CHASTOTA SPEKTRI VA UNING TAQSIMLANISHI

Djurayev Ilhomjon
Farg‘ona Davlat Texnika Universiteti
ATT fakulteti 732-23 guruh talabasi

Annotatsiya. Ushbu maqolada chastota spektri tushunchasi, uning fizik va matematik asoslari, Fourier tahliliga asoslangan spektral tahlil usullari, radio chastota spektrini xalqaro va milliy darajada taqsimlash tartiblari, shuningdek O‘zbekistondagi chastota resurslari batafsil ko‘rib chiqiladi. Maqola 5 ta asosiy jadval va ko‘plab ilmiy formulalar asosida tuzilgan bo‘lib, muhandislik talabalari va mutaxassislar uchun mo‘ljallangan.

Kalit so‘zlar: chastota spektri, elektromagnit to‘lqin, Fourier tahlili, Fourier almashtirishi, FFT algoritmi, radio chastota, spektral tahlil, ITU, VHF, UHF, 5G texnologiyasi, Wi-Fi, GSM, OFDM, kognitiv radio, terahertz diapazoni, raqamli aloqa, spektr analizatori, radioaloqa, elektromagnit spektr.

Kirish

Havo, suv, yer — bular ko‘rinadigan tabiiy resurslar. Ammo radio chastota spektri — ko‘rinmas, lekin bugungi texnologik sivilizatsiyaning eng qimmatli resursi. Har safar smartfoningiz qo‘ng‘iroq qilganida, Wi-Fi orqali internet kirganingizda, GPS navigatsiyangiz ishlayotganida — siz bu ko‘rinmas resursdan foydalanayapsiz.

Chastota spektri — bu elektromagnit to‘lqinlarning chastota bo‘yicha tartiblangan diapazonidir. U noldan (statik magnit maydoni) tortib gamma nurlanishigacha (10^{24} Hz) cho‘ziladi. Har bir diapazon o‘z fizik xususiyatlariga ega bo‘lib, turli maqsadlarda qo‘llaniladi.

> *“Radio spektri — bu xalqning umumiy mulki. Uni samarali taqsimlash va himoya qilish — davlatning vazifasi.”*
>
> ***— ITU Radio Regulations, 2020***

2023-yilda global uyali aloqa spektri auktsionlarida jami 50 milliard dollardan ortiq mablag‘ to‘langan. AQSHda 2021-yilda o‘tkazilgan C-band (3.7–3.98 GHz)

auktsionida Verizon, AT&T va T-Mobile kompaniyalari 81 milliard dollar sarfladi — bu tarixdagi eng qimmat spektr savdosi. Bu raqamlar spektrning qanchalik qimmatli resurs ekanligini ko‘rsatadi.

Chastota spektrining fizik asoslari

Elektromagnit to‘lqin — spektrning moddiy asosi. Chastota spektrini tushunish uchun elektromagnit to‘lqin tabiatini bilish zarur. Elektromagnit to‘lqin — bu bir-biriga perpendikulyar elektr va magnit maydonlarining fazo bo‘ylab tarqaluvchi tebranishidir. Makswell 1865-yilda bu to‘lqinlar mavjudligini nazariy isbotladi, Hertz esa 1887-yilda tajribada ko‘rsatdi.

Barcha elektromagnit to‘lqinlar vakuumda bir xil tezlikda — yorug‘lik tezligida — harakat qiladi. Ammo ularning chastotasi va to‘lqin uzunligi farq qiladi. Aynan chastota farqi ularning xususiyatlarini belgilaydi: past chastotali to‘lqinlar yerdan o‘tib ketadi, yuqori chastotali esa to‘g‘ri chiziqda tarqaladi.

CHASTOTA VA TO‘LQIN UZUNLIGI MUNOSABATI

$$c = f \times \lambda$$

Bu yerda: c = 299 792 458 m/s (yorug‘lik tezligi vakuumda), f = chastota (Hz), λ = to‘lqin uzunligi (metr). Misol: FM radio 100 MHz: $\lambda = 3\times10^8 / 10^8 = 3$ metr. GSM 900 MHz: $\lambda = 3\times10^8 / 9\times10^8 = 0.33$ metr = 33 sm. Wi-Fi 2.4 GHz: λ = 0.125 m = 12.5 sm. 5G 28 GHz: λ = 10.7 mm — shu sababdan "millimetr to‘lqin" deyiladi.

Energiya va chastota: Plank munosabati

Elektromagnit to‘lqin kvantlari — fotonlar — energiyasi chastotaga to‘g‘ri proportsional. Bu Plank tomonidan 1900-yilda kashf etilgan va zamonaviy kvant fizikasining asosini tashkil qiladi.

PLANK FORMULASI

$$E = h \times f$$

Bu yerda: E = foton energiyasi (Joule), $h = 6.626\times10^{-34}$ J·s (Plank doimiysi), f = chastota (Hz). Shu sababdan: gamma nurlar (10^{20} Hz) — juda energetik va xavfli. Rentgen nurlari — tibbiyotda. Ko‘rinadigan yorug‘lik (10^{14}–10^{15} Hz) — ko‘z sezadi. Radio to‘lqinlari (10^3–10^{12} Hz) — eng past energiya, xavfsiz.

Chastota diapazoni va o‘tkazuvchanlik polosasi

Har bir radio xizmat ma'lum chastota oralig‘ida ishlaydi. Bu oraliq — o‘tkazuvchanlik polosasi (bandwidth) deyiladi. Shannon teoremasi bo‘yicha polosa kengligi bevosita ma'lumot uzatish tezligini belgilaydi. Shu sababdan kompaniyalar keng polosa uchun milliardlar to‘lashga tayyor.

Tor polosa (< 200 kHz): Ovozli aloqa, AM/FM radio. Arzon, lekin kichik sig‘im.

O‘rta polosa (1–100 MHz): Raqamli TV, 3G/4G aloqa. Balansli yechim.

Keng polosa (> 100 MHz): 5G mmWave, Wi-Fi 6E, gigabit aloqa. Qimmat, lekin yuqori sig‘im.

Fourier tahlili: Spektrni ochish kaliti

Fourier ning ulkan kashfiyoti. 1822-yilda fransuz matematik-fizigi Jean-Baptiste Joseph Fourier o‘zining mashhur asarini — "Issiqlikning analitik nazariyasi" ni — nashr etdi. U unda ajoyib bir haqiqatni isbotladi: istalgan davriy signal, qanchalik murakkab bo‘lmasin, turli chastotali sinusoidal komponentlar yig‘indisi sifatida ifodalanishi mumkin.

Bu kashfiyot nafaqat issiqlik o‘tkazuvchanligi uchun, balki butun fizika va muhandislik uchun inqilob bo‘ldi. Fourier tahlili bugun tibbiyot (EKG, MRI), musiqa (MP3 siqish), telekommunikatsiya (OFDM), seysmologiya va kosmologiyada keng qo‘llaniladi.

“Fourier o‘z davrida tushunilmadi. Lagrange va Laplace uning ishini rad etdi. Ammo vaqt Fourierni oqladi — uning formulalari bugun barcha raqamli texnologiyaning asosida yotadi.”

— Tarix sahifalaridan

FOURIER ALMASHTIRISHI

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t}\, dt$$

Bu yerda: $F(\omega)$ — signalning chastota tasviriyasi (spektr), $f(t)$ — vaqt sohasidagi signal, $\omega = 2\pi f$ — burchak chastotasi (rad/s), $j = \sqrt{-1}$ — mavhum birlik.

Teskari Fourier: f(t) = (1/2π) ∫₋∞^∞ F(ω)·e^(jωt) dω. Mazmun: har qanday signal vaqt sohasida ham, chastota sohasida ham bir xil ma'lumotni tashiydi — faqat turli ko‘rinishda.

FFT — Kompyuter davrining Fourier qudroti

Raqamli kompyuterlar paydo bo‘lgach, Fourier almashtirishni hisoblash zaruriyati yuzaga keldi. 1965-yilda James Cooley va John Tukey FFT (Fast Fourier Transform — Tez Fourier Almashtirish) algoritmini kashf etdi. Bu algoritm N ta namuna uchun hisoblash hajmini N^2 dan $N \cdot \log_2(N)$ ga tushirdi.

Amaliy misol: 1024 ta namuna uchun oddiy DFT — 1 048 576 ta operatsiya. FFT — faqat 10 240 ta operatsiya. Bu 102 marta tez! Bugun smartfonlar soniyada millionlab FFT operatsiyasini bajaradi — ovoz tanib olish, musiqa oqimi, 4G/5G signal qayta ishlash uchun.

FFT NING AMALIY QUVVATI

Shazam musiqani aniqlash ilovasi FFT yordamida quloq ostida eshitilayotgan musiqaning spektral "barmoq izi" ni chiqaradi. Bu iz millisaniyalar ichida 10 milliondan ortiq qo‘shiq bazasiga nisbatan tekshiriladi. Bir butun qo‘shiqni aniqlash uchun atigi 5-10 soniyalik namuna yetarli — barchasi FFT tufayli mumkin.

Fourier almashtirishlari tasnifi

Fourier tahlilining bir necha varianti mavjud bo‘lib, har biri o‘z vazifasi uchun mo‘ljallangan:

Almashtirish turi	Signal turi	Natija	Qo‘llanilishi
Fourier qatori (FS)	Davriy signal	Diskret chiziqlar spektri	Musiqa, sinusoidal signal
Fourier integrali (FT)	Nodavriy signal	Uzluksiz spektr	Impuls, yagona to‘lqin
Diskret Fourier (DFT)	Diskret vaqt	Diskret chastota	Raqamli signallar
Tez Fourier (FFT)	Diskret, samarali	DFT bilan bir xil	Kompyuter, DSP, spektranaliz
Laplace almashtirish	Umumiy (s-soha)	Murakkab chastota	Boshqaruv tizimlari

Z-almashtirish	Diskret, umumiy	z-soha	Raqamli filtrlar, DSP
Wavelet almashtirish	Vaqt-chastota	O‘zgaruvchan ajratma	Tibbiy signal, siqish
Hilbert almashtirish	Davriy signal	90° faza siljishi	AM demodulatsiya, analitik signal

Elektromagnit spektrning to‘liq tasnifi

Quyidagi jadval elektromagnit spektrning barcha radio diapazonlarini — ELF dan THF gacha — to‘liq ko‘rsatadi. Bu ITU (Xalqaro Telekommunikatsiya Ittifoqi) tomonidan qabul qilingan rasmiy tasnifdir:

Band	Chastota	To‘lqin uzunligi	Qo‘llanilishi	Tarqalish usuli	Misol
ELF	3–30 Hz	100–10 Mm	Dengiz osti aloqa	Yer qabig‘i orqali	Dengiz osti kemalar
SLF	30–300 Hz	10–1 Mm	Dengiz osti aloqa	Yer va dengiz	Harbiy suv osti kemalar
ULF	0.3–3 kHz	1000–100 km	Yer yuzasi aloqasi	Atmosfera to‘lqinlari	Qutb tadqiqotlari
VLF	3–30 kHz	100–10 km	Navigatsiya, vaqt signali	Dengiz to‘lqinlari	OMEGA, MSF, DCF77
LF	30–300 kHz	10–1 km	AM uzun to‘lqin radio	Yer to‘lqinlari	BBC Radio 4 (198 kHz)
MF	300 kHz–3 MHz	1000–100 m	AM radio, dengiz aloqa	Yer + ionosfera	AM radio (531–1602 kHz)
HF	3–30 MHz	100–10 m	Xalqaro radio, amateur	Ionosfera orqali	Shortwave, ham radio
VHF	30–300 MHz	10–1 m	FM radio, TV, havo aloqa	Ko‘z chizig‘i	FM (87.5–108 MHz), VHF TV
UHF	300 MHz–3 GHz	100–10 sm	UHF TV, GSM, Wi-Fi, GPS	Ko‘z chizig‘i	GSM 900/1800, Wi-Fi 2.4GHz
SHF	3–30 GHz	10–1 sm	5G, Wi-Fi 5/6, radar	Ko‘z chizig‘i	Wi-Fi 5GHz, 5G mmWave
EHF	30–300 GHz	10–1 mm	Millimetr to‘lqin, 5G	Ko‘z chizig‘i	5G 28/60 GHz, radar
THF	300 GHz–3 THz	1 mm–0.1 mm	Terahertz, tibbiyot, 6G	Juda qisqa	Kelajak 6G texnologiyasi

Past chastotali diapazonlar: Yer ostidan kosmosga

ELF (3-30 Hz) diapazonini faqat dengiz osti kemalari bilan aloqa uchun ishlatiladi. Bu to‘lqinlar yer qatig‘i va dengiz suvidan o‘ta oladi — boshqa hech qanday signal buni uddalay olmaydi. AQSh harbiy dengiz kuchlari ELF tizimidan foydalangan ("Project ELF", Wisconsin shtati). Antennasi uzunligi — 45 km!

VLF (3-30 kHz) diapazonida GPS dan oldin ishlatilgan OMEGA navigatsiya tizimi ishlagan. Bugun bu diapazon standart vaqt signallari (DCF77 — Germaniya, 77.5 kHz; MSF — Britaniya, 60 kHz) uchun ishlatiladi. Bu signallar Yevropa bo‘ylab soatlarni avtomatik sozlaydi.

O‘rta chastotalar: Radio eshittirish dunyosi

MF va HF diapazonlari an'anaviy radio eshittirishning vatani. AM radio (535-1705 kHz) ionosferadan aks etib, 1000 km dan ortiq masofaga yetib borishi mumkin. Shu sababdan tungi paytda uzoq mamlakatlardagi AM stansiyalarni ham eshitish mumkin — kunda ionosfera ko‘proq ultrabinafsha nurlanishni yutib, kechasi esa ko‘proq qaytaradi.

IONOSFERA: TABIIY RADIO KO‘ZGUSI

Yer atmosferasining 60-1000 km balandligida joylashgan ionosfera qatlami — bu elektrlangan gazlar qalamdan iborat. Quyosh ultrabinafsha nurlari atomlarni ionlashtirib, elektr o‘tkazuvchan qatlam hosil qiladi. HF (3-30 MHz) to‘lqinlari bu qatlamdan aks etib, Yer yuziga qaytadi — shunday qilib dunyo bo‘ylab radio aloqa ta'minlanadi. Tungi payt D qatlami yo‘qoladi, F qatlami esa kuchayadi — uzoq masofali HF aloqa yaxshilanadi.

VHF va UHF: Zamonaviy aloqaning yuragi

VHF (30-300 MHz) va UHF (300 MHz-3 GHz) diapazonlari bugungi texnologiyalar uchun eng muhim. FM radio, raqamli TV, barcha avlod uyali aloqa (2G/3G/4G), Wi-Fi, Bluetooth, GPS — barchasi shu diapazonlarda ishlaydi.

UHF ning muhim xususiyati — binolardan nisbatan yaxshi o‘tishi. 900 MHz signal 1800 MHz ga qaraganda devorlardan 2 barobar yaxshi o‘tadi. Shu sababdan

uyali aloqa operatorlari qishloq hududlarini qoplash uchun 900 MHz, shaharlarda esa 1800/2100 MHz ni qo‘llaydi.

Spektrni xalqaro taqsimlash: ITU tizimi

ITU — Radio spektrning xalqaro boshqaruvchisi. Xalqaro Telekommunikatsiya Ittifoqi (ITU) 1865-yilda tashkil etilgan — dunyo tarixi bandagi eng qadimgi xalqaro tashkilotlardan biri. ITU ning Radiokommunikatsiya sektori (ITU-R) radio chastota spektrini xalqaro miqyosda taqsimlash va tartibga solish bilan shug‘ullanadi.

ITU Radio Qoidalari (Radio Regulations) — bu 1200 sahifali xalqaro shartnoma bo‘lib, barcha davlatlar uni imzolagan. Unda har bir chastota diapazonining qanday maqsadlarda ishlatilishi belgilangan. Agar bir davlat bu qoidalarni buzsa, qo‘shnilarining signali halaqit berishi mumkin.

ITU HUDUDLARI: DUNYONI 3 ZONAGA BO‘LISH

ITU dunyoni 3 radio hududga bo‘lgan. 1-hudud: Yevropa, Afrika, G‘arbiy Osiyo (O‘zbekiston ham shu yerda). 2-hudud: Amerika. 3-hudud: Osiyo-Tinch okeani, Avstraliya. Bir xil chastota turli hududlarda turli maqsadlarda ishlatilishi mumkin. Masalan, 700 MHz — 1-hududda 4G uchun, 2-hududda ham 4G, 3-hududda esa qisman TV uchun ishlatilgan.

Asosiy chastota diapazonlari va ularning taqsimlanishi

Quyidagi jadval eng muhim xizmat turlari uchun xalqaro miqyosda taqsimlangan chastota diapazonlarini ko‘rsatadi:

Xizmat turi	Chastota diapazoni	Taqsimlash darajasi	Izoh
Havo aloqasi	108–136 MHz (VHF)	Xalqaro	Samolyot-dispetcher aloqasi, ILS
AM radio	535–1705 kHz (MF)	Milliy/mintaqaviy	Ommaviy eshittirish, 10 kHz qadam
FM radio	87.5–108 MHz (VHF)	Mintaqaviy	Stereo eshittirish, 200 kHz kanal
GSM 900	890–960 MHz (UHF)	Xalqaro	2G mobil aloqa, 200 kHz kanal

GSM 1800	1710–1880 MHz	Xalqaro	DCS 1800, zichroq hududlar
GPS L1	1575.42 MHz	Xalqaro	GPS navigatsiya, faqat qabul qilish
Wi-Fi 2.4 GHz	2400–2483 MHz	Litsenziyasiz (ISM)	IEEE 802.11b/g/n, 13 kanal
Wi-Fi 5 GHz	5150–5850 MHz	Litsenziyasiz (UNII)	IEEE 802.11a/n/ac/ax, 25 kanal
5G mmWave	24.25–52.6 GHz	Milliy litsenziya	5G NR FR2, yuqori sig‘im
Bluetooth	2402–2480 MHz	Litsenziyasiz (ISM)	IEEE 802.15.1, 79 kanal
LTE Band 1	1920–2170 MHz	Xalqaro (FDD)	4G LTE, 60 MHz juft polosa
Radar (havo)	9–10 GHz (X-band)	Milliy/xalqaro	Havo harakati nazorati

Spektr tanqisligi va zamonaviy muammolar

Radio spektr — cheklangan resurs. Barcha potentsial foydalanuvchilar uchun yetarlicha chastota yo‘q. Buning ustiga, raqamli aloqa talabi har yili oshib bormoqda: Ericsson hisobotiga ko‘ra, 2023-2029 yillar oralig‘ida global mobil trafik 4 marta o‘sadi.

Muammoni hal qilish uchun bir necha yondashuv qo‘llanilmoqda: dinamik spektrdan foydalanish (cognitive radio), spektr almashish (spectrum sharing), millimetr to‘lqin diapazonlarini o‘zlashtirish (5G mmWave), va chastota samaradorligini oshirish (MIMO, OFDM, beamforming).

O‘zbekistonda chastota spektri boshqaruvi

Milliy tartibga solish tizimi. O‘zbekistonda radio chastota spektrini boshqarish O‘zbekiston Respublikasi Raqamli texnologiyalar vazirligi va uning tarkibidagi Radiochastotalar inspeksiyasi tomonidan amalga oshiriladi.

Asosiy hujjat — O‘zbekiston Respublikasining "Elektr aloqa to‘g‘risida" gi Qonuni va Radiochastotalar jadvaliga oid normativ hujjatlar.

O‘zbekiston ITU-R ning 1-radio hududiga kiradi va xalqaro Radio Qoidalariga rioya qiladi. Milliy chastota jadvali ITU jadvaliga asoslangan holda tuzilgan, ammo milliy xususiyatlar va qo‘shni davlatlar bilan kelishuvlar hisobga olingan.

O‘zbekistondagi asosiy chastota taqsimlanishi

Quyidagi jadval O‘zbekistondagi asosiy operatorlar va xizmatlar uchun taqsimlangan chastota diapazonlarini ko‘rsatadi:

Operator/Xizmat	Chastota diapazoni	Texnologiya	Izoh
UzTelecom	850/1800/2100 MHz	2G/3G/4G	Milliy operator, keng qamrov
Ucell (Veon)	900/1800/2100 MHz	2G/3G/4G	Eng katta abonent bazasi
Beeline Uzbekistan	900/1800/2100 MHz	2G/3G/4G	Korporativ xizmatlar
Mobiuz (Humans)	1800/2100/2600 MHz	4G LTE	Shahar hududlari
5G sinov	3400–3600 MHz (C-band)	5G NR (sinov)	Toshkent, 2023-2024 sinovlar
FM radio	87.5–108 MHz	FM eshittirish	Milliy va mintaqaviy stansiyalar
Raqamli TV (DVB-T2)	470–790 MHz (UHF)	Raqamli yer efiri	Butun mamlakat, bepul
Wi-Fi (ISM)	2.4 GHz va 5 GHz	Litsenziyasiz	Uy, ofis, jamoat joylari

5G va kelajak rejalari

O‘zbekiston 5G texnologiyasini joriy etish bo‘yicha faol ish olib bormoqda. 2023-2024 yillarda Toshkentda bir qator 5G sinov zonalari ishga tushirildi. Xalqaro tajribaga ko‘ra, 5G uchun eng maqbul diapazonlar: sub-6 GHz (3.4-3.8 GHz — keng qamrov va o‘rta sig‘im) hamda mmWave (26/28 GHz — kichik maydon, yuqori sig‘im).

RAQAMLI O‘ZBEKISTON 2030 VA SPEKTR

"Raqamli O‘zbekiston — 2030" strategiyasi doirasida uyali aloqa tarmoqlarini modernizatsiya qilish, 5G tarmoqlarini joriy etish va internet qamrovini kengaytirish rejalashtirilgan. Bu maqsadlarga erishish uchun yangi chastota diapazonlarini taqsimlash, eskirgan analog xizmatlarni raqamli texnologiyalarga o‘tkazish va spektr samaradorligini oshirish zarur. DVB-T2 raqamli TV ga o‘tish allaqachon UHF diapazonida 200 MHz dan ortiq spektrni bo‘shatdi — bu "raqamli dividend" endi 4G/5G uchun ishlatilmoqda.

Spektral tahlil texnologiyalari

Spektr analizatori — muhandisning ko‘zi. Spektr analizatori — chastota sohasida signal quvvatini o‘lchaydigan asbob. U vaqt sohasidagi osiloskopning chastota sohasidagi muqobili. Zamonaviy spektr analizatorlari real vaqtda 0 dan 26.5 GHz gacha bo‘lgan diapazonni ko‘rsata oladi.

Bugun smartfonlar ham oddiy spektr analizatori vazifasini bajara oladi — Wi-Fi Analyzer kabi ilovalar 2.4 va 5 GHz diapazonidagi kanallarni ko‘rsatib, halaqitni aniqlashga yordam beradi. Uy Wi-Fi ni sozlashda bunday ilova juda foydali.

Kognitiv radio: aqlli spektrdan foydalanish

Kognitiv radio (Cognitive Radio) — bu spektrni dinamik ravishda ishlatadigan aqlli radio tizimi. An'anaviy radio faqat o‘ziga taqsimlangan chastotada ishlaydi — boshqalari bo‘sh bo‘lsa ham. Kognitiv radio esa bo‘sh chastotalarni topib, ulardan foydalanadi.

Tadqiqotlar ko‘rsatishicha, hatto eng band hududlarda ham spektrning 70-90% i istalgan vaqtda bo‘sh turadi. Kognitiv radio bu "spektr bo‘shlig‘i" (spectrum hole) larni topib, ikkilamchi foydalanuvchilarga imkoniyat beradi. IEEE 802.22 standarti buning uchun maxsus ishlab chiqilgan.

OFDM: Spektrdan samarali foydalanish

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) zamonaviy raqamli aloqaning asosiy texnologiyasidir. U mavjud spektrni son-sanoqsiz tor subchastotalarga bo‘lib, har birida parallel ma'lumot uzatadi. Subchastotalar bir-biriga ortogonal bo‘lgani uchun bir-biriga halaqit bermaydi.

4G LTE misolida: 20 MHz polosa 100 ta resurs blokiga bo‘linadi (har biri 180 kHz). Har blokda 12 subchastota (15 kHz qadam). Jami 1200 ta subchastota parallel ishlaydi. Har bir subchastota mustaqil modulyatsiyalanadi (QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM).

Kelajak: 6G va terahertz inqilobi. 5G hali to‘liq joriy etilmagan, ammo tadqiqotchilar allaqachon 6G ustida ishlashmoqda. 6G 2030-yillar boshida tijorat miqyosida paydo bo‘lishi kutilmoqda. Uning asosiy xususiyatlari:

Terahertz diapazoni (0.1–10 THz): Bu diapazon hozir deyarli foydalanilmagan. Juda keng polosa — nazariy jihatdan terabit/sekund tezlik mumkin. Ammo to‘lqinlar juda qisqa masofaga tarqaladi va havo namligi tomonidan yutiladi. Kichik hujayralar (pico/femtocell) yoki indor (ichki) qo‘llanilishi ko‘proq kutiladi.

Rekonfiguratsiya qilinadigan aqlli yuzalar (RIS): Binolar devorlari va ko‘chalardagi yuzalar signal yo‘nalishini boshqaradigan "aqlli ko‘zgular" ga aylanadi. Bu multipath muammosini qaytarma foydasiga aylantiradi.

Kvant aloqa tarmoqlari: Kvant mexanikasi asosida ishlaydigan aloqa kanallari, kvant kriptografiya bilan birgalikda mutlaqo xavfsiz aloqani ta'minlaydi.

TERAHERTZ VA TIBBIYOT

Terahertz to‘lqinlar tibbiyotda allaqachon qo‘llanilmoqda. Ular rentgen nurlariga o‘xshab to‘qimalardan o‘ta oladi, lekin ionlovchi radiatsiyaga ega emas — shu sababdan xavfsizroq. Terahertz skaner teri ostidagi o‘smalar va tish kariyelarini dastlabki bosqichda aniqlay oladi. Kelajakda terahertz "kamera" oddiy kamera o‘rnida tibbiy diagnostika uchun ishlatilishi mumkin.

Xulosa

Chastota spektri — ko‘rinmas, lekin zamonaviy sivilizatsiyaning asosini tashkil etuvchi resurs. Fourier ning 1822-yildagi kashfiyoti bu resursni matematik tarzda tasvirlash imkonini berdi. ITU ning 1865-yildan buyon amalga oshirib kelayotgan xalqaro koordinatsiyasi esa uni tartibli taqsimlashni ta'minladi.

Bugun spektrning har bir megahertz — milliardlab dollarlik qiymatga ega. Texnologiya rivojlangan sari talab oshib boradi: 5G mmWave, IoT qurilmalari, yuqori aniqlikdagi GPS, avtomatik avtomobillar — barchasi yangi chastota resurslarini talab qiladi. Kognitiv radio, MIMO va spektrni almashish texnologiyalari bu muammoga yangi yondashuvlar taklif etmoqda.

O‘zbekiston uchun esa bu mavzu ayniqsa dolzarb: "Raqamli O‘zbekiston 2030" maqsadlariga erishish uchun spektr resurslarini samarali boshqarish, 5G uchun zarur diapazonlarni belgilash va milliy operatorlarni raqobatbardosh qilish — bu davlat strategiyasining muhim qismi bo‘lmog‘i shart.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. ITU Radio Regulations (2020). International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland.

2. Fourier, J.B.J. (1822). Théorie analytique de la chaleur. Firmin Didot Père et Fils, Paris.

3. Haykin, S. (2001). Communication Systems, 4th ed. John Wiley & Sons.

4. Cooley, J.W. & Tukey, J.W. (1965). An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. Mathematics of Computation, 19(90), 297–301.

5. Proakis, J.G. & Manolakis, D.G. (2007). Digital Signal Processing, 4th ed. Prentice Hall.

6. Rappaport, T.S. (2014). Wireless Communications: Principles and Practice, 2nd ed. Prentice Hall.

7. Ericsson Mobility Report (2023). Ericsson AB, Stockholm, Sweden.

8. Mitola, J. & Maguire, G.Q. (1999). Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal. IEEE Personal Communications, 6(4), 13–18.

9. 3GPP TS 38.101 (2023). NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 17).

10. O‘zbekiston Respublikasining "Elektr aloqa to‘g‘risida" gi Qonuni. O‘zbekiston Respublikasi Qonun hujjatlari milliy ma'lumotlar bazasi, 2008-yil.