TELEKOMMUNIKATSIYA KANALLARIDA SHOVQIN VA BUZILISHLAR

Botirov Farrux
Farg‘ona Davlat Texnika Universiteti
ATT fakulteti 732-23 guruh talabasi

Yo‘ldoshov Xojimuro
Farg‘ona Davlat Texnika Universiteti
ATT fakulteti 732-23 guruh talabasi

Annotatsiya. Ushbu maqolada telekommunikatsiya kanallarida yuzaga keladigan shovqin va buzilishlarning fizik tabiati, matematik modellari, tasnifi va amaliy ta'siri keng ko‘rib chiqiladi. Issiqlik shovqini, impuls buzilishlari, crosstalk, signalning so‘nishi kabi hodisalar Shannon-Hartley teoremasi va zamonaviy signallar nazariyasi asosida tahlil qilinadi. Himoya va tuzatish usullari — xato tuzatish kodlari, filtrlar, optik tolali texnologiyalar — ham batafsil yoritiladi.

Kalit so‘zlar: telekommunikatsiya kanallari, shovqin, buzilishlar, termal shovqin, oq shovqin, impuls shovqini, crosstalk, attenuatsiya, dispersiya, multipath, Shannon-Hartley teoremasi.

Kirish

Ideal aloqa kanali — bu yo‘q narsa. Real dunyoda istalgan signal manba va qabul qiluvchi orasidagi yo‘lda buzilishlarga uchraydi. Elektron qurilma ichidagi elektronlar tasodifiy harakatlanadi, havo ochiq simlarni antenna sifatida ishlatib halaqit beradi, yaqin joylashgan simlar bir-biriga ta'sir qiladi. Barcha bu hodisalar bitta umumiy nom bilan ataladi — shovqin.

Shovqin va buzilishlar muammosi telekommunikatsiya muhandisligining eng qadimiy va hali ham eng dolzarb mavzularidan biridir. Birinchi telegraf liniyalari (1844) dan tortib zamonaviy 5G tarmoqlari va kosmik aloqagacha — shovqin bilan kurash har doim markaziy muammo bo‘lib kelgan. Aynan Claude Shannonning 1948-yildagi inqilobiy ishi — Axborot Nazariyasi — bu muammoga matematik yechim topishga imkon berdi. U kanal sig‘imi, shovqin va xato ehtimoli o‘rtasidagi

fundamental munosabatni aniqladi. Bu kashfiyot zamonaviy raqamli aloqaning poydevori bo‘lib qoldi.

Shovqinning fizik tabiati va matematikasi

Issiqlik (termal) shovqini — eng asosiy shovqin. Har qanday elektr o‘tkazgichda — rezistorda, simda, tranzistorda — elektronlar issiqlik harakati tufayli tasodifiy tebranadi. Bu tebranish qo‘shimcha kichik kuchlanish hosil qiladi — bu issiqlik yoki termal shovqin deb ataladi. Mutlaq nol temperaturada (-273.15°C) bu shovqin yo‘q bo‘lar edi, lekin real sharoitda u muqarrar.

John B. Johnson 1928-yilda bu hodisani eksperimental aniqladi, Harry Nyquist esa unga matematik asos berdi. Shuning uchun u Johnson-Nyquist shovqini ham deyiladi. Termal shovqin quvvati quyidagi formula bilan hisoblanadi:

NYQUIST FORMULASI. *$P = k \times T \times B$ Bu yerda: P — shovqin quvvati (Vatt), k — Boltzmann doimiysi (1.38×10^{-23} J/K), T — mutlaq temperatura (Kelvin), B — o‘tkazuvchanlik polosa kengligi (Hz). Misol: Xona temperaturasida (T = 290 K) 1 MHz polosali kanalda termal shovqin: $P = 1.38 \times 10^{-23} \times 290 \times 10^{6} = 4 \times 10^{-15}$ Vatt = 4 femtoVatt. Kichik, lekin muhim!*

Oq shovqin (White Noise)

Issiqlik shovqini — oq shovqinning amaliy misoli. Oq shovqin deb barcha chastotalarda bir xil quvvat zichligi bo‘lgan shovqinga aytiladi — xuddi oq rangda barcha spektr ranglari teng bo‘lganidek. Matematik jihatdan, oq shovqin normal (Gauss) taqsimotga ega bo‘lgan tasodifiy jarayon sifatida modellanadi.

Telekommunikatsiyada AWGN (Additive White Gaussian Noise) modeli keng ishlatiladi. Bu model amaliy hisob-kitoblarda juda qulay, chunki u real shovqinni yaxshi taxmin qiladi. Raqamli aloqa tizimlarining ishi odatda AWGN kanali uchun baholanadi.

Impuls shovqini — eng xavfli buzilish

Tabiatning o‘zi ham shovqin manbasidir. Chaqmoq urishi bir millisekund ichida 100 million voltgacha kuchlanish hosil qiladi. Bu elektromagnit zarbasi yuzlab kilometr radiusidagi radio va telefon liniyalariga ta'sir qiladi. Bunday qisqa, lekin juda kuchli shovqin impuls shovqini deb ataladi.

Sun'iy manbalarga esa elektr motorlari, rele kontaktlari, avtomobil o‘tish tizimlari va hatto lyuminestsent chiroqlar kiradi.

Sanoat korxonalari yaqinidagi aloqa liniyalari uchun impuls shovqini eng katta muammo hisoblanadi.

QIZIQARLI FAKT: CHAQMOQ VA INTERNET. *2003-yilda AQSHda kuchli momaqaldiroq paytida bir viloyatdagi 14 000 DSL internet abonenti bir vaqtda aloqadan uzildi. Sabab — chaqmoq urishidan hosil bo‘lgan elektromagnit zarbasi mis telefon simlariga ta'sir qildi. Zamonaviy optik tolali kabellar bu muammoni butunlay hal qildi — yorug‘lik impulslari elektromagnit halaqitga sezgir emas.*

Telekommunikatsiya kanallarida buzilish turlari

Signal manbaidan uzoqlashgan sari kuchlanishi kamayadi — bu so‘nish yoki attenuatsiya hodisasidir. So‘nish uzatish muhitiga qarab farq qiladi. Mis simda signal 100 metrga o‘tganda ma'lum miqdorda so‘nadi, radio signali esa masofa kvadratiga proportsional ravishda zaiflaydi (teskari kvadrat qonuni).

So‘nish decibel (dB) birligida o‘lchanadi. 3 dB so‘nish — signal quvvati 2 marta kamayishi, 10 dB — 10 marta, 20 dB — 100 marta kamayishini bildiradi. Masalan, standart UTP Cat5e kabeli 100 MHz chastotada 100 metrda 22 dB so‘nish beradi.

Dispersiya — signalning cho‘zilishi

Optik tolali kabellarda va ba'zi mis kabellarda turli chastotali signal komponentlari turli tezlikda harakat qiladi. Natijada signalning old qirrasi cho‘zilib, qo‘shni bit intervallariga o‘tib ketishi mumkin — bu hodisa dispersiya deb ataladi.

Dispersiyaning ikkita asosiy turi mavjud: modal dispersiya (ko‘p modali optik tolalarda) va xromatik dispersiya (monokromatik bo‘lmagan manba bilan). Zamonaviy yagona modali (single-mode) optik tolalar modal dispersiyani butunlay bartaraf etadi.

Crosstalk — o‘zaro shovqin

Parallel joylashgan simlar orasida elektromagnit induksiya tufayli signal "sakrash" hodisasi yuzaga keladi — buni crosstalk deyiladi. Telefon kabeli to‘plamida bir juft simning signali qo‘shni juftnikira ta'sir qilishi — klassik crosstalk misoli.

NEXT (Near-End Crosstalk): Signalning manba tomonida qo‘shni simga o‘tishi. Bu yerda asosiy signal kuchli, shuning uchun NEXT ayniqsa zararli.

FEXT (Far-End Crosstalk): Signalning qabul qiluvchi tomonida qo‘shni simga o‘tishi. Signal so‘ngan bo‘ladi, lekin shovqin ham so‘nadi — ta'siri NEXT dan kam.

Multipath — ko‘p yo‘l effekti

Radio va Wi-Fi signallari ko‘p yo‘l orqali yetib keladi — to‘g‘ridan-to‘g‘ri, devorlardan aks etib, yerdan qaytib. Bu turli vaqtda yetib keladigan signal nusxalarining bir-biriga qo‘shilishiga olib keladi. Ba'zan ular bir-birini kuchaytiradi (konstruktiv), ba'zan esa yo‘q qiladi (destruktiv) — bu "fading" hodisasi.

SHAHAR MUHITIDA MULTIPATH MUAMMO. *Shahardagi baland binolar radio signalining yulab-ko‘p yo‘l yaratadi. Mobil telefon ular orasida harakatlanayotganda signal kuchi doimiy o‘zgarib turadi — bu Rayleigh fading deyiladi. 4G/LTE tarmoqlari OFDM texnologiyasini ishlatib bu muammoni hal qiladi: signal ko‘p subchastotaga bo‘linadi, har biri alohida kanaldan o‘tadi.*

Shovqin turlari: to‘liq tasnif

Quyidagi jadval telekommunikatsiyada uchraydigan barcha asosiy shovqin turlarini, ularning kelib chiqish sabablari va asosiy manbalarini ko‘rsatadi:

Shovqin turi	Kelib chiqish sababi	Spektral xususiyat	Asosiy manba
Issiqlik (termal) shovqin	Elektron harakati (Nyquist)	Barcha chastotalar	Kuchaytirgich, rezistor
Shot shovqin	Diskret zaryadlar (Schottky)	Keng spektr	Detektor, tranzistor
Impuls (zarbali) shovqin	Tashqi elektromagnit	Qisqa, kuchli zarbalar	Chaqmoq, motor, rele
Crosstalk (o‘zaro ta'sir)	Elektromagnit juftlashuv	Qo‘shni kanal chastotasi	Parallel simlar
Intermodulation shovqin	Nochiziqli element	Aralash chastotalar	Kuchaytirgich to‘yinishi
Fazoviy (kosmik) shovqin	Quyosh va galaktika	Radio chastotalar	Antenna, radio aloqa
Kvantlash shovqini	ADC yaxlitlash xatosi	Raqamli tizimlar	Past bitli ADC
Flikker (1/f) shovqin	Yarim o‘tkazgich defekti	Past chastotalar	Tranzistor, diod

Shannon teoremasi — Shovqinning matematik chegarasi 1948-yilda Claude Shannon telekommunikatsiya uchun eng muhim formulani isbotladi. Shannon-Hartley teoremasi shovqinli kanalning maksimal ma'lumot uzatish tezligini aniqlab beradi:

SHANNON-HARTLEY TEOREMASI. *$C = B \times log_2(1 + S/N)$ Bu yerda: C — kanal sig‘imi (bit/sekund), B — o‘tkazuvchanlik polosa kengligi (Hz), S — signal quvvati (Vatt), N — shovqin quvvati (Vatt), S/N — signal-shovqin nisbati (SNR). Bu formula 3 ta muhim haqiqatni ko‘rsatadi: 1) Polosa kengligi oshsa, sig‘im chiziqli oshadi; 2) SNR oshsa, sig‘im logarifmik oshadi; 3) SNR nolga yaqinlashsa, sig‘im ham nolga yaqinlashadi.*

Amaliy misol: DSL internet

Oddiy telefon liniyasi (ADSL) uchun hisoblaylik. Polosa kengligi: B = 1.1 MHz. Tipik SNR: 40 dB (ya'ni S/N = 10 000). Shannon formulasi bo‘yicha: $C = 1\ 100\ 000 \times \log_2(1 + 10\ 000) \approx 1.1 \times 13.3 \approx 14.6$ Mbps.

Demak, bu liniyaning nazariy maksimal tezligi 14.6 Mbps. Amalda ADSL2+ 24 Mbps gacha yetadi — chunki yangi modulyatsiya texnikalari Shannonning chegarasiga yaqinroq ishlaydi. Bu formulaning buyukligi shundaki, u har qanday texnologiyaga mos — bu chegarani hech bir muhandis ilm-fan qonunlarini buzmagan holda oshira olmaydi.

SNR — Signal-Shovqin Nisbati

SNR (Signal-to-Noise Ratio) — aloqa tizimining sifatini ifodalovchi asosiy ko‘rsatkich. U signal quvvatining shovqin quvvatiga nisbati bo‘lib, odatda decibel (dB) birligida ifodalanadi:

$SNR\ (dB) = 10 \times \log_{10}(P_signal / P_noise)$

Turli telekommunikatsiya tizimlarida qabul qilinadigan minimal SNR qiymatlari farq qiladi. Quyidagi jadval turli tizimlar uchun SNR me'yorlarini ko‘rsatadi:

Tizim	Minimal SNR	Baho	Izoh
Telefon aloqasi (analog)	> 30 dB	Yaxshi	Oddiy suhbat uchun yetarli
AM radio	> 40 dB	Yaxshi	Eshittirish sifatli
FM radio (stereo)	> 50 dB	A'lo	Musiqa uchun ideal
CD audio sifati	> 96 dB	Mukammal	16-bit raqamli audio
Studio yozuvi	> 120 dB	Professional	24-bit audio standart
Wi-Fi (normal)	> 25 dB	Qoniqarli	Internet uchun yetarli
5G uyali aloqa	> 20 dB	Qoniqarli	Raqamli tuzatish yordam beradi
Kosmik aloqa	< 10 dB	Past	Kuchli tuzatish kodi kerak

Bit xato darajasi (ber) — Raqamli aloqa sifati

Raqamli aloqada sifat BER (Bit Error Rate — Bit Xato Darajasi) bilan o‘lchanadi. BER — uzatilgan bitlarning qancha qismi xato qabul qilinishi. BER = 10^{-3} — har 1000 bitdan biri xato, BER = 10^{-6} — har million bitdan biri xato, BER = 10^{-9} — har milliard bitdan biri xato.

Telefon aloqasi: BER < 10^{-3} — ovoz sifati yaxshi saqlanadi. Bu raqamli shovqin bartaraf kodi yordamida erishiladi.

Internet uzatishi: BER < 10^{-6} — Ethernet va TCP/IP uchun standart. CRC xato aniqlash kodi ishlatiladi.

Optik aloqa: BER < 10^{-12} — magistral liniyalar uchun. Optik kabel elektromagnit halaqitdan himoyalangan.

Kosmik aloqa (NASA): BER < 10^{-9} yoki undan past — turbo-kodlar yoki LDPC kodlari bilan ta'minlanadi.

VOYAGER 1 VA SHOVQIN BILAN KURASH. *NASA ning Voyager 1 kosmik zond 1977-yilda uchirilib, hozir Quyosh tizimidan tashqarida, 23 milliard km uzoqlikda. Uning signali Yerga yetib kelguncha 22 soat sarflanadi. Signal quvvati asl holatining trilliondan bir qismiga tushib ketadi. Ammo ilg‘or xato tuzatish kodlari tufayli Voyager dan hali ham ma'lumot qabul qilinmoqda. Bu — zamonaviy shovqinga qarshi texnologiyalarning ajoyib namunasi.*

Shovqin va buzilishlarga qarshi himoya usullari

Muhandislar shovqin bilan kurashda ikki strategiya qo‘llaydi: shovqinning kanalga kirishini oldini olish va kanalga kirgan shovqinni tuzatish. Quyidagi jadval barcha asosiy himoya usullarini jamlaydi:

Himoya usuli	Ishlash tamoyili	Qo‘llanilishi
Ekranlash (Shielding)	Elektromagnit halaqitlardan himoya	Koaksial kabel, ekranlangan simlar
Burama jufti (Twisted pair)	Crosstalk va EMI kamaytirish	Ethernet kabellari (Cat5e, Cat6)
Optik tolali kabel	To‘liq EMI immunitet	Magistral tarmoqlar, internet
Differensial signallash	Umumiy rejim shovqinini yo‘q qilish	RS-485, LVDS, USB 3.0
Xato tuzatish kodlari (ECC)	Raqamli xatolarni avtomatik tuzatish	RAM, SSD, kosmik aloqa

Tsiklik redundanslik (CRC)	Uzatishdagi xatolarni aniqlash	Ethernet, USB, ZIP fayl
Turbo-kodlar	Shannonning chegarasiga yaqin ishlash	4G/LTE, kosmik zondlar
LDPC kodlari	Yuqori samarali xato tuzatish	Wi-Fi 6, 5G NR, DVB-S2
Interleaving	Portlovchi xatolarni tarqatish	CD, DVD, mobil aloqa
Shovqin filtrlash	Keraksiz chastotalarni bloklash	Audio, radio, sensor tizimlar

Xato tuzatish kodlari — raqamli himoyaning mohiyati

Raqamli aloqada shovqin bilan kurashning eng samarali usuli — xato tuzatish kodlari (ECC — Error Correcting Codes). Bu texnologiya uzatiladigan ma'lumotga qo‘shimcha (redundant) bitlar qo‘shib, qabul qiluvchi tomonda xatolarni aniqlash va tuzatish imkonini beradi.

Hamming kodi (1950): Richard Hamming Bell Labs da ishlab chiqdi. 1 bitli xatoni tuzatadi, 2 bitli xatoni aniqlaydi. Kompyuter xotirasida hali ham ishlatiladi.

Reed-Solomon kodi (1960): Irving Reed va Gustave Solomon tomonidan yaratildi. CD, DVD, Blu-ray, kosmik aloqa standartiga aylandi. CD diskida 35% ma'lumot buzilgan bo‘lsa ham to‘liq tiklash mumkin.

Turbo-kodlar (1993): Claude Berrou kashf etdi. Shannonning nazariy chegarasiga 0.5 dB gacha yaqinlashdi. 3G va 4G mobil aloqada ishlatiladi.

LDPC kodlari (1963/1996): Robert Gallager tomonidan kashf etilgan, keyinchalik qayta kashf etildi. Wi-Fi 6, 5G NR, DVB-S2 standartlarida ishlatiladi. Hozirgi eng samarali kod.

Optik tolali kabel — shovqinsiz aloqa

Optik tolali kabel zamonaviy telekommunikatsiyaning eng muhim kashfiyotlaridan biri. 1970-yilda Corning kompaniyasi yetarlicha shaffof kremniy shisha tolasini yaratdi — bu optik aloqaning boshlanishi edi. Optik tolaning eng katta afzalligi — elektromagnit halaqitga mutlaq immunitet.

Yorug‘lik to‘lqini elektromagnit maydon emas (texnik jihatdan u elektromagnit to‘lqin bo‘lsa-da, radio chastotalardagidan millionlab marta yuqori chastotada ishlaydi). Shuning uchun chaqmoq, motor, radio stansiyalar va boshqa elektromagnit manbalar optik tolali kabelga hech qanday ta'sir ko‘rsata olmaydi.

OPTIK TOLALI KABEL REKORDLARI. *2020-yilda Yaponiya NICT instituti bitta optik tolali kabel orqali 1 Petabit/s (1 000 000 Gigabit/s) tezlikda ma'lumot uzatdi. Bu tezlikda butun insoniyat tarixi davomida yozilgan barcha kitoblarni 1 soniyada uzatish mumkin. Zamonaviy magistral optik liniyalar 100-400 Gbps tezlikda doimiy ishlaydi.*

Zamonaviy texnologiyalarda shovqinga qarshi kurash

5G tarmoqlari shovqin muammosini yangi usul bilan hal qiladi — Massiv MIMO (Multiple Input Multiple Output) texnologiyasi. An'anaviy antenna 1 yoki birnechi element o‘rniga, 5G bazaviy stantsiyasi 64-256 ta antenna elementiga ega bo‘lishi mumkin.

Bu ko‘p sonli antenna elementi signalni muayyan foydalanuvchiga "nurlash" (beamforming) imkonini beradi. Shovqin barcha yo‘nalishlarda tarqaladigan bo‘lsa, foydali signal faqat kerakli yo‘nalishda kuchayadi. Bu SNR ni 10-20 dB ga oshirib, samarali sig‘imni 5-10 marta ko‘paytiradi.

AI yordamida shovqin yo‘q qilish

Zamonaviy AI algoritmlari shovqin bilan kurashda inqilob qilmoqda. NVIDIA RTX Voice, Krisp va boshqa dasturlar neyron tarmoqlar yordamida ovoz signalidan fon shovqinini real vaqtda ajratib, tozalaydi. Bu algoritmlar minglab soatlik ovoz namunalari asosida o‘qitilgan.

Deep learning modellari klassik filtrlar yechimga kelmagan muammolarni ham hal qila oladi. Masalan, spiker gapirganida orqa fondan kelayotgan boshqa kishining ovozi va shovqinni bir vaqtda ajratib tashlash — bu insonning o‘zi ham qiyin amalga oshiradigan vazifa, ammo AI uni real vaqtda bajaradi.

Kvant aloqa — shovqinsizlikning yangi darajasi

Kvant mexanikasi asosidagi kvant aloqa tizimi mutlaqo yangi shovqin paradigmasini taqdim etadi. Kvant kalitlarini taqsimlash (QKD — Quantum Key Distribution) protokolida shovqin nafaqat muammo, balki xavfsizlik ko‘rsatkichiga aylanadi: agar tinglash urinishi bo‘lsa, kvant holat buziladi va bu darhol aniqlanadi.

Xitoy 2017-yilda "Micius" kvant yo‘ldoshi orqali 1200 km masofada kvant aloqasini amalga oshirdi. Bu texnologiya kelajakda mutlaqo tinglashdan himoyalangan aloqa kanallarini yaratishi mumkin.

Xulosa

Shovqin va buzilishlar — telekommunikatsiyaning abadiy hamrohi. Ular yo‘q qilinmaydi, lekin ularga qarshi kurashish, chegaralash va kompensatsiya qilish mumkin. Bu kurash muhandislik fanining rivojlanishini harakatga keltirgan asosiy kuch bo‘lib kelgan.

Shannon formulasi bu kurashning matematikasini belgilab berdi: u nimalargacha erishish mumkinligini ko‘rsatdi. Zamonaviy LDPC va turbo-kodlar shu chegaraga 0.1-0.5 dB gacha yaqinlashdi — bu deyarli ideal. Optik tolali kabellar elektromagnit shovqin muammosini butunlay hal qildi. AI texnologiyalari esa avval imkonsiz deb hisoblangan shovqin filtratsiyasini amalga oshirmoqda.

Kelajakda 6G, kvant aloqa va neyromorfik signal qayta ishlash yangi imkoniyatlarni ochadi. Ammo fizika qonunlari o‘zgarmaydi — va Shannonning formulasi hamisha asosiy yo‘riqnoma bo‘lib qoladi. Shovqin bilan kurash davom etadi, lekin insoniyat bu kurashda har doim yangi g‘alabalar qozonib kelgan.

"Shovqin yo‘q bo‘lmaydi. Lekin uni yengish — muhandislikning eng go‘zal san'ati." — Muhandislik falsafasidan

Foydalanilgan adabiyotlar

1. Shannon, C.E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal, 27(3-4), 379-423, 623-656.
2. Haykin, S. (2009). Communication Systems (5th ed.). Wiley.
3. Proakis, J.G., & Salehi, M. (2008). Digital Communications (5th ed.). McGraw-Hill.
4. Nyquist, H. (1928). Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors. Physical Review, 32(1), 110-113.
5. Johnson, J.B. (1928). Thermal Agitation of Electricity in Conductors. Physical Review, 32(1), 97-109.
6. Berrou, C., Glavieux, A., & Thitimajshima, P. (1993). Near Shannon Limit Error-Correcting Coding. ICC Proceedings.
7. ITU-T G.711 (1988). Pulse code modulation (PCM) of voice frequencies. International Telecommunication Union.
8. Gallager, R.G. (1963). Low-Density Parity-Check Codes. MIT Press.