DOI: 10.65322/j.srd.05192026.129

5G TIZIMLARIDA NOORTOGONAL KO‘PLAB ULANISH (NOMA) TAHLILI

Yusupov Yarashbek Toxirbayevich, *dotsent,*
e-mail: yarashbekyusupov@mail.ru
Korotkova Larisa Aleksandrovna, *katta o‘qituvchi,*
e-mail: korotkova.larisa@mail.ru
Toshkent davlat texnika universiteti

Annotatsiya. *NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) – kelajak avlod istiqbolli simsiz ulanish texnologiyalaridan biridir. Superpozitsion kodlash (SC: superposition coding) texnologiyasidan foydalangan holda uzatuvchi qism va interferensiyani ketma-ket bostirish (SIC: successive interference cancellation) texnologiyasi bilan jihozlangan qabul qiluvchi qismga ega bo‘lgan NOMA ko‘plab istiqbolli xususiyatlarga ega va mavjud LTEda qabul qilingan ortogonal ko‘plab ulanish (OMA) usuli bo‘lgan ortogonal chastota bo‘linishli ko‘plab ulanish (OFDMA) texnologiyasiga nisbatan afzalliklarga ega. Ushbu maqolada 5G tizimlarida NOMAga oid so‘nggi tadqiqot tendensiyalari tahlil qilingan. NOMAning asosiy tushunchasi muhokama qilinadi va kelajakdagi simsiz texnologiyalar sohasida uning ahamiyati baholanadi. NOMAning ishlashi sonli tahlil natijalari orqali tahlil qilinadi; NOMAning dolzarb muammolari va murakkabliklariga asoslanib, kelajakda hal qilinishi kerak bo‘lgan masalalar taqdim etiladi. Ikki foydalanuvchili quyi yo‘nalish uchun bajarilgan hisob 10–30 dB SNR da NOMA umumiy tezlikni OMA ga nisbatan 14–24 % ga oshirishini, biroq quvvat taqsimoti qat’iy bo‘lganda yuqori SNR da zaif foydalanuvchi tezligi OMA dagidan past bo‘lishini ko‘rsatdi.*

Аннотация. *NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access – неортогональный множественный доступ) является одной из перспективных технологий беспроводного доступа для сетей связи будущих поколений. NOMA, использующая технологию суперпозиционного кодирования (SC – Superposition Coding) на стороне передатчика и технологию последовательного подавления помех (SIC – Successive Interference Cancellation) на стороне приёмника, обладает рядом перспективных характеристик и преимуществ по сравнению с OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access – множественный доступ с ортогональным частотным разделением каналов), применяемой в существующих сетях LTE и относящейся к методам ортогонального множественного доступа (OMA – Orthogonal Multiple Access). В данной статье анализируются современные тенденции исследований NOMA в системах связи пятого поколения (5G). Рассматриваются основные концепции NOMA и оценивается её значимость для развития беспроводных технологий будущего. Эффективность NOMA исследуется на основе результатов численного анализа. С учётом актуальных проблем и сложностей реализации NOMA определяются задачи, требующие решения в дальнейших исследованиях. Расчёт для двухпользовательской нисходящей линии показал, что при ОСШ 10–30 дБ NOMA повышает суммарную скорость на 14–24 % по сравнению с OMA, однако при фиксированном распределении мощности и высоком ОСШ скорость слабого пользователя ниже, чем в OMA.*

Abstract. *NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) is one of the promising wireless access technologies for future-generation communication networks. By employing superposition coding (SC) at the transmitter and successive interference cancellation (SIC) at the receiver, NOMA offers several promising features and advantages over orthogonal frequency-division multiple access (OFDMA), which is widely used in existing LTE networks and is based on the orthogonal multiple access (OMA) principle. This paper reviews recent research trends in NOMA for fifth-generation (5G) communication systems. The fundamental concepts of NOMA are discussed, and its significance for future wireless technologies is evaluated. The performance of*

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.129

NOMA is analyzed through numerical results. Finally, in light of the current challenges and complexities associated with NOMA, key issues requiring further investigation are identified. A calculation for a two-user downlink shows that at an SNR of 10–30 dB NOMA increases the sum rate by 14–24 % compared with OMA, whereas with fixed power allocation at high SNR the weak user's rate falls below its OMA rate.

Kalit so'zlar: *NOMA, superpozitsion kodlash (SC), interferensiyani ketma-ket bostirish (SIC), ortogonal ko'plab ulanish (OMA), OFDMA, quvvat taqsimoti, 5G.*

Ключевые слова: *NOMA, суперпозиционное кодирование (SC), последовательное подавление помех (SIC), ортогональный множественный доступ (OMA), OFDMA, распределение мощности, 5G.*

Keywords: *NOMA, superposition coding (SC), successive interference cancellation (SIC), orthogonal multiple access (OMA), OFDMA, power allocation, 5G.*

Kirish. Mobil aloqa xizmatlarining barqarorligini doimiy ta'minlash va operatorlar hamda foydalanuvchilarning ortib borayotgan talablarini qondirish maqsadida 5G mobil aloqa xizmati paydo bo'ldi. 5G tarmog'ining eng muhim vazifasi 4G tarmog'iga qaraganda ancha yuqori chastota samaradorligiga erishishdir. Chunki 2020-yillardagi mobil ma'lumotlar trafigi 2010-yilga nisbatan kamida 1000 barobar ko'proq o'sgani aytilmoqda. ITU-R M.2083 tavsiyasiga ko'ra, IMT-2020 (5G) tizimlarida IMT-Advanced (4G) ga nisbatan eng yuqori uzatish tezligi 1 Gbit/s dan 20 Gbit/s gacha, foydalanuvchi sezadigan tezlik 10 Mbit/s dan 100 Mbit/s gacha, hudud bo'yicha trafik sig'imi 100 barobar, spektr samaradorligi esa 3 barobar oshishi ko'zda tutilgan [1].

Uyali aloqa tarmoqlarining tizim unumdorligini oshirishdagi eng muhim omil odatda simsiz ulanish texnologiyasining tuzilishi hisoblanadi, ayniqsa, ko'plab ulanish texnologiyasi. Ko'plab ulanish texnologiyalari odatda ortogonal va noortogonal usullarga bo'linadi [2]. Ortogonal usulda turli xil foydalanuvchilarning signallari bir-biriga ortogonaldir, ya'ni o'zaro korrelyatsiya qiymati 0 ga teng (tizimning o'tkazish qobiliyati va vaqt kabi mavjud resurslar foydalanuvchilar o'rtasida taqsimlanadi). Kod bo'yicha ajratishli ko'plab ulanish (CDMA) kabi noortogonal usullarda foydalanuvchi signallari o'rtasidagi korrelyatsiya munosabati 0 bo'lmasligi mumkin. IS-95, CDMA2000 va keng polosali CDMA (WCDMA) kabi 2- va 3-avlod uyali aloqa tizimlari aslida noortogonal ko'plab ulanish texnologiyasini qabul qilgan. CDMA sotalararo shovqin va so'nish hodisalariga chidamli, ammo sota ichidagi shovqinlarga ko'proq moyil. Agar sota tuzilishi to'g'ri amalga oshirilsa, ortogonal ko'plab ulanish (orthogonal multiple access: OMA) sota ichidagi foydalanuvchilar o'rtasidagi shovqinning oldini olishi mumkin. Shuning uchun IS-95 dan tashqari 1- va 2-avlod uyali aloqa tizimlarining aksariyati (AMPS, GSM) chastota yoki vaqt bo'yicha ajratishga asoslangan OMA usulini qabul qildi. Bundan tashqari, 4G tizimlari, ya'ni LTE va LTE-A ham OFDMA asosidagi OMA usulini qabul qilgan.

Sota ichidagi shovqinni bostirishda amaliy jihatlariga qaramay, CDMA spektrning kengayish xususiyati tufayli ma'lumot uzatish tezligi bo'yicha cheklanishlarga ega. OMA tizim darajasidagi ish unumdorligi nuqtai nazaridan yaxshi natijalarni kutish mumkin bo'lgan tanlovdir. Ammo yuqorida aytib o'tilgan sabablarga ko'ra, 5G tarmog'i yanada yuqori tizim samaradorligini talab qiladi. Ko'plab tadqiqotchilar kelajakdagi simsiz ulanishning potensial usuli sifatida NOMA ni o'rgana boshladilar. NOMA uzatkichdagi superpozitsion kodlash (SC) va qabul qilgichdagi interferensiyani ketma-ket bostirish (SIC) texnologiyalariga asoslanib, a'lo darajadagi spektr samaradorligiga erishishi mumkin [3, 4]. E'tiborga molik jihati shundaki, superpozitsion kodlashdan foydalanish uzatkichga bir vaqtning o'zida ko'plab foydalanuvchilarning ma'lumotlarini uzatishga imkon beradi. Bu maqsadga erishish uchun uzatkich har bir foydalanuvchining ma'lumotlarini alohida kodlashi kerak. Misol uchun, ikki foydalanuvchi uchun uzatkichga ikkita kodlovchi kerak bo'ladi va bu kodlovchilar har bir foydalanuvchining kirish ma'lumotlarini kompleks ketma-ketlikka xaritalaydi.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.129

Qavatlangan kodlash – bu Gauss radio kanalida aloqa hajmini ta’minlashga imkon beruvchi ortogonal bo‘lmagan kodlash usuli. Interferensiyani ketma-ket bostirish (SIC) texnologiyasi fizik qatlamda qo‘llaniladigan usul bo‘lib, qabul qiluvchi tomonida bir nechta qabul qilingan signallarni bir vaqtning o‘zida qayta ishlash uchun ishlatiladi [5–7]. Ushbu texnologiya qabul qilgichga ko‘rib chiqilayotgan signallar orasidagi signal kuchining farqidan foydalanib, signallarni qayta ishlashga imkon beradi: ya’ni, qabul qilgich kuchliroq signalni dekodlaydi, so‘ngra qavatlangan signaldan birinchi navbatda kuchli signalni ajratib oladi va keyin qolgan signallardan zaif signalni olib tashlaydi [8, 9]. Qavatlangan kodlash va interferensiyani ketma-ket bostirish bilan bog‘liq analitik usullar uchun [10, 11] adabiyotlarda ko‘rib chiqilgan.

NOMA 5G texnologiyasining zaruriy shartlarini qondira olishi nuqtai nazaridan tadqiqotchilarning e’tiborini tortdi. Natijada, allaqachon ko‘plab tadqiqot natijalari mavjud va NOMA bilan bog‘liq tadqiqot sohasi turli mavzularni o‘z ichiga oladi [12, 13].

Ushbu maqolada NOMA bo‘yicha tadqiqot tendensiyalari S.M.R. Islam va hammualliflarining sharhiga [14] tayangan holda ko‘rib chiqiladi va NOMA simsiz ulanish texnologiyasining o‘zgarishiga olib kelishi uchun hal qilinishi kerak bo‘lgan turli muammolar o‘rganiladi. NOMA quyidagi nuqtai nazardan tahlil qilindi:

– 5G tarmog‘idagi ko‘plab ulanish texnologiyalarining nomzod texnologiyasi sifatida NOMA tahlil qilinadi;

– adabiyotlardagi NOMA ishlash ko‘rsatkichlari va ikki foydalanuvchili tizim uchun mualliflar hisobi taqdim etiladi;

– NOMAning standartlashtirilish holati hamda to‘liq tijoratlashtirilishi uchun hal qilinishi kerak bo‘lgan muammolar aniqlanadi.

Tadqiqot obyekti va usullari. Tadqiqotda NOMA va OMA usullarini taqqoslash uchun adabiyotlarda keltirilgan sonli natijalar [5, 6, 15] tahlil qilindi hamda ikki foydalanuvchili quyi yo‘nalish (downlink) uchun erishiladigan tezliklar Shennon formulasi asosida hisoblandi [3, 12]. Kanal sharoiti yomon (1-) va yaxshi (2-) foydalanuvchilar uchun kanal kuchaytirishlari $g_1 = 1$ va $g_2 = 10$, quvvat taqsimoti koeffitsiyentlari $a_1 = 0{,}8$ va $a_2 = 0{,}2$ (1:4 nisbat) deb olindi. NOMA da kuchli foydalanuvchi SIC yordamida zaif foydalanuvchi signalini ajratib tashlaydi, shuning uchun erishiladigan tezliklar quyidagicha aniqlanadi:

$$R_1^{\mathrm{NOMA}} = log_2\left(1 + \frac{a_1 \rho g_1}{a_2 \rho g_1 + 1}\right), \quad R_2^{\mathrm{NOMA}} = log_2(1 + a_2 \rho g_2), \tag{1}$$

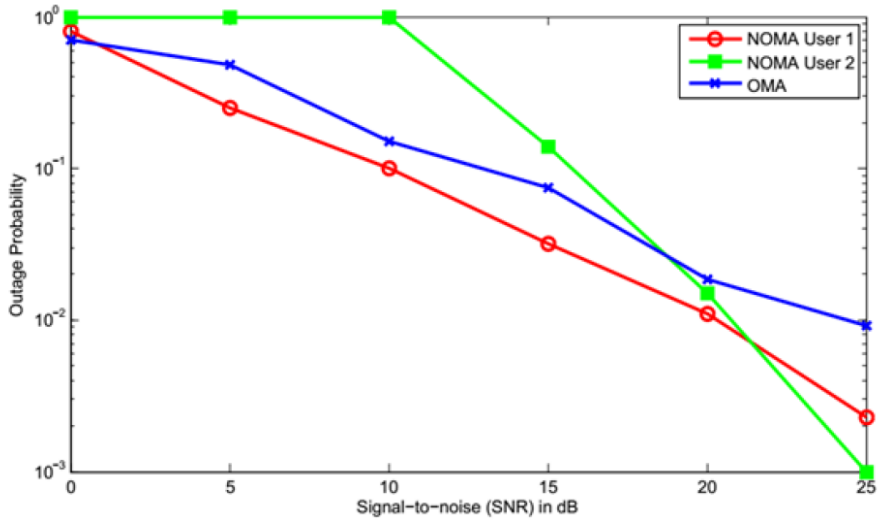
OMA da esa resurslar (vaqt yoki chastota) foydalanuvchilar o‘rtasida teng taqsimlanadi:

$$R_{\mathrm{i}}^{\mathrm{OMA}} = \frac{1}{2} log_2(1 + \rho g_{\mathrm{i}}), \quad i = 1, 2, \tag{2}$$

bu yerda ρ – uzatkichdagi signal/shovqin nisbati (SNR); g_{i} – i-foydalanuvchi kanal kuchaytirishi; a_{i} – quvvat taqsimoti koeffitsiyenti ($a_1 + a_2 = 1$); tezliklar bit/s/Hz da ifodalanadi.

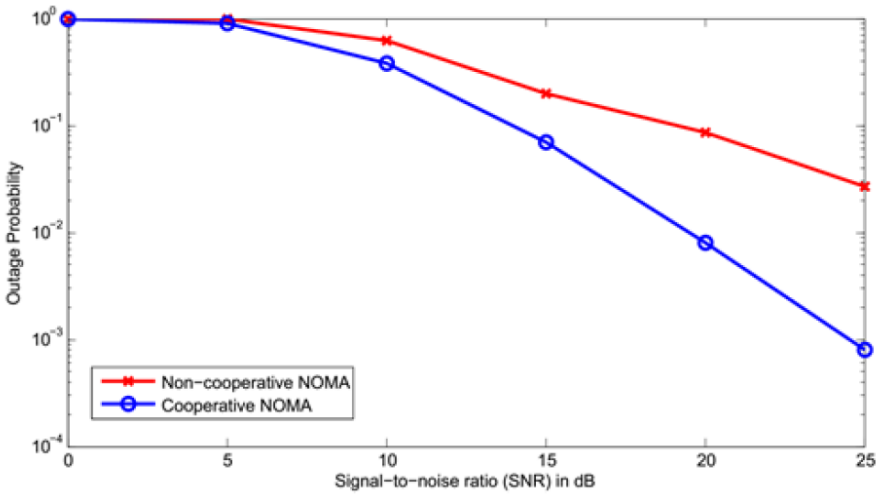
Natijalar va muhokama. Bu bo‘limda NOMAning ishlash ko‘rsatkichlarini anglash imkonini beradigan bir nechta sonli ko‘rsatkichlar qisqacha taqdim etiladi. 1-rasmda uyali tarmoqdagi NOMA va OMA ning uzilish ko‘rsatkichlari solishtirilgan. Foydalanuvchilar tasodifiy joylashgan bo‘lib, hisob parametrlari $N = 2$, $L = 10$, yo‘l so‘nishi ko‘rsatkichi $\alpha = 2$, foydalanuvchilar joylashgan doira radiusi $R_{\mathrm{D}} = 3$ m deb olingan [5]. Foydalanuvchilar tarmoqda bir xilda taqsimlangan deb taxmin qilinadi. Maqsadli ma’lumotlar tezligi zaif foydalanuvchi uchun kanalda 0,1 bit/s/Hz va kuchli foydalanuvchi uchun kanalda 0,5 bit/s/Hz qilib belgilangan. An’anaviy ortogonal usul bilan solishtirish uchun maqsadli ma’lumotlar tezligi 0,6 bit/s/Hz (ikki foydalanuvchining ma’lumotlar tezligining yig‘indisi) qilib olingan. Sonli natijalarni solishtirish uchun standartlashtirilgan SNR ishlatilgan.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.129



1-rasm. Tasodifiy joylashgan foydalanuvchilar bilan 5G tizimlarida NOMA va OMA ning uzilish ehtimoli [5]

1-rasmda ko‘rinib turganidek, NOMA boshqa taqqoslash obyektidan ko‘ra yaxshiroq natijalarni ko‘rsatmoqda va diversiya darajasi (diversity order) kanal sharoitlariga bog‘liq. Bu vaqtda kanal sharoitlari yaxshi bo‘lgan foydalanuvchi va sharoitlari yaxshi bo‘lmagan foydalanuvchiga quvvat taqsimlash nisbati 1:4 ni tashkil qiladi. “Uzilish” ehtimoli (outage probability) asosan yuqori SNR sharoitida samarali ekanligini ko‘rishimiz mumkin. Taqqoslash nuqtai nazaridan uzilish ko‘rsatkichlarini tahlil qilish uchun, ikkala foydalanuvchi ham a’lo darajadagi ko‘rsatkichlarga ega bo‘lgan yuqori SNR hududiga e’tibor qaratish kerak. Kuchliroq foydalanuvchiga ajratilgan quvvat unga mutanosib ravishda past bo‘lganligi sababli, past SNR oralig‘ida uzilish ko‘rsatkichlari qoniqarli bo‘lmaydi. Biroq, SNR yetarlicha yuqori bo‘lsa, quvvat taqsimlash multipleksorlash usuli o‘z ta’sirini foydali tarzda ko‘rsatadi va natijada yuqori tartibli diversiya darajasida ajoyib ishlashini namoyish etadi. 2-rasmda bir xil foydalanuvchilar soni va quvvat taqsimlash nisbati sharoitida, nokooperativ NOMA va kooperativ NOMAning uzilish ehtimoli SNR funksiyasi sifatida ifodalangan. Kooperativ NOMA taqqoslash obyektiga nisbatan ajoyib ishlashni ko‘rsatmoqda va kooperativ NOMA qo‘llanilganda barcha foydalanuvchilar maksimal diversiya darajasiga erishishlari mumkinligini ko‘rish mumkin.

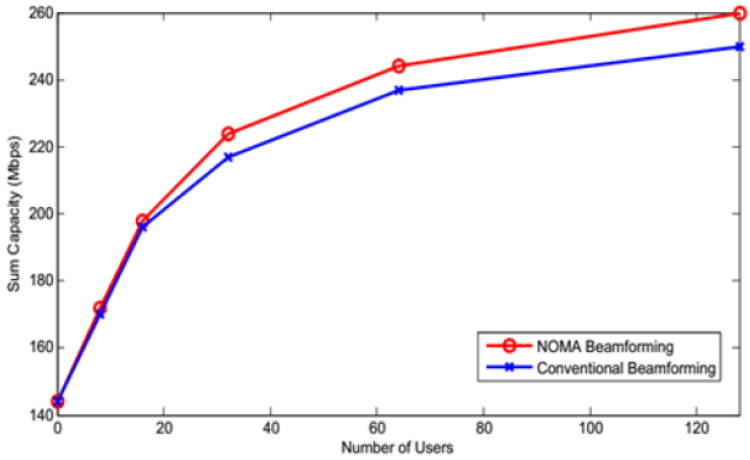


2-rasm. Kooperativ va nokooperativ NOMA ning uzilish ehtimoli [6]

Bunday yuqori diversiya yutug‘ini quyidagicha izohlash mumkin. Kooperativ NOMAda eng yomon kanal sharoitlarida ixtiyoriy foydalanuvchi boshqa (N-1) foydalanuvchidan hamkorlik oladi. Biroq, nokooperativ NOMAda i-nchi foydalanuvchi faqat i-darajali diversiyaga erishishi

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.129

mumkin. Kooperativ NOMA foydalanuvchi hamkorligi orqali barcha foydalanuvchilardan N-tartibli diversiya effektini olishi mumkin. 3-rasmda NOMA-beamforming va mavjud ko‘p foydalanuvchili beamforming usullarining umumiy o‘tkazish qobiliyati solishtirilgan [15].



3-rasm. NOMA beamforming tizimining umumiy o‘tkazish qobiliyati [15]

Bunda korrelyatsiya chegarasi ρ = 0,75, tizimning o‘tkazish polosasi 4,32 MHz, klaster uchun maksimal uzatish quvvati 43 dBm, shovqin zichligi −169 dBm/Hz ni tashkil qiladi. Rasmda ko‘rinib turibdiki, NOMA-BF umumiy o‘tkazish qobiliyatini oshiradi. Bu vaqtda, foydalanuvchilar 500 m radius ichida tasodifiy ravishda bir xilda taqsimlangan deb faraz qilindi.

NOMA-BF mavjud ko‘p foydalanuvchili beamforming bilan solishtirganda, umumiy o‘tkazish qobiliyati nuqtai nazaridan ustundir. Buning sababi, korrelyatsiya asosidagi klasterlash usuli samarali quvvat taqsimoti orqali nur ichidagi va nur tashqarisidagi shovqinni kamaytiradi. Ikki foydalanuvchi bitta beamforming yo‘nalishini baham ko‘rgani sababli, NOMA-BF yordamida qo‘llab-quvvatlanadigan foydalanuvchilar sonini osongina oshirish mumkin.

Ikki foydalanuvchili tizim uchun (1)–(2) ifodalar bo‘yicha hisoblangan tezliklar 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

NOMA va OMA da erishiladigan tezliklar, bit/s/Hz (g_1 = 1, g_2 = 10, a_1 = 0,8, a_2 = 0,2)

SNR, dB	R_1 (NOMA)	R_2 (NOMA)	Yig‘indi (NOMA)	R_1 (OMA)	R_2 (OMA)	Yig‘indi (OMA)	Yutuq, %
10	1,87	4,39	6,27	1,73	3,33	5,06	23,9
20	2,27	7,65	9,92	3,33	4,98	8,31	19,3
30	2,32	10,97	13,28	4,98	6,64	11,63	14,2

Hisob natijalariga ko‘ra, NOMA umumiy tezlikni OMA ga nisbatan 14–24 % ga oshiradi, bunda yutuq asosan kuchli foydalanuvchi hisobiga olinadi. Quvvat taqsimoti qat’iy bo‘lganda zaif foydalanuvchi tezligi yuqori SNR da $\log_2(1 + a_1/a_2)$ = 2,32 bit/s/Hz ga intiladi va 20–30 dB da OMA dagidan past bo‘ladi. Demak, foydalanuvchilar o‘rtasida adolatni ta’minlash uchun quvvatni kanal sharoitiga moslab taqsimlash zarur [8].

Amalga oshirish murakkabligi va xatolar tarqalishi kabi muammolar NOMAning kamchiliklari sifatida keltirilishi mumkin. NOMA qabul qiluvchisi o‘z ma’lumotlarini dekodlashdan oldin boshqa foydalanuvchi ma’lumotlarini birinchi navbatda dekodlashi kerak bo‘lgani uchun, SIC yordamida signalni dekodlash an’anaviy ortogonal usulga nisbatan qo‘shimcha amalga oshirish murakkabligini talab qiladi. Bundan tashqari, agar ushbu sota ichidagi foydalanuvchilar soni ko‘paysa, murakkablik ham shunga mutanosib ravishda oshadi. Biroq, foydalanuvchilarni bir nechta guruh (klaster)ga ajratish mumkin. Bu yerda har bir klaster yomon

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.129

kanal sharoitlariga ega bo‘lgan bir nechta foydalanuvchidan iborat bo‘lib, SC/SIC esa har bir guruh ichida ishlaydi. Shunday qilib, guruh bo‘yicha SC/SICni amalga oshirish asosan ishlash samaradorligi va amalga oshirish murakkabligi o‘rtasida kelishuvni talab qiladi.

NOMAda bir foydalanuvchida xatolik yuzaga kelsa, boshqa barcha foydalanuvchilarning ma’lumotlarida ham ketma-ket dekodlash xatoliklari yuzaga kelishi mumkin. Ammo bunday xatolarni nisbatan kuchli kanal kodidan foydalanish orqali osongina qoplash mumkin. Xususan, [3] ga ko‘ra, yomon kanalga ega bo‘lgan ixtiyoriy foydalanuvchi NOMA jadvalida yaxshi kanalga ega bo‘lgan boshqa foydalanuvchiga tayinlanadi, shuning uchun xato tarqalishi NOMA unumdorligiga deyarli ta’sir qilmaydi.

Shuni ta’kidlash lozimki, quvvat bo‘yicha NOMA 3GPP doirasida Rel-16 da o‘rganilgan bo‘lsa-da, tadqiqot natijasida 5G NR standartiga me’yoriy hujjat sifatida kiritilmagan [16]. Hozirgi vaqtda NOMA va uning rivoji bo‘lgan tezlikni bo‘lib uzatishga asoslangan ko‘plab ulanish (RSMA) keyingi avlod (6G) ko‘plab ulanish texnologiyalarining nomzodlari sifatida o‘rganilmoqda [17, 18].

Xulosa. Ushbu maqola orqali 5G tizimidagi NOMA tadqiqotlari holati tahlil qilinib, adabiyotlardagi sonli natijalar va ikki foydalanuvchili tizim uchun bajarilgan hisob orqali NOMAning ishlashi muhokama qilindi. Natijada NOMA kelajak avlod ko‘p ulanish texnologiyasining istiqbolli nomzodi ekanligi tasdiqlandi. NOMAning xilma-xillikdan keladigan foydasi, ustma-ust kodlangan holda uzatiladigan signallarning quvvat taqsimoti jihatidan kelib chiqadi. Ko‘pgina tadqiqotlar natijasi shuni ko‘rsatadiki, uzilish ehtimoli, umumiy kanal sig‘imi, zaif muhit foydalanuvchilarining uzatish tezligini kafolatlash va uyali aloqa chegarasidagi foydalanuvchilarning simsiz ulanish unumdorligi kabi sohalarda NOMAning ustunligini isbotlaydi. NOMA texnologiyasining muvaffaqiyatli joriy etilishi uchun uzatuvchi qismning mukammal ustma-ust kodlash va qabul qiluvchi qismning ketma-ket interferensiyani bekor qilish texnologiyasi (SIC), shuningdek, optimal quvvat taqsimoti, harakatchanlik va sub-diapazonni rejalashtirish (sub-band scheduling) talab etiladi. Mavjud ko‘plab tadqiqot natijalariga qaramay, NOMAning samaradorligi buzilish tahlili, paketga asoslangan aloqada resurslarni taqsimlash, ko‘p foydalanuvchili nur hosil qilishda uzilish tahlili kabi keyingi tadqiqotlar orqali yanada aniqroq isbotlanishi mumkin. Bundan tashqari, NOMA geterogen tarmoq muhitida ham chuqurroq o‘rganilishi kerak.

Ikki foydalanuvchili quyi yo‘nalish uchun bajarilgan hisob 10–30 dB SNR da NOMA umumiy tezlikni OMA ga nisbatan 14–24 % ga oshirishini, biroq qat’iy quvvat taqsimotida yuqori SNR da zaif foydalanuvchi tezligi OMA dagidan past bo‘lishini ko‘rsatdi. NOMA 5G NR ga me’yoriy kiritilmaganini hisobga olib, uni RSMA bilan birga 6G tizimlari kontekstida tadqiq etish maqsadga muvofiq.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1. ITU-R M.2083-0. IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. – Geneva: ITU, 2015.

2. Wang P., Xiao J., Ping L. Comparison of orthogonal and non-orthogonal approaches to future wireless cellular systems // IEEE Vehicular Technology Magazine. – 2006. – Vol. 1, No. 3. – P. 4–11.

3. Benjebbour A., Saito Y., Kishiyama Y., Li A., Harada A., Nakamura T. Concept and practical considerations of non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access // Proc. ISPACS. – 2013. – P. 770–774.

4. Higuchi K., Benjebbour A. Non-orthogonal multiple access (NOMA) with successive interference cancellation for future radio access // IEICE Transactions on Communications. – 2015. – Vol. E98-B, No. 3. – P. 403–414.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.129

5. Ding Z., Yang Z., Fan P., Poor H.V. On the performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems with randomly deployed users // IEEE Signal Processing Letters. – 2014. – Vol. 21, No. 12. – P. 1501–1505.

6. Ding Z., Peng M., Poor H.V. Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems // IEEE Communications Letters. – 2015. – Vol. 19, No. 8. – P. 1462–1465.

7. Sen S., Santhapuri N., Choudhury R.R., Nelakuditi S. Successive interference cancellation: a back-of-the-envelope perspective // Proc. 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks. – 2010. – P. 1–6.

8. Timotheou S., Krikidis I. Fairness for non-orthogonal multiple access in 5G systems // IEEE Signal Processing Letters. – 2015. – Vol. 22, No. 10. – P. 1647–1651.

9. Marshoud H., Kapinas V.M., Karagiannidis G.K., Muhaidat S. Non-orthogonal multiple access for visible light communications // IEEE Photonics Technology Letters. – 2016. – Vol. 28, No. 1. – P. 51–54.

10. Vanka S., Srinivasa S., Gong Z., Vizi P., Stamatiou K., Haenggi M. Superposition coding strategies: design and experimental evaluation // IEEE Transactions on Wireless Communications. – 2012. – Vol. 11, No. 7. – P. 2628–2639.

11. Miridakis N.I., Vergados D.D. A survey on the successive interference cancellation performance for single-antenna and multiple-antenna OFDM systems // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2013. – Vol. 15, No. 1. – P. 312–335.

12. Dai L., Wang B., Yuan Y., Han S., I C.-L., Wang Z. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends // IEEE Communications Magazine. – 2015. – Vol. 53, No. 9. – P. 74–81.

13. Sun Q., Han S., I C.-L., Pan Z. On the ergodic capacity of MIMO NOMA systems // IEEE Wireless Communications Letters. – 2015. – Vol. 4, No. 4. – P. 405–408.

14. Islam S.M.R., Kim J.M., Kwak K.S. On non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems // The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences. – 2015. – Vol. 40, No. 12. – P. 2549–2558. – DOI: 10.7840/kics.2015.40.12.2549.

15. Kim B., Lim S., Kim H., Suh S., Kwun J., Choi S., Lee C., Lee S., Hong D. Non-orthogonal multiple access in a downlink multiuser beamforming system // Proc. IEEE Military Communications Conference (MILCOM). – San Diego, 2013.

16. 3GPP TR 38.812 V16.0.0. Study on Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for NR (Release 16). – 3GPP, 2018.

17. Mao Y., Dizdar O., Clerckx B., Schober R., Popovski P., Poor H.V. Rate-splitting multiple access: fundamentals, survey, and future research trends // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2022. – Vol. 24, No. 4. – P. 2073–2126.

18. Liu Y., Zhang S., Mu X., Ding Z., Schober R., Al-Dhahir N., Hossain E., Shen X. Evolution of NOMA toward next generation multiple access (NGMA) for 6G // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2022. – Vol. 40, No. 4. – P. 1037–1071.