

Modulyatsiya usullarini qiyosiy tahlili

Asosiy parametrlar bo‘yicha taqqoslash

Parametr	AM	FM	PM	ASK	FSK
O‘zgaruvchi parametr	Amplituda	Chastota	Faza	Amplituda	Chastota
Signal turi	Analog	Analog	Analog	Raqamli	Raqamli

Shovqin immuniteti	Past	Yuqori	Yuqori	Past	O‘rta
Spektral samaradorlik	Past	Past	O‘rta	O‘rta	Past
Texnik murakkablik	Past	O‘rta	O‘rta	Past	O‘rta
Asosiy qo‘llanish	MW radio	FM radio	Baza	Optik tolali	HF/IoT

Bit Xato Ehtimoli (BER) taqqoslamasi

Raqamli modulyatsiya usullari samaradorligini baholashda asosiy ko‘rsatkich BER (Bit Error Rate) ya'ni bit xato ehtimoli hisoblanadi. AWGN (oq Gausslik shovqin) kanalida:

Modulyatsiya	BER formulasi	Tavsif
BPSK/QPSK	Pe = Q(√(2 * Eb / N0))	Eng past xato ehtimoli
BFSK (nokogerent)	Pe = 0.5 * exp(-Eb / 2N0)	BPSK dan -3dB zaifroq
OOK/ASK	Pe ≈ Q(√(Eb / N0))	BPSK dan -3dB zaifroq

Zamonaviy kombinatsiyali modulyatsiya usullari

QAM - Kvadraturli Amplituda Modulyatsiyasi: Zamonaviy aloqa tizimlarida ko‘pincha PSK va ASK birlashtiriladi bu QAM (Quadrature Amplitude Modulation) deyiladi. QAM da ham amplituda, ham faza bir vaqtda o‘zgartiriladi. Masalan, 16-QAM da 16 ta turli holat bo‘lib, har bir simvol 4 bit olib yuradi. 256-QAM da esa har simvol 8 bit - bu Wi-Fi 6 va 4G LTE standartlarida qo‘llaniladi.

OFDM — Ko‘p Tashuvchili Modulyatsiya: OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) — yuzlab yoki minglab ortogonal tashuvchilardan foydalanib, ma'lumotni parallel ravishda uzatuvchi usul. Har bir tashuvchi PSK yoki QAM bilan modulyatsiyalanadi. OFDM Wi-Fi, LTE, 5G, DVB-T kabi zamonaviy standartlarda asosiy texnologiya hisoblanadi.

GMSK va π/4-QPSK: Amaliy tizimlarda signalning o‘tish paytida keskin fazaviy sakrashlar muammosini hal qilish uchun GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) — GSM tizimining modulyatsiyasi va π/4-QPSK — TDMA aloqasida qo‘llaniladi. Bu usullar signal zarb o‘tkazish xususiyatlarini yaxshilaydi.

Amaliy misollar va real tizimlar

GPS — Global Joylashuv Tizimi: GPS tizimlari BPSK modulyatsiyasidan foydalanadi. GPS L1 signali (1575.42 MHz) ikkilik psevdotasodifiy ketma-ketlikni (PRN) BPSK bilan modulyatsiyalaydi. Bunday modulyatsiya shovqinli va interferensiyali muhitda ham ishonchli ishlash imkonini beradi.

Wi-Fi (IEEE 802.11ac/ax): Zamonaviy Wi-Fi standarti signal sifatiga qarab modulyatsiyani avtomatik tanlaydi: past sifatli kanal uchun BPSK → QPSK, yaxshi kanalda 16-QAM → 64-QAM → 256-QAM → 1024-QAM ishlatiladi. Bu Adaptive Modulation and Coding (AMC) deb ataladi.

4G LTE va 5G: LTE (4G) standarti OFDMA (OFDM + multiple access) va SC-FDMA texnologiyalarini qo‘llaydi. Yuqori liniyada 64-QAM, quyi liniyada QPSK dan 256-QAM gacha ishlatiladi. 5G NR standarti esa 256-QAM dan foydalanib, spektral samaradorlikni yanada oshiradi.

Optik Tolali Aloqa: Zamonaviy optik tolali tizimlar DP-QPSK (Dual-Polarization QPSK) va DP-16QAM texnologiyalarini qo‘llab, bir optik toladan 400 Gbps va undan yuqori tezlikda ma'lumot uzatadi. Bu texnologiya Internet infrastrukturasining asosiy toshi hisoblanadi.

Xulosa

Ushbu maqolada biz modulyatsiyaning oltita asosiy turini — AM, FM, PM, ASK, FSK va PSK — har tomonlama ko‘rib chiqdik. Quyidagi asosiy xulosalarni qilish mumkin:

- Analog modulyatsiya (AM, FM, PM) asosan radio eshittirish va klassik aloqa tizimlarida qo‘llanilsa, bugungi kunda ham o‘z ahamiyatini saqlab qolmoqda.
- Raqamli modulyatsiya (ASK, FSK, PSK) zamonaviy axborot tizimlarining asosi bo‘lib, yuqori tezlik, ishonchlilik va spektral samaradorlikni ta'minlaydi.
- PSK va QAM ularning kombinatsiyalari eng keng qo‘llaniluvchi zamonaviy usullar bo‘lib, Wi-Fi, 4G/5G, sun'iy yo‘ldosh va GPS kabi tizimlarda o‘zak texnologiya sifatida ishlatiladi.

- Kelajak tendensiyasi — yuqori darajali QAM (1024-QAM, 4096-QAM), OFDM va massiv MIMO texnologiyalari bilan spektral samaradorlikni yanada oshirish yo‘lida davom etmoqda.

Modulyatsiya nazariyasi — zamonaviy muhandislikning poydevori. Har bir telefon qo‘ng‘irog‘i, har bir internet paket, har bir GPS koordinatasi — bu texnologiyalarning mevasi. Ularni chuqur tushunish nafaqat muhandislar, balki texnologiya bilan shug‘ullanadigan har bir inson uchun muhim bilim hisoblanadi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Haykin, S. (2001). Communication Systems. 4th Edition. John Wiley & Sons.
2. Proakis, J.G. & Salehi, M. (2008). Digital Communications. 5th Edition. McGraw-Hill.
3. Sklar, B. (2001). Digital Communications: Fundamentals and Applications. 2nd Ed. Prentice Hall.
4. Couch, L.W. (2013). Digital and Analog Communication Systems. 8th Edition. Pearson.
5. IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) Standard, IEEE, 2021.
6. 3GPP TS 36.211 — LTE Physical Channels and Modulation, Release 16.
7. ITU-R SM.1536 — Determination of the necessary bandwidth, International Telecommunication Union.