DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42

5G TARMOQLARIDA JOYLASHUVNI ANIQLASH USULLARI: STATISTIK BAHOLASH, QURILMAGA ASOSLANGAN VA QURILMASIZ YONDASHUVLAR HAMDA SUN'IY INTELLEKT USULLARI

Yarmuxamedov A., *v.v.b. professor,*
Radiotexnik qurilmalar va tizimlar kafedrasi.
E-mail: yarmukhammedov@tdtu.uz,
Bo'riyev U., *assistent,*
Radiotexnik qurilmalar va tizimlar kafedrasi,
E-mail: boriyev.ulash@tdtu.uz,
Toshkent davlat texnika universiteti

Annotatsiya. *Ushbu maqolada 5G va kelajak avlod mobil aloqa tarmoqlarida joylashuvni aniqlash usullarining nazariy asoslari, asosiy yondashuvlari va ularga ta'sir etuvchi omillar tahlil qilinadi. Lokalizatsiya masalasi statistik baholash nuqtayi nazaridan ko'rib chiqilib, Fisher axborot matritsasi (FAM) va Kramér-Rao quyi chegarasining (CRB) joylashuv koordinatalarini baholash aniqligini tavsiflashdagi ahamiyati yoritiladi. Shuningdek, qurilmaga asoslangan lokalizatsiya, qurilmasiz joylashuvni aniqlash (DFL), radiochastota izlari (fingerprinting), yumshoq masofaviy axborotdan foydalanish hamda sun'iy intellekt va mashinali o'qitishga asoslangan yondashuvlar ko'rib chiqiladi. ToA, TDoA va AoA kabi radioo'lchov parametrlaridan foydalanish imkoniyatlari, shuningdek, ko'p sensorli ma'lumotlarni birlashtirish va Bayes kuzatuvi usullarining lokalizatsiya jarayonidagi o'rni tahlil qilinadi. Natijalarga ta'sir etuvchi asosiy omillar - to'g'ridan-to'g'ri ko'rish chizig'i mavjudligi (LOS), uning mavjud emasligi (NLOS), ko'p yo'lli tarqalish, signal kengligi, tayanch tugunlar joylashuvi hamda o'lchov ma'lumotlarining sifati va hajmidir. Maqolada 5G va 6G tarmoqlarida yuqori aniqlikdagi joylashuvni aniqlash imkoniyatlari hamda amaliy cheklovlar ilmiy manbalarga tayangan holda yoritiladi.*

Аннотация*: В статье анализируются теоретические основы, основные подходы и ключевые факторы, влияющие на определение местоположения в сетях мобильной связи пятого поколения (5G) и сетях будущих поколений. Задача локализации рассматривается с точки зрения статистического оценивания, при этом раскрывается значение матрицы информации Фишера (FIM) и нижней границы Крамера-Рао (CRB) для характеристики точности определения координат объекта. Также рассматриваются локализация на основе устройств, определение местоположения без использования целевого устройства (DFL), радиочастотная идентификация по отпечаткам сигналов (fingerprinting), методы на основе мягкой информации о расстоянии, а также подходы с применением искусственного интеллекта и машинного обучения (AI/ML). Анализируются возможности использования параметров радиосигналов, таких как время прихода (ToA), разность времени прихода (TDoA) и угол прихода (AoA), а также роль объединения данных нескольких датчиков и байесовского сопровождения в процессе локализации. К основным факторам, влияющим на точность определения местоположения, относятся наличие прямой видимости (LOS), условия отсутствия прямой видимости (NLOS), многолучевое распространение радиоволн, ширина полосы сигнала, плотность размещения опорных узлов, а также качество и объём измерительных данных. На основе соответствующих научных источников рассматриваются возможности и практические ограничения достижения высокой точности локализации в сетях 5G и 6G.*

Abstract: *This article analyzes the theoretical foundations, main approaches, and key factors affecting localization in 5G and future-generation mobile communication networks. The localization problem is considered from the perspective of statistical estimation, highlighting the*

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42

importance of the Fisher Information Matrix (FIM) and the Cramér-Rao Bound (CRB) in characterizing the accuracy of position coordinate estimation. The article also examines device-based localization, device-free localization (DFL), radio-frequency fingerprinting, soft range information-based methods, and approaches based on artificial intelligence and machine learning (AI/ML). The use of radio measurement parameters such as Time of Arrival (ToA), Time Difference of Arrival (TDoA), and Angle of Arrival (AoA) is discussed, along with the role of multisensor data fusion and Bayesian tracking in localization. The main factors affecting localization accuracy include the availability of a line-of-sight (LOS) path, non-line-of-sight (NLOS) conditions, multipath propagation, signal bandwidth, the deployment density of anchor nodes, and the quality and volume of measurement data. Based on relevant scientific sources, the article discusses the potential and practical limitations of achieving high-accuracy localization in 5G and 6G networks.

Kalit so‘zlar*: joylashuvni aniqlash, 5G, 6G, Fisher axborot matritsasi, Kramér-Rao quyi chegarasi, qurilmaga asoslangan lokalizatsiya, qurilmasiz lokalizatsiya, radiochastota izi (finger printing), sun’iy intellekt, mashinali o‘qitish, ToA, TDoA, AoA, LOS, NLOS, ko‘p yo‘lli tarqalish, Bayes kuzatuvi.*

Ключевые слова*: определение местоположения, локализация, 5G, 6G, матрица информации Фишера, нижняя граница Крамера-Рао, локализация на основе устройств, локализация без использования целевого устройства, радиочастотный отпечаток (fingerprinting), искусственный интеллект, машинное обучение, ToA, TDoA, AoA, LOS, NLOS, многолучевое распространение, байесовское сопровождение.*

Keywords: *Keywords: localization, 5G, 6G, Fisher Information Matrix, Cramér-Rao Bound, device-based localization, device-free localization, radio-frequency fingerprinting, artificial intelligence, machine learning, ToA, TDoA, AoA, LOS, NLOS, multipath propagation, Bayesian tracking.*

Kirish. Zamonaviy mobil aloqa tarmoqlarida joylashuv to‘g‘risidagi axborot aloqa xizmatining yordamchi parametri bo‘libgina qolmay, sanoat avtomatizatsiyasi, transport, favqulodda vaziyatlarni boshqarish, robototexnika va kontekstga bog‘liq xizmatlarning muhim tarkibiy qismiga aylanmoqda. 5G New Radio texnologiyasida keng polasali signallar, ko‘p antennali tizimlar va yuqori chastotali diapazonlardan foydalanish vaqt, burchak va fazoviy xususiyatlardan joylashuv haqidagi axborotni ajratish imkoniyatlarini kengaytiradi. Shu bilan birga, ko‘p yo‘lli tarqalish, to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud bo‘lmagan holatlari, sinxronlash xatolari va o‘lchovlarning korrelyatsiyasi lokalizatsiya aniqligini cheklovchi omillar bo‘lib qolmoqda. Ushbu maqolaning maqsadi 5G tarmoqlarida joylashuvni aniqlashning statistik asoslari, qurilmaga asoslangan va qurilmasiz usullari hamda AI/ML yondashuvlarini yagona ilmiy mantiq asosida tahlil qilishdan iborat. Bunda manbalarda berilgan natijalar bilan umumlashtiruvchi mualliflik xuto‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjudalari o‘zaro farqlanadi.

Adabiyotlar tahlili. 5G tarmoqlarida joylashuvni aniqlashning asoslari: Joylashuvni aniqlash masalasini statistik baholash nuqtai nazaridan qarash maqsadga muvofiq. Bunda noma’lum holat vektori x tasodifiy kuzatuv z asosida baholanadi. x vektori foydalanuvchi qurilmasining (UE) ikki yoki uch o‘lchamli koordinatalari, zarur hollarda esa soat siljishi, oriyentatsiya yoki boshqa noma’lum parametrlarni o‘z ichiga olishi mumkin. z kuzatuv vektori qabul qilingan signal namunalaridan yoki signalni qayta ishlash natijasida olingan masofa, kechikish va burchak kabi o‘lchovlardan tashkil topadi. Umumiy kuzatuv modeli quyidagicha yoziladi:

Asosan, joylashuv masalasi statistik baholash masalasi bo‘lib, unda noma’lum x vektori tasodifiy z kuzatuvidan kelib chiqib baholanadi. Bu yerda x foydalanuvchi qurilmasining 2D yoki 3D joylashuvini o‘z ichiga olishi mumkin, z esa qabul qilingan to‘lqin shakli namunalaridan yoki

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42

turli ulanish tugunlaridan olingan taxminiy masofa va/yoki burchakdan iborat vektor bo‘lishi mumkin; bu masofa va burchaklar qabul qilingan signalni qayta ishlash natijasida olinadi. Ko‘p hollarda tasodifiy kuzatuv modeli quyidagicha ifodalanishi mumkin:

$$z = h(x) + n, \tag{1}$$

bu yerda h(x)-holat vektorini kuzatuvlar bilan bog‘lovchi ma’lum funksiya, n - o‘lchash shovqini. Statistik yondashuvda x ni baholash maksimal ehtimollik yoki Bayes baholash masalasi sifatida formulalanadi. Ushbu ifoda lokalizatsiya algoritmining aniqligini faqat yakuniy koordinata bilan emas, balki kuzatuv modelining statistik xususiyatlari bilan ham bog‘lash imkonini beradi.
bu yerda h(x)-ma’lum funksiya, n esa o‘lchash shovqini. Shu sababli joylashuv aniqlash maksimal ishonchlilik masalasi sifatida quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\hat{x} = \arg\max_{x} f_z(z; x), \tag{2}$$

bu yerda f_z (z, x)-berilgan z kuzatuvi uchun noma’lum x parametrning ishonchlilik funksiyasi.

Bir martalik joylashuvni aniqlash masalasida kamida foydalanuvchi qurilmasining 3D joylashuvi yoki 1D soat siljishidan iborat bo‘lgan xvektori $z_1, \ldots, z_M$ o‘lchovlardan olinishi kerak. Masalan, Mta atrofdagi baza stansiyalarining har biridan qabul qilingan signalni alohida sensor sifatida ko‘rib chiqishimiz yoki ularni bitta yagona o‘lchov vektoriga birlashtirishimiz mumkin. Har bir o‘lchov uchun tegishli ishonchlilik funksiyasi $f(z_m \mid \boldsymbol{x})$ mavjud. Ko‘pgina amaliy holatlarda turli o‘lchovlar turli manbalardan kelib chiqadi va shu sababli mustaqil bo‘ladi. Bu esa umumiy ishonchlilik funksiyasini qurish zaruratini oldini oladi:

$$f(z_1, \ldots, z_M \mid x).$$

Umuman olganda, foydalanuvchi holati haqida oldindan ma’lumotga ega bo‘lishimiz mumkin, masalan, tashqi manbadan yoki oldingi o‘lchovlardan olingan $f_x(x)$ funksiyasiga. U holda joylashuv masalasining yechimi quyidagicha bo‘ladi:

$$\hat{x} = \arg\max_{x} f_x(x) \prod_{m} f_{z_m}(z_m \mid x). \tag{3}$$

Joylashuvni aniqlash statistik parametrlarni baholash masalasi bo‘lganligi sababli, baholagichning aniqlik chegaralarini Fisher axboroti matritsasi asosida aniqlash mumkin. Xolis baholash uchun o‘rtacha kvadratik xatolik Kramér-Rao quyi chegarasi (CRB) bilan chegaralanadi [1]. CRB amaliy algoritmning o‘zi emas; u berilgan signal modeli va shovqin sharoitida erishilishi mumkin bo‘lgan aniqlikning nazariy chegarasini ifodalaydi.

$$\sqrt{\mathbb{E}\{\|\hat{x} - x\|^2\}} \geq \sqrt{CRB(x)} = \sqrt{Iz(J^{-1}(x))}, \tag{4}$$

bu yerda x̂-baholanayotgan parametr vektori. J(x) matritsasi Fisher axborot matritsasi (FAM) bo‘lib, uning elementlari quyidagicha:

$$[J(x)]_{i,j} = -\mathbb{E}\left\{ \frac{\partial \log f_{z|x}(z \mid x)}{\partial [x]_i} \frac{\partial \log f_{z|x}(z \mid x)}{\partial [x]_j} \right\}. \tag{5}$$

Bir martalik lokalizatsiyada o‘lchov vektori z qabul qilingan signal namunalariga mos keladi va agar signal modeli ma’lum bo‘lsa, FAM (Fisher axborot matritsasi) (4) ga muvofiq bevosita hisoblanishi mumkin. Ko‘p martalik lokalizatsiyada kanalning geometrik parametrlari η (masalan, kelish burchaklari (AoAs), ketish burchaklari (AoDs), kechikishlar) dastlab baholanadi va keyinchalik x ning noma’lum holatlari (masalan, qurilma joylashuvi, oriyentatsiyasi va soat siljishi) asosida hisoblanadi. Bunda η uchun Fisher axborot matritsasi (5) ga o‘xshash tarzda olinishi mumkin, x uchun FAM esa zanjir qoidasi asosida quyidagicha hisoblanishi mumkin:

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42

$$J(x) = T^T J(\eta) T = \left(\frac{\partial \eta}{\partial x}\right)^T J(\eta) \left(\frac{\partial \eta}{\partial x}\right)$$

(6)

bu yerda T - η ning x ga nisbatan qisman hosilasini beruvchi Yakobian matritsasi.

Qism vektorning CRB si: agar x vektori foydalanuvchi pozitsiyasi p va qo‘shimcha, ya’ni yordamchi parametrlarni o‘z ichiga olsa, pozitsiyaning aniqlik chegarasi Fisher axborot matritsasi inversiyasining tegishli blokidan olinadi. Uch o‘lchamli holatda ushbu chegaraning iziga asoslangan ko‘rsatkich ko‘pincha joylashuv chegarasining xatosi sifatida talqin qilinadi.

Fisher axborot matritsasining ekvivalenti: Fisher axborot matritsasining ekvivalenti qiziqish uyg‘otayotgan joylashuv parametrlari haqidagi foydali statistik axborotni yordamchi parametrlar ta’sirini hisobga olgan holda ajratib beradi. U Fisher axborot matritsasining Shur to‘ldiruvchisi orqali hisoblanishi mumkin. Shu sababli Fisher axborot matritsasining ekvivalenti ayniqsa ko‘p yo‘lli va ko‘p parametrli lokalizatsiya modellarida nazariy aniqlikni tahlil qilish uchun qulay vositadir.

Cheklangan va Kramér-Rao ichki chegarasi: Agar x Evklid fazosining elementi bo‘lmay, balki turli-xil bo‘lsa, cheklangan Kramer-Rao quyi chegarasi yoki ichki Kramer-Rao quyi chegarasi dan foydalanish kerak. Bunday holat, masalan, x tarkibida foydalanish qurilmasi orientatsiyasi mavjud bo‘lganda yuzaga keladi. Aposterior Kramér-Rao chegarasi (PCRB) axborot mavjud bo‘lgan dinamik kuzatish masalalarida qo‘llanadi. U faqat joriy o‘lchov emas, balki tizimning oldingi holatlari va dinamik modeli hisobga olingan vaziyatlarda nazariy aniqlik chegarasini ifodalashga imkon beradi.

Noto‘g‘ri spetsifikatsiyalangan Kramér-Rao chegarasi (MCRB) baholashda foydalanilayotgan statistik model haqiqiy kuzatuv modeliga to‘liq mos kelmagan hollarda qo‘llanadi. Bunday holat apparat cheklovlari, model soddalashtirishlari yoki boshqa sistematik og‘ishlar mavjud bo‘lgan tizimlarda muhim ahamiyat kasb etadi.

Fisher axborot matritsasi va Kramér-Rao chegarasi turkumiga mansub chegaralar lokalizatsiya algoritmlarini taqqoslashdan tashqari, tayanch stansiyalarni joylashtirish, resurslarni taqsimlash va signal shaklini loyihalash kabi tizim darajasidagi masalalarda ham qo‘llanadi [2]. Shunday qilib, ular nafaqat baholash algoritmining natijasini izohlash, balki tarmoq konfiguratsiyasini oldindan optimallashtirish uchun ham nazariy asos yaratadi.

Yuqorida qayd etilgan xato chegaralari ko‘pincha modelga asoslangan lokalizatsiya usullarida taklif etilayotgan lokalizatsiya algoritmlarining samaradorligini taqqoslash uchun ishlatiladi. Bundan tashqari, ular tizimni loyihalash va optimallashtirishda, masalan, tayanch stansiyalarni joylashtirish, resurslarni taqsimlash, to‘lqin shaklini loyihalash va hokazolarda ham qo‘llanilishi mumkin [2].

Harakatlanuvchi foydalanuvchining joylashuvini aniqlashda bir martalik baholash bilan bir qatorda vaqt bo‘yicha kuzatish masalasi ham yuzaga keladi. Birinchi masala joriy o‘lchovlardan foydalanib pozitsiyani baholashga, ikkinchisi esa foydalanuvchining dinamikasini hisobga olgan holda ketma-ket kuzatuvlardan holatni rekursiv baholashga qaratilgan. Har ikkala masala ham Bayes yondashuvi asosida qulay tarzda ko‘rib chiqiladi va manbada batafsil bayon etilgan [3].

Navigatsiya kabi ko'plab xizmatlar harakatlanuvchi foydalanuvchining joylashuvini aniqlashga tayanadi, bu esa joylashuvni vaqt davomida kuzatishni talab qiladi. Bunday holatda joylashuvni aniqlash ikkita bir-biri bilan chambarchas bog‘liq, ammo alohida jarayonlarga bo‘linadi. Birinchisi - bir lahzali joylashuvni aniqlash masalasi, ya'ni joriy o‘lchovlar to‘plamiga asoslanib foydalanuvchi pozitsiyasini baholash, bunda ma'lumotnoma tugunlarining (masalan, tayanch stansiyalar yoki sun'iy yo‘ldoshlar) ma'lum joylashuvi va turli manbalardan olingan ma'lumotlardan foydalaniladi. Ikkinchisi - kuzatish (kuzatish) masalasi bo‘lib, u foydalanuvchi dinamikasi va bir lahzali o‘lchovlarga asoslanib, foydalanuvchi pozitsiyasini rekursiv baholashdan

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42

iborat. Ikkala masala ham Bayescha yondashuvda qulay tarzda ko‘rib chiqiladi [3]. Joylashuvni kuzatish masalasini dinamik tizim ustidagi xulosa chiqarish masalasi sifatida qarash mumkin, bunda joylashuvni aniqlash tizimi foydalanuvchi holati ***x*** ni kiritadi, u vaqt o‘tishi bilan **z** (ya'ni kuzatuvlar) shovqinli ketma-ketligidan o‘zgaradi. $x(t)$foydalanuvchi holatini $t$vaqtida, $f_x\big(x(t) \mid x(t')\big)$esa foydalanuvchi dinamikasini t'vaqtidan t vaqtigacha ifodalasin (bu ma'lumot tashqi sensordan, masalan, IMU dan olinishi mumkin). Faraz qilaylik, t'vaqtida foydalanuvchi t'vaqtidagi, ya'ni $t_1 < t_2 < \cdots < t'$vaqtlardagi barcha oldingi o‘lchovlarga asoslangan posterior zichligi $f_x\big(x, (t'), |, z(t_1)z(t_2) \dots z(t')\big)$ni aniqlagan bo‘lsin. Faraz qilaylik, keyingi o‘lchovlar to‘plami $t$vaqtida kelib tushdi, u holda foydalanuvchi quyidagi ikki bosqichni qo‘llash orqali o‘zining posterior zichligini yangilashi mumkin, bu 1-rasmda ham tasvirlangan:

1. Bashorat qilish bosqichi: Dinamikaga asoslanib, t vaqtidagi foydalanuvchi holati zichligini bashorat qilish:

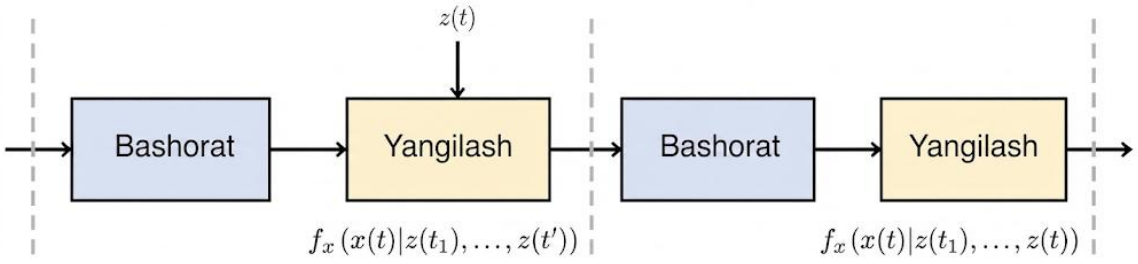
$$f_x\big(x, (t), |, z(t_1)z(t_2) \dots z(t')\big) = \int f_x\big(x, (t), x, (t'), \mid z(t_1)z(t_2) \dots z(t')\big)dx(t') = \int f_x\big(x(t) \mid x(t')\big)f\big(x, (t'), |, z(t_1)z(t_2) \dots z(t')\big)dx(t').$$

Endi $f_x\big(x, (t), |, z(t_1)z(t_2) \dots z(t')\big)$ ni $z(t)$o‘lchovi kuzatilishidan oldin t vaqtidagi foydalanuvchi holatining apriori zichligi sifatida talqin qilish mumkin.

2. Tuzatish/yangilash bosqichi: Joriy o‘lchovlarni hisobga olish uchun foydalanuvchi holati zichligini yangilash:

$$f_x\big(x, (t), |, z(t_1)z(t_2) \dots z(t)\big) \propto f_x\big(x, (t), |, z(t_1)z(t_2) \dots z(t')\big)f_z\big(z(t) \mid x(t)\big).$$

1-rasm. $t' < t$vaqtigacha bo‘lgan o‘lchovlarga asoslangan bashoratlash va $t$vaqtidagi yangilash bosqichining tasviri (t vaqtidagi o‘lchovlarga asoslangan) [2]



2-rasm. Kuzatish jarayonida 3 ta sensorni (kamera, 5G va inersial o‘lchov bloki) birlashtirish, bu bashorat qilish va yangilash bosqichlarini rekursiv qo‘llashni o‘z ichiga oladi [2]

Tuzatish bosqichi bir martalik joylashuvni aniqlash masalasi bilan chambarchas bog‘liq ekanligini unutmang, bu ko‘pincha kuzatish filtrining ichki tartib-qoidasi hisoblanadi.

Joylashuvni kuzatish uchun turli xil filtrlash algoritmlaridan foydalanish mumkin va ularni tanlash, odatda, muayyan ehtimollik zichligi funksiyasiga, shuningdek, hisoblash murakkabligiga qo‘yiladigan talablarga bog‘liq. Bayes filtrlari ikkita asosiy guruhga bo‘linadi: Kalman filtri va zarrachalar filtri. Xususan, Kalman filtrlari odatda past hisoblash murakkabligiga ega, biroq ular kuchli nochiziqli modellar yoki ko‘p modali taqsimotlar bilan ishlashga qodir emas. Zarrachalar filtrlari kuchli nochiziqli va Gauss bo‘lmagan modellar bilan ishlay oladi, biroq buning evaziga

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42

yuqori hisoblash murakkabligini talab qiladi, chunki holat fazosining o‘lchamliligi ortishi bilan zarrachalar soni eksponensial ravishda ortadi.

Metodologiya. Amaliy jihatlar: Bunday dinamik tizimlarni modellashtirishning amaliy yondashuvi holat-fazo yondashuvi bo‘lib, unda $z^{(k)}$ shovqinli o‘lchovlar (masalan, burchak, vaqt, quvvat o‘lchovlari) k bilan indekslangan diskret vaqtlarda mavjud deb hisoblanadi va bu diskret vaqtli ifodalashga olib keladi. Holat-fazo yondashuviga amal qilgan holda, joylashuv $x^{(k)}$ dinamik tizimning holat vektori hisoblanadi (ko‘p hollarda foydalanuvchining kinematik xususiyatlari, shu jumladan tezligi bilan birga). Bunday holat vektori vaqt o‘tishi bilan ikkita model yordamida baholanadi va yangilanadi: (i) harakat modeli, ya'ni holat evolyutsiyasi modeli, u pozitsiyaning vaqt bo‘yicha rivojlanishini tavsiflaydi va (ii) o‘lchov modeli, u shovqinli o‘lchovlar $z^{(k)}$ ni holatga bog‘laydi [4]. Ko‘p hollarda ushbu modellar ehtimoliy ko‘rinishda mavjud deb qabul qilinadi.. Boshqa hollarda, taxminiy xuto‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjuda chiqarish yoki mashinali o‘qitish yondashuvlari zarur bo‘ladi.

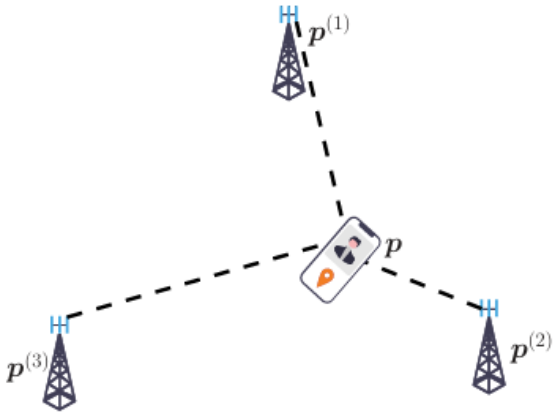
Qurilmaga asoslangan radiolokalizatsiya: Qurilmaga asoslangan lokalizatsiyada foydalanish qurilmasining joylashuv qurilmasi tomonidan yoki qurilma bilan hamkorlikda o‘lchanadigan radiokanal xususiyatlari asosida aniqlanadi. Mazkur yondashuv favqulodda xizmatlar, sanoat avtomatizatsiyasi va tijoriy xizmatlarda qo‘llanishi mumkin. Uning aniqligi signalni qayta ishlash sifati, tayanch tugunlar geometriyasi, kanal kengligi va to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud sharoitlariga bevosita bog‘liq.

Qurilmaga asoslangan radiolokalizatsiya hozirgi kunda favqulodda vaziyatlar, tijorat va sanoat ilovalarida muhim xususiyatlardan biri sifatida tan olinmoqda. Ushbu bo‘limda nazariy asoslar, signalni qayta ishlash jihatlari va qurilmaga asoslangan joylashuvni aniqlashning misollari keltirilgan.

Qurilmaga asoslangan lokalizatsiyada noma’lum holat x yangi avlod bazaviy stansiyasilar tomonidan olingan yoki foydalanish qurilmasi tomonidan qayta ishlangan signal kuzatuvlari z asosida baholanadi. Masofa, kechikish, kelish vaqti (ToA), kelish vaqtlari farqi (TDoA), kelish burchagi (AoA) va ketish burchagi (AoD) kabi o‘lchovlar pozitsiya haqidagi axborotning asosiy manbalaridir. Ushbu o‘lchovlarning statistik aniqligi keyingi koordinata bahosining nazariy va amaliy chegaralarini belgilaydi. Bunday hollarda joylashuvni aniqlash xatosining quyi chegaralari kabi samaradorlik ko‘rsatkichlari joylashuvni aniqlash tizimlarini tahlil qilish va loyihalashda muhim ahamiyatga ega. Jumladan, ular tarmoq parametrlarining tizim samaradorligiga ta’sirini miqdoriy jihatdan baholash hamda ushbu quyi chegaralarga yaqin natijalarni ta’minlay oladigan algoritmlarni ishlab chiqish imkonini beradi [5, 1, 6-12].

Signal modeli: $N_u$ta foydalanish qurilmasi, agentlar va $N_b$ta yangi avlod bazaviy stansiyasilar, ya'ni tayanch nuqta (ma'lum joylashuvlardagi tugunlar) iborat tarmoqni ko‘rib chiqib, K=1 tayanch nuqta o‘zining pozitsiyasini p^knuqtada joylashtirgan. Umumiy holda, qurilmaga asoslangan radiolokatsiyaning maqsadi foydalanish qurilmalarning pozitsiyalarini tugunlararo va tugun ichidagi o‘lchovlar hamda mavjud bo‘lganda xarita ma'lumotlari asosida aniqlashdan iborat. Biz soddalashtirilgan stsenariyga e'tibor qaratamiz, bunda UE lar bir-biri bilan hamkorlik qilmaydi. Bu holda bu stsenariy asosan $K = 1$va $N_u = 1$holatiga to‘g‘ri keladi, bu 3-rasmda tasvirlangan. UE ning holati x vektori bilan belgilanadi, u foydalanish qurilmasining pozitsiyasi, tezligi, tezlanishi, oriyentatsiyasi va burchak tezligini o‘z ichiga olishi mumkin. Oddiy holatda, $x = [p^T\ \eta^T]^T$, bu yerda p - foydalanuvchi qurilmasining pozitsiyasi, η esa keraksiz parametr.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42



3-rasm: Qurilmaga asoslangan joylashuvni aniqlash konfiguratsiyasining tasviri, bunda $N_b = 3$ta yangi avlod bazaviy stansiyasilar va bitta foydalanish qurilmasi, ya'ni $N_a = 1$ [5]

Radio signal yangi avlod bazaviy stansiyasilar tomonidan uzatilishi va foydalanish tomonidan qabul qilinishi mumkin yoki foydalanuvchi qurilmalar tomonidan uzatilishi va yangi avlod bazaviy stansiyasilarda qabul qilinishi mumkin. Signal $r^k(t)$- k-chi havola (ya'ni foydalanuvchi qurilmasi va k-chi yangi avlod bazaviy stansiyasilari o‘rtasidagi) orqali ko‘p yo‘lli tarqalishdan so‘ng qabul qilingan signal bo‘lib, uni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$r^{(k)}(t) = \sum_{l=1}^{L^{(k)}} \alpha_l^{(k)} S(t - \tau_l^{(k)}) + n(t), \tag{7}$$

bu yerda L- yo‘llar soni (qoidaga ko‘ra $l = 1$ to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rinish yo‘lini bildiradi, agar mavjud bo‘lsa), a_l- yo‘lning kuchaytirish koeffitsiyenti, $\tau_l$esa tarqalish kechikishi. Foydalanuvchi qurilmasining pozitsiyasi va tegishli yo‘l kechikishlari o‘rtasidagi bog‘liqlik quyidagicha:

$$\tau_l^{(k)} = \frac{\left\| p - p^{(k)} \right\|}{c + b_l^{(k)}}, \tag{8}$$

bu yerda $b_l^{(k)} \geq 0$ - kechikish siljishi, c esa tarqalish tezligi, ya'ni bo‘sh fazoda yorug‘lik tezligi. Xususan, to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud sharoitida $b_l^{(k)} = 0$bo‘ladi. Biz $k = 1,2, \dots, n_l$bo‘lgan yangi avlod bazaviy stansiyasilari foydalanish qurilmasi bilan to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i holatida ekanligini hisobga olamiz, $k = n_l + 1, n_l + 2, \dots, N_b$bo‘lganlar esa foydalanish qurilmasi bilan to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rinish bo‘lmagan holatda. Bu $k = 1,2, \dots, n_l$uchun $b_l^{(k)} = 0$ ekanligini anglatadi.

Fisher axborot matritsasining ekvivalenti: Pozitsiya baholovchisi $\hat{p}$ ning o‘rtacha kvadratik xatosi, (4) ga muvofiq, kvadrat joylashuv xatosining quyi chegarasi bilan quyidagicha chegaralanadi [13]:

$$\mathbb{E}\{\|\hat{p}\|^2\} \geq tr\{J_e^{-1}(p)\} =: P(p), \tag{9}$$

bu yerda $J_e(p)$ – (4) Fisher axborot matritsasining ekvivalenti. Agar joylashuvni aniqlash jarayoni bir bosqichda amalga oshirilsa va butun signal shakli kuzatuv sifatida qabul qilinsa, (5) ifodadagi z vektor barcha yangi avlod bazaviy stansiyasilar tomonidan qabul qilingan $r^{(k)}(t)$ signal shakllarining vektor ko‘rinishini ifodalovchi $\boldsymbol{r}$ vektoriga mos keladi, ya'ni $k = 1,2, \dots, N_b$. Bunday holatda, [13] manbaga ko‘ra, foydalanish qurilmasi joylashuvining Fisher axborot matritsasining ekvivalenti quyidagi ko‘rinishda ifodalanadi:

$$J_e(p) = \sum_{k=1}^{n_l} \lambda_r^{(k)} (1 - X_r^{(k)}) J_r(\varphi_r^{(k)}), \tag{10}$$

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42

bu yerda $\lambda_k^{(k)}$- manfiy bo‘lmagan son bo‘lib, k-chi yangi avlod bazaviy stansiyasilaridan olingan reyting axboroti intensivligi deb ataladi va k-chi havolaning birinchi yo‘li uchun signal o‘tkazish polosasiga va sensorli radar tarmog‘iga proporsionaldir. Boshqacha qilib aytganda, X_k- signal yo‘lining ustma-ust tushish koeffitsiyenti deb ataladi va u ko‘p yo‘lli tarqalishning joylashuvni aniqlashga ta’sirini tavsiflaydi. Nihoyat, $J_r\left(\varphi_l^{(k)}\right)$ - masofasini aniqlash matritsasi bo‘lib, u $\varphi_l^{(k)}$- tayanch nuqtadan agent yo‘nalishiga bog‘liq. Masofani aniqlash matritsasi - bu $\varphi_l^{(k)}$yo‘nalishi bo‘ylab birlik intensivlikka ega bir o‘lchamli matritsa. Xususan, butun to‘lqin shaklidan olingan (16) kabi bunday ifoda kuzatuv vektori sifatida ko‘p yo‘lli radiopropagatsiyaning pozitsiyani baholashga ta'siri haqida tushuncha beradi.

Agar qo‘shimcha aprior axborot mavjud bo‘lmasa, to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud bo‘lmagan yo‘llar pozitsiya haqidagi foydali axborotni to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud yo‘llarga nisbatan ancha cheklangan tarzda taqdim etadi va ayrim modellarda Fisher axborot matritsasining ekvivalentiga bevosita foydali hissa qo‘shmaydi. Ko‘p yo‘lli tarqalishda esa birinchi yo‘lning boshqa yo‘llar bilan qoplanishi ToA bahosining aniqligini pasaytirishi mumkin. Shu sababli lokalizatsiya tizimida yo‘l komponentlarini ajratish, to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud bo‘lmagan o‘lchovlarini aniqlash va ularning og‘irligini moslashtirish muhim hisoblanadi. Agar apriori ma'lumot mavjud bo‘lmasa, to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud bo‘lmagan signallari agent pozitsiyasi uchun Fisher axborot matritsasining ekvivalentiga hissa qo‘shmaydi. Shu sababli, lokalizatsiya aniqligini tahlil qilishda biz ushbu to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud bo‘lmagan signallarini yo‘q qilishimiz mumkin. Bundan tashqari, agar birinchi yo‘l hal qilinsa, $X_k = 0$ bo‘ladi va shuning uchun reyting axboroti intensivligi o‘zining maksimal qiymatiga erishadi. Biroq, signal boshqa yo‘llar orqali birinchi yo‘l bilan qoplanib qolsa, bu yo‘llar birinchi yo‘lning kelish vaqtini baholashning aniqligini pasaytiradi va shu bilan masofani o‘lchash axborot intensivligini kamaytiradi. Agar birinchi yo‘l hal qilinsa, to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud signalining masofani o‘lchash axborot intensivligi faqat bir yo‘lga bog‘liq bo‘ladi. Bunday holatda, boshqa barcha yo‘llarni yo‘q qilish mumkin va ko‘p yo‘lli signal faqat lokalizatsiya uchun birinchi yo‘lga ega bo‘lgan signalga ekvivalent bo‘ladi. Ko‘p bosqichli lokalizatsiya tizimida qabul qiluvchi avval kanal javobini baholaydi, keyin esa mavjud yo‘llarning soni va ularning kanal parametrlarini ajratadi. ToA asosidagi usullarda kechikishni, antenna massivlari qo‘llanilganda esa AoA/AoDni aniqlash talab qilinadi. Ushbu parametrlarning aniqligi keyingi geometrik lokalizatsiya bosqichiga bevosita ta’sir qiladi.

Keng tarqalgan ko‘p bosqichli joylashuvni aniqlash yondashuvida qabul qiluvchi birinchi navbatda uchuvchi signaldan kanal javobini aniqlaydi (masalan, eng kichik kvadratlar bahosi orqali) va so‘ngra har bir yo‘l uchun yo‘llar sonini hamda kanal parametrlarini ajratib oladi. Masalan, kelish vaqtiga (ToA) asoslangan joylashuv yondashuvlari $r^k(t)$signalidan $\tau_l^{(k)}$ni baholashni talab qiladi. Ko‘pgina stsenariylarda antenna massivlari ko‘rib chiqiladi va kelish burchaklari (AoAs) va uchish burchaklari (AoDs) ham baholanadi, ular mos ravishda $\theta_l^{(k)}$va $\varphi_l^{(k)}$bilan belgilanadi. Bunday holda, pozitsiya masalasi hatto bitta yangi avlod bazaviy stansiyasilari yordamida ham hal qilinishi mumkin. Shuning uchun, quyida biz umumiylikni yo‘qotmasdan bitta yangi avlod bazaviy stansiyasilariga e'tibor qaratamiz va kga bog‘liqlikni olib tashlaymiz. Xususan, signal qabul qiluvchida (ya'ni pastga yo‘nalishda foydalanuvchi qurilma yoki yuqoriga yo‘nalishda yangi avlod bazaviy stansiyasilari) yoki chastota sohasida qayta ishlanishi mumkin, bu odatda ko‘p tashuvchili tizimlarda qo‘llaniladi. Xususan, standart past chastotali tarqalish sharoitida asosiy tarmoq kanalining chastota javobi quyidagicha:

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42

$$H(f)=\sum_{l=1}^{L}\alpha_l \mathrm{a}_{\mathrm{R}}(\theta_l)\mathrm{a}_{\mathrm{T}}^{\mathrm{T}}(\varphi_l)e^{-j2\pi f\tau_l},$$

$$f\in[-W/2,W/2],$$

(11)

bu yerda W- polosa kengligi, $a_R(\theta)$va $a_T(\varphi)$— mos ravishda qabul qiluvchi va uzatuvchi tomondagi antenna massivlari javoblari. Kanal parametrlari $\eta=[\eta_1,\dots,\eta_{L-1}]^T$va $\boldsymbol{\eta}_l=[\tau_l,\theta_l,\varphi_l^T]^T$bilan belgilanadi. Qabul qiluvchi dastlab uchuvchi signaldan $H(f)$ni aniqlaydi va so‘ngra yo‘llar sonini hamda har bir yo‘lning kanal parametrlarini ajratib oladi.

Muhokama va natijalar. Shunday qilib, lokalizatsiyada faqat to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud komponentiga tayanish shart emas. Yetarli signal kengligi va antenna aperturasi mavjud bo‘lganda, ayrim ko‘p yo‘lli komponentlar ham geometrik axborot tashuvchisi sifatida ishlatilishi mumkin. Biroq bunday yondashuv kanal modeli, yo‘llarni identifikatsiya qilish aniqligi va to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud bo‘lmagan komponentlarining fizik talqiniga kuchli bog‘liq. Shuni ta'kidlash joizki, ko‘pgina joylashuvni aniqlash usullari faqat to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud yo‘liga tayansada, katta antenna massivi va keng polosali 5G tizimi turli ko‘p yo‘lli komponentlarni samarali ajratishi mumkin.

IIoT muhitida 5G lokalizatsiyasi ishlab chiqarish hududidagi aktivlar, robotlar va harakatlanuvchi transport vositalarining holatini aniqlash kabi vazifalarda qo‘llanishi mumkin. Bunday tizimlarda tarmoq topologiyasi, tayanch tugunlarning joylashuvi, signal kengligi va to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud signal qamrovi aniqlik hamda mavjudlikka ta’sir qiluvchi asosiy omillardir. Shu sababli lokalizatsiya samaradorligini baholash faqat algoritm bilan emas, balki tarmoqni joylashtirish konfiguratsiyasi bilan birgalikda olib borilishi lozim.

Joylashuvni qurilmasiz aniqlash: Joylashuvni qurilmasiz aniqlash (DFL) kuzatilayotgan shaxs yoki obyekt maxsus lokalizatsiya qurilmasini olib yurmagan holatlarda radioo‘lchovlardan foydalanib uning mavjudligi yoki pozitsiyasini aniqlashga qaratilgan. Joylashuvni qurilmasiz aniqlashda transmitter va qabul qiluvchilar orasidagi radiokanalning amplitudasi, fazasi, kechikishi yoki boshqa xususiyatlarining nishon ta’sirida o‘zgarishi tahlil qilinadi. Ushbu yondashuv smart-bino, xavfsizlik, transport va sanoat monitoringi kabi vazifalarda qo‘llanishi mumkin. Joylashuvni qurilmasiz aniqlash ayniqsa shaxs yoki obyektni kuzatish zarur bo‘lgan, ammo maxsus qurilmalar olib yurilmagan barcha holatlar va holatlarda zarur bo‘ladi. Joylashuvni qurilmasiz aniqlash boshqa kuzatuvchilar tomonidan ko‘milgan bitta va bir nechta qurilmasiz nishonlarning signallarini identifikatsiya qilish va tahlil qilishni o‘z ichiga oladi. Bunga erishish uchun kuzatilayotgan muhitda bitta yoki bir nechta sensorli radio tarmoq uzatuvchilari simsiz signallarni uzatadi. Qurilmasiz nishonlar turli qabul qiluvchilarda to‘plangan signallarni qayta ishlash orqali aniqlanadi va kuzatiladi. Joylashuvni qurilmasiz aniqlash turli holatlarda qo‘llaniladi. Masalan, Sanoat 4.0 da mmWave kommunikatsiyalari yuqori ma'lumot uzatish tezligi, past kechikish va yuqori yo‘naltirilgan antennalardan foydalanish orqali erishilgan past sezgirlik tufayli avtomatlashtirish va ulanish imkoniyatlarini ta'minlaydi [5]. Shu bilan birga, harakatlanuvchi obyektlarni real vaqtda kuzatish zavod avtomatlashtirish uchun muhim xususiyat bo‘lib, u zavodning normal ishlashiga xalaqit bermasligi kerak.

Turli texnologiyalar sensorli radar tarmoqlarning ishlashini qo‘llab-quvvatlashi mumkin. mmWave polosasining katta kengligini hisobga olgan holda, millimetr to‘lqin (mmWave) kommunikatsiyalari va passiv lokalizatsiyani integratsiyalash aniq, kengaytiriladigan, past narxli va ko‘rinmas kuzatish tizimlarini loyihalash uchun juda istiqbolli yondashuv hisoblanadi. Qo‘shimcha platformani talab qiladigan [11] usulidan farqli o‘laroq va resurslar bilan simsiz kuzatish tizimi mmWave kommunikatsiyasi bilan qo‘shimcha xarajatlarsiz integratsiyalanishi mumkin. Bunday holatlarda yana bir qobiliyatli texnologiya - bu ultra keng polosali [10] bo‘lib, u ko‘p yo‘lli tarqalishni aniq hal qilish va kelish vaqtini juda yuqori aniqlikda baholash imkonini

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42

beradi [10]. Nazariy asoslarga ko‘ra zich joylashgan obyektlar muhitida sensorli radar tarmog‘i uchun samaradorlik mezonlarini chiqarish qiyin, chunki klaster va bir nechta nishonlar mavjudligida signal modeli noma'lum parametrlarning katta soni tufayli ancha murakkablashadi. Joylashuvni qurilmasiz aniqlash uchun nazariy chegara olish muammosi jadal ilmiy qiziqish uyg‘otdi.

Signal modeli: p_{tx}da bitta uzatuvchi va indekslar to‘plami $\mathcal{R} = \{1, 2, \dots, n_R\}$ bilan belgilangan bir nechta qabul qiluvchidan iborat ko‘p statik sensorli radar tarmog‘ini ko‘rib chiqaylik, k-chi qabul qiluvchi $p_{rx}^{(k)}$, $k \in \mathcal{R}$ da joylashgan. Kuzatilayotgan muhitda $n_T$ta qurilmasiz nishonlar mavjud bo‘lsin, n-chi nishon $p_n$da, $n_b$ta keraksiz obyektlar (ya'ni devorlar va fon obyektlari, ular nishonlar yo‘qligida ham muhitda mavjud) esa $p_b$da joylashgan. Keraksiz obyektlarning muhitda mavjudligi ikki xil oqibatga olib keladi: (i) nishonlar bo‘lmaganda ham muhitda mavjud bo‘lgan fon klasterining hosil bo‘lishi; va (ii) nishondan aks etgan signal uchun to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud bo‘lmagan sharoitlari va ko‘p yo‘lli tarqalish. Fonni olib tashlash filtrlari fon klasterini yumshatishi mumkin, ammo ular to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud bo‘lmagan sharoitlari va ko‘p yo‘lli tarqalishni yumshatish uchun samarasiz. Xususan, k-chi qabul qiluvchida to‘plangan signal quyidagicha:

$$\tilde{\mathrm{r}}^{(k)}(t) = r_t^{(k)}(t) + r_b^{(k)}(t) + n^{(k)}(t), \tag{12}$$

bu yerda $r_t^{(k)}(t)$ - nishonlardan aks ettirishlarni o‘z ichiga olgan signal komponenti (ko‘p yo‘lli tarqalish va to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud bo‘lmagan sharoitlaridan ta'sirlangan), $r_b^{(k)}(t)$ - fon signal komponenti bo‘lib, nishonlar yo‘qligida ham mavjud, $n^{(k)}(t)$esa qo‘shiluvchi oq Gauss shovqini (AWGN). Xususan, nishonlardan aks ettirishni o‘z ichiga olgan qabul qilingan signal komponenti quyidagicha berilgan:

$$r_t^{(k)}(t) = \sum_{n=1}^{n_t} \sum_{l=1}^{l_{i,n}} \sum_{m=1}^{l_{r,n}^{(k)}} \alpha_{i,n,l} \rho_n^{(k)} \alpha_{r,n,m}^{(k)} S(t - \tau_{i,n,l} - \tau_{r,n,m}^{(k)}). \tag{13}$$

Har bir nishon pozitsiyasi va tegishli yo‘l kechikishlari o‘rtasidagi bog‘liqlik quyidagicha:

$$\begin{aligned} \tau_{i,n,l} &= \frac{\left\| \mathrm{p}_{tx} - \mathrm{p}_n \right\|}{c + b_{r,n,l}} \\ \tau_{r,n,m}^{(k)} &= \frac{\left\| \mathrm{p}_n - \mathrm{p}_{\mathrm{rx}}^{(k)} \right\|}{c + b_{r,n,m}^{(k)}}, \end{aligned} \tag{14}$$

bu yerda $b_{n,l} \geq 0$va $b_{n,l,m}^{(k)} \geq 0$ - kechikish siljishlari, $c$esa tarqalish tezligi, ya'ni bo‘sh fazoda yorug‘lik tezligi. Xususan, to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud bo‘lgan sharoitida $b_{n,l} = 0$ va $b_{n,l,m}^{(k)} = 0$ bo‘ladi.

Bunday fon signali $r_b^{(k)}(t)$amplitudalar, kechikishlar va radiolokatsion ko‘ndalang kesimlar jihatidan $n_b$ta keraksiz obyektlarning har biriga bog‘liq. So‘ngra qabul qilingan to‘lqin shakli fon klasteri haqidagi oldindan ma'lumotga tayanadigan fonni olib tashlash filtri orqali qayta ishlanadi. Statik va sekin harakatlanuvchi klaster generatorlari uchun samarali bo‘lgan fonni olib tashlash filtrlariga misol sifatida ketma-ket kadrlar farqiga asoslangan usullar keltirilishi mumkin [12].

Fonni olib tashlashdan so‘ng, qabul qilingan to‘lqin shakli $r^{(k)}(t) = r_t^{(k)}(t) + \epsilon^{(k)}(t)$shaklida yozilishi mumkin, bu yerda $\epsilon^{(k)}(t)$qoldiq fon-plus-shovqin buzilishini tavsiflaydi. $\epsilon^{(k)}(t)$ni nol o‘rtacha va N_{cn}^{-3}quvvat spektral zichligiga ega qo‘shimchali oq Gauss jarayoni sifatida ko‘rib chiqamiz.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42

Joylashuvni qurilmasiz aniqlash uchun Fisher axborot matritsasining ekvivalenti: Pozitsiya baholovchisi $\hat{p}_m$ning MSE si quyidagicha pastdan chegaralanadi:

$$\mathbb{E}\{\|\hat{\mathrm{p}}_m - \mathrm{p}_m\|^2\} \geq tr\{\mathrm{J}_e^{-1}(\mathrm{p}_m)\} =: P(\mathrm{p}_m). \tag{15}$$

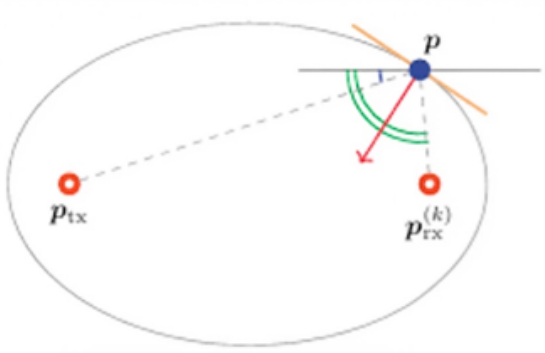
$\mathcal{P}(p)$ni umumiy SPEB va $\mathcal{P}(p_m)$ni individual SPEB deb ataymiz. Kvadrat ildizlari $S_i(p) = \sqrt{\mathcal{P}_i(p)}$va $S(p_m) = \sqrt{\mathcal{P}(p_m)}$mos ravishda $p$va $p_m$ga nisbatan o‘rtacha qiymatlari $\bar{S}_i$va $\bar{S}$bo‘lgan samaradorlik ko‘rsatkichlari sifatida qabul qilinadi.

m-chi nishon uchun Fisher axborot matritsasining ekvivalenti ni hisoblash uchun yana Shur to‘ldiruvchisi qo‘llaniladi. Umumiylikni yo‘qotmasdan, biz birinchi nishonni ko‘rib chiqamiz va $J_e(p_1)$ni hisoblaymiz.

$$\begin{aligned}
\mathrm{J}_e(\mathrm{p}_1) &= \lambda_i(1-x_i-\mu_i)\mathrm{J}_r(\varphi_{\mathrm{tx}},\varphi_{\mathrm{tx}}) \\
&+\sum_{k=1}^{n_{rx}} \lambda_{ir}^{(k)}\left(1-x_{ir}^{(k)}-\mu_{ir}^{(k)}\right)\left((\mathrm{J}_r(\varphi_{tx},\varphi_{rx}^{(k)})+\mathrm{J}_r(\varphi_{rx}^{(k)},\varphi_{tx})\right) \\
&+\sum_{k=1}^{n_{rx}} \lambda_r^{(k)}\left(1-x_r^{(k)}-\mu_r^{(k)}\right)\mathrm{J}_r(\varphi_{rx}^{(k)},\varphi_{rx}^{(k)}) \\
&-\sum_{k=1}^{n_{rx}}\sum_{j\neq k} \lambda_r^{(k)}\left(x_{rr}^{(j,k)}+\mu_{rr}^{(j,k)}\right),
\end{aligned} \tag{16}$$

Xususan, bu yerda reyting intensivligi koeffitsientlari $\lambda_1, \lambda_{1r}^{(k)}$va $\lambda_{1r}^{(k)}$bir lahzali holatda bo‘lgani kabi bir xil ta'riflarga ega. Yo‘l qoplamasi koeffitsientlari faqat birinchi nishonga tegishli bo‘lgan kesishish va aks ettirilgan ko‘p yo‘llarga bog‘liq [11]. Ko‘p nishonli qoplama koeffitsientlari nishonlararo ko‘p yo‘lli tarqalishning kesishishiga bog‘liq.

Talqin qilish:- Bitta yo‘l holati uchun Fisher axborot matritsasining ekvivalenti (16) dan olinadi va barcha qabul qiluvchilardan mustaqil hissalar yig‘indisidan iborat bo‘ladi. Xususan, k-chi qabul qiluvchining hissasi $\lambda_{1r}^{(k)}$nisbiy reyting intensivligi koeffitsientiga va $\left(\varphi_{tx}+\varphi_{tx}^{(k)}\right)/2$da hisoblangan yo‘nalishni aniqlash matritsasiga proporsionaldir. Bu quyidagicha geometrik talqinga olib keladi. Uzatuvchi va k-chi qabul qiluvchini ikkita o‘choq sifatida qabul qiladigan ellipsni ko‘rib chiqing, nishon esa ellipsda (5-rasmga) joylashgan. Burchak $\left(\varphi_{tx}+\varphi_{tx}^{(k)}\right)/2$ellipsning $p$nuqtasidagi tangensiga normal yo‘nalishga mos keladi. 5-rasmda bitta yo‘l holatida Fisher axborot matritsasining ekvivalenti ning geometrik talqini ko‘rsatilgan. Rasmda ellipsning p nuqtasidagi tangensi tasvirlangan; o‘q $\left(\varphi_{tx}+\varphi_{tx}^{(k)}\right)/2$ yo‘nalishini ifodalaydi, bu yerda $\left(\varphi_{tx}+\varphi_{tx}^{(k)}\right)/2$ yo‘nalishni aniqlash matritsasining argumentidir.



5-rasm: Yagona yo‘lli holatda Fisher axborot matritsasining ekvivalentining geometrik talqini [11]

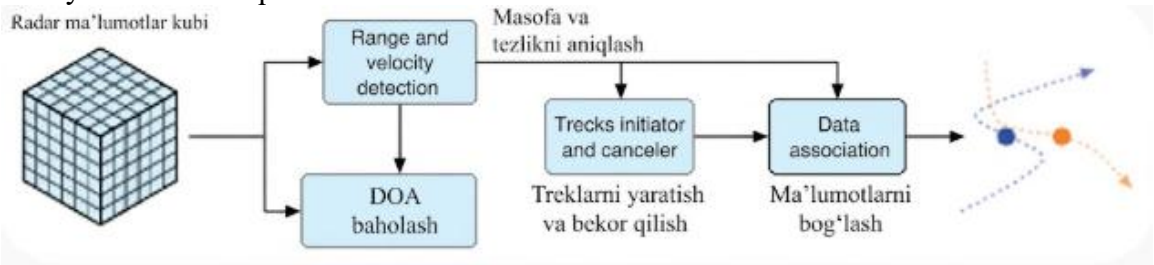
DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42

Rasmda shuningdek ikki burchak ko‘rsatilgan: bitta chiziq va qo‘sh chiziq. *k*-chi qabul qiluvchi faqat shu (normal) yo‘nalish bo‘yicha ma’lumot beradi. Ushbu natijaning intuitiv ma’nosini shovqin bo‘lmagan ideal holatni ko‘rib chiqish orqali tushunish mumkin. Nishondan aks ettirilgan signal asosida *k*-chi qabul qiluvchi uzatuvchi va *k*-chi qabul qiluvchi orasidagi masofalar yig‘indisini oladi. Shuning uchun *k*-chi qabul qiluvchi nishonning ellipsda joylashganligini biladi, lekin uning ellips bo‘ylab aniq joylashuvini aniqlay olmaydi.

Natijada, nishonning ellips tangensi bo‘ylab cheksiz kichik siljishi *k*-chi qabul qiluvchi tomonidan aniqlanmaydi. Bu shuni ko‘rsatadiki, *k*-chi qabul qiluvchi nishon pozitsiyasi haqida tangens yo‘nalishida deyarli hech qanday ma’lumot bermaydi (faqat normal yo‘nalishda ma’lumot beradi).

Ko'p nishonli holatda Fisher axborot matritsasining ekvivalenti bitta nishonli holatdagi Fisher axborot matritsasining ekvivalenti ga o'xshash tuzilishga ega bo'lib, har biri uzatuvchi va qabul qiluvchi burchaklariga nisbatan yo'nalish (yo'nalish matritsasi bilan aniqlanadi) bilan bog'liq bo'lgan bir nechta hadlar yig'indisi sifatida yozilishi mumkin. Bundan tashqari, har bir had reyting intensivligi koeffitsientiga proporsional va qoplama koeffitsientiga teskari proporsionaldir. Bir tomondan, reyting intensivligi koeffitsientlari va qoplama koeffitsientlari bitta nishonli stsenariydagi kabi bir xil ma'noga ega. Boshqa tomondan, bitta nishonli stsenariydan farqli o'laroq, nishonlararo ko'p yo'lli tarqalishning ta'siri va u bilan bog'liq qoplama ko'p nishonli qoplama koeffitsientlari orqali hisobga olinadi.

Signalni qayta ishlash usullari: - Sensorli radar tarmog‘ilar nishonlar va kuzatuv obyektlarining pozitsiyasini nishonlar va atrof-muhit tomonidan aks ettirilgan orqaga tarqalgan signallar asosida aniqlaydi [12]. Odatda, Sensorli radar tarmog‘ilar kamida bitta uzatuvchi va nishon masofalarini aniqlash uchun orqaga tarqalgan signallarni qabul qiluvchi va qayta ishlovchi bir nechta fazoviy ajratilgan qabul qiluvchilardan iborat. mmWave Sensorli radar tarmog‘ida bir nechta qabul qiluvchi antennalar bilan jihozlangan bitta sensorli radardan (SR) foydalangan holda bir nechta nishonlarni lokalizatsiya qilish va kuzatishga erishish mumkin [12]. Qabul qiluvchi antenna massivining konfiguratsiyasiga qarab (masalan, bir xil chiziqli yoki to'rtburchaklar massiv), SR orqaga tarqalgan signallarning kelish yo'nalishini (DOA) azimut va balandlik tekisliklarida aniqlay oladi. Soddalik uchun bir xil chiziqli massivni ko'rib chiqsak, qabul qilingan signal namunalari radar ma'lumotlar kubi sifatida ifodalanishi mumkin, bu yerda birinchi o'lcham diapazonni (qabul qilingan signal namunalariga tegishli), ikkinchi o'lcham tezlikni (belgilangan vaqt oralig'ida keyingi qabul qilingan signallarga tegishli), uchinchi o'lcham esa DOA ni (turli qabul qiluvchi antennalarga tegishli) ifodalaydi. Bunday ma'lumotlar kubi kuzatish algoritmi uchun kirish sifatida xizmat qiladi va undan nishon diapazoni, radial tezligi va qabul qiluvchiga nisbatan burchagi aniqlanishi mumkin [12]. 6-rasmda ko'p nishonli kuzatish uchun signalni qayta ishlash zanjirining misoli tasvirlangan. Odatda, nishonlar doimiy yolg'on signal darajasi (CFAR) algoritmlari yordamida aniqlanadi.



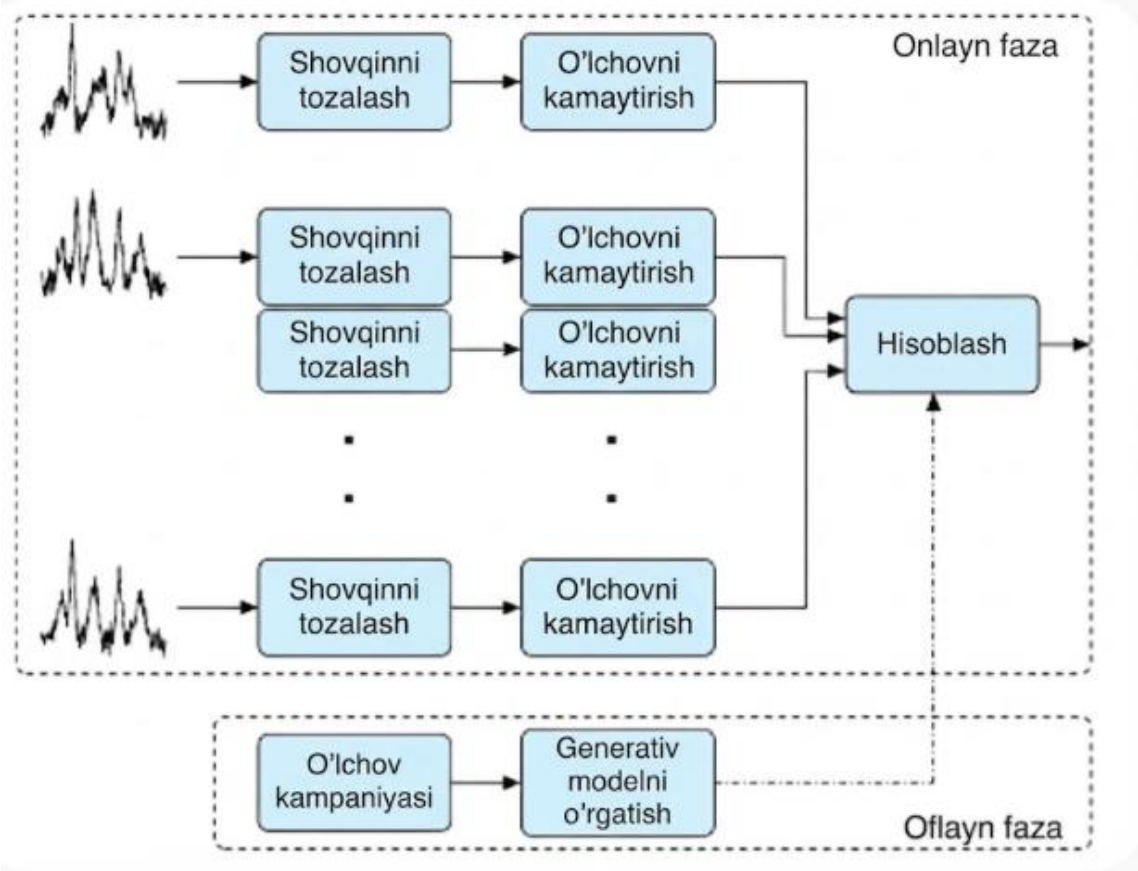
6-rasm. Ko‘p nishonli kuzatish uchun signalni qayta ishlash bosqichlarining konseptual diagrammasi [12]

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42

Bu esa mumkin bo‘lgan nishon diapazonlari va tezliklarini ifodalovchi o‘lchovlar to‘plami [12]. Aniqlangan diapazonlar va tezliklar so‘ngra tegishli DOA larni aniqlash uchun ishlatiladi. So‘ngra o‘lchovlar (ya'ni, taxminiy diapazonlar, tezliklar va DOA lar to‘plami) potensial yangi nishon treklarini ishga tushirish yoki eski treklarni olib tashlash bilan shug‘ullanadigan birinchi blokga uzatiladi, agar yangi o‘lchovlar ular bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin bo‘lmasa. Nihoyat, ma'lumotlarni assotsiatsiyalash muayyan o‘lchovlar to‘plamini qaysi nishon yaratganligini aniqlash va nishon pozitsiyasining bahosini ishlab chiqarish uchun amalga oshiriladi [12]. Ma'lumotlarni assotsiatsiyalash jarayoni oldingi o‘lchovlar va uning bashorat qilingan pozitsiyasiga asoslanib joriy nishon pozitsiyalarini bashorat qiladi va yangi o‘lchovlar asosida o‘z bahosini ehtimollik yondashuvlari orqali qayta ko‘rib chiqadi. Lokalizatsiya va kuzatishdan tashqari, kuzatilayotgan hududdagi nishonlarni hisoblash yangi paydo bo‘layotgan simsiz ilovalarda muhim vazifadir [13]. Qurilmasiz lokalizatsiya uchun an'anaviy yondashuvlar ko‘p nishonli lokalizatsiya yoki kuzatish uchun sensorli radarlarga tayanadi [13]. Odatda, bu yondashuv ma'lumotlarni assotsiatsiyalash tufayli nishonlar soni bilan eksponensial ravishda o‘sib boradigan murakkablikka ega. Biroq, ma'lumotlarni assotsiatsiyalash tizim faqat ma'lum bir hududdagi nishonlar soni kabi olomon-markazli ma'lumotlarga qiziqqanda keraksiz hisoblanadi. Bunday miqdorni nazoratsiz o‘rganish usullari orqali olomon-markazli ma'lumotlarga asoslanib aniqlash mumkin. Xususan, birinchidan, qabul qilingan to‘lqin shakllarining past o‘lchamli tasviri tavsiflovchi xususiyatlar va asosiy komponentlar tahlili asosida aniqlanadi [14]. So‘ngra, bunday tasvir uchun qo‘shma ehtimollik zichligi funksiyasi o‘lchov kampaniyasi davomida to‘plangan oldingi ma'lumotlar yordamida o‘quv bosqichida o‘rganiladi. Nihoyat, generativ model nishonlar sonini aniqlash uchun onlayn bosqichda ishlatiladi. 7-rasmda nazoratsiz o‘rganish yordamida olomon-markazli hisoblash sxemasi ko‘rsatilgan.

5G ga asoslangan DFL ning eksperimental natijalari: mmWave chastotalarida ishlaydigan 5G yangi avlod bazaviy stansiyasilar (gNodeB) tomonidan chiqariladigan imkoniyat signallari orqali joylashuvni qurilmasiz aniqlash ko‘plab ilovalarni qo‘llab-quvvatlashi mumkin [12].

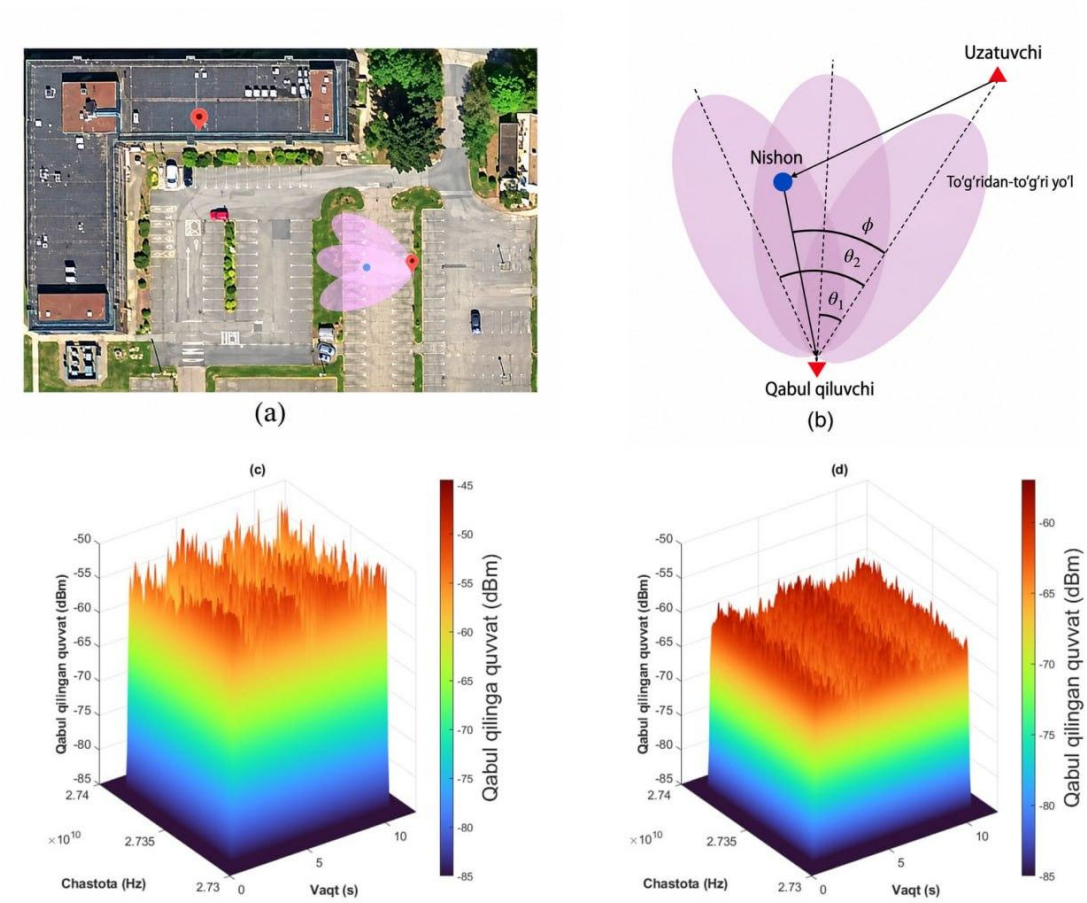
DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42



7-rasm. Nazoratsiz o‘rganish orqali olomon-markazli hisoblash sxemasi [14]

Potensial 5G yangi avlod bazaviy stansiyasilardan yorituvchi sifatida foydalanish ularning yaqin kelajakda keng tarqalishi tufayli dolzarbdir. Bundan tashqari, mmWave texnologiyalarida yuqori yo‘naltirilgan antennalar va nur shakllantirish sxemalarining qo‘llanilishi qurilmasiz nishonlar tomonidan orqaga tarqalgan signallarni samarali ushlash va qayta ishlash imkonini beradi. 8-rasmda imkoniyat 5G signallari orqali joylashuvni qurilmasiz aniqlash amalga oshirilishi mumkin bo‘lgan real stsenariy ko‘rsatilgan. Xususan, imkoniyat uzatuvchisi 27 GHz chastotada va 100 MHz polosa kengligida ishlaydigan 5G fiksirlangan simsiz kirish qurilmasidir. Ushbu rasmdagi lilak ellipslar qabul qiluvchi antennani to‘g‘ridan-to‘g‘ri yo‘nalishga nisbatan turli yo‘nalishlarga burish natijasida olingan potensial nurlarni tasvirlaydi. Xususan, qabul qiluvchi antenna to‘g‘ridan-to‘g‘ri yo‘nalishga nisbatan soat miliga teskari yo‘nalishda 30° va 60° ga burilgan; avtomobil esa to‘g‘ridan-to‘g‘ri yo‘nalishdan taxminan 35° soat miliga teskari yo‘nalishda joylashgan edi. Shuni ta'kidlash kerakki, nishon ushbu ikki potensial nur kesishgan hududda joylashgan, shuning uchun qabul qiluvchi antenna ikkala yo‘nalishda ham orqaga tarqalgan signalning komponentlarini ushlay oladi. Pastki chap va pastki o‘ng rasmlar tegishli o‘lchangan spektrlar bilan birga amalga oshirilgan o‘lchovlarni tasvirlaydi. Qabul qilingan quvvat antenna 30° ga burilganda sezilarli darajada yuqori bo‘ladi, chunki bu yo‘nalishda u nishondan ko‘proq aks ettirishlarni ushlay oladi. Intuitiv ravishda, qabul qilingan.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42



8-rasm. Orientatsiyaga asoslangan spektr va tasviriy yo‘nalishni baholash. (a) Eksperimental stsenariy, (b) antenna nurlari, (c) 30° da o‘lchangan spektr, va (d) 60° da o‘lchangan spektr [12]

Joylashuvni aniqlashda sun’iy intellekt va mashinali o‘qitish (AI/ML): Sun’iy intellekt va mashinali o‘qitish usullari radiokanaldan olinadigan yuqori o‘lchamli va nochiziqli belgilarni qayta ishlash, signal buzilishlarini kompensatsiya qilish hamda joylashuvni bevosita baholash uchun qo‘llanmoqda. 3GPP doirasida AI/ML yondashuvlarining fizik qatlam vazifalaridagi imkoniyatlari ham o‘rganilgan. Lokalizatsiya uchun asosiy kirish belgilariga RSRP, RSRQ, RSSI va boshqa radiokanaldan olinadigan ko‘rsatkichlar kirishi mumkin.

Sun'iy intellekt (AI) va mashinali o‘qitish (ML) fizik qatlam samaradorligini sezilarli darajada yaxshilashi mumkinligi kutilmoqda. Rel-18 da 3-avlod hamkorlik loyihasi (3GPP) AI/ML bilan bog‘liq fizik qatlam yaxshilanishlari uchun umumiy ramka yaratish, jumladan, tegishli AI/ML modellashtirish orqali imkoniyatlarni o‘rganmoqda. Baholash metodologiyalari va samaradorlik talablari/sinov. Joylashuvni aniqlash aniqlangan va o‘rganilayotgan uchta qo‘llanish holatidan biridir.

Boshqa tomondan, AI va ML algoritmlari ba'zi joylashuvni aniqlash ilovalari uchun allaqachon qo‘llanilmoqda. Ilovalar asosan mos yozuvlar signali qabul qilingan quvvati, mos yozuvlar signali qabul qilingan sifati va qabul qilingan signal kuchi ko‘rsatkichi hamda boshqa qiymatlarga asoslangan ushbu texnikalardan foydalanish atrofida aylanadi, shu bilan birga kontekstual ma'lumotlardan ham foydalanadigan boshqa yondashuvlar mavjud.

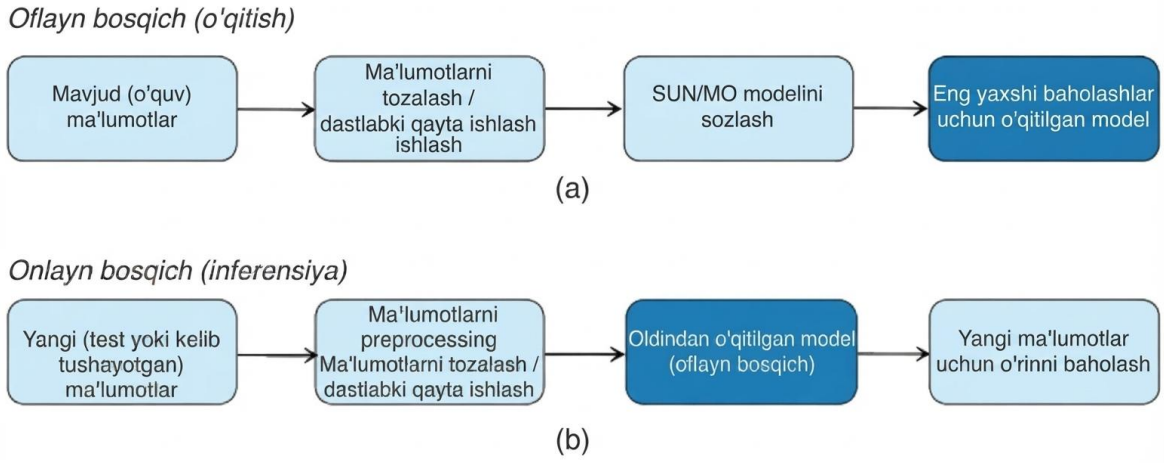
Fingerprinting - radiochastota o‘lchovlari bilan fazoviy koordinatalar o‘rtasidagi moslikni oldindan qurilgan ma’lumotlar bazasi orqali o‘rnatadigan lokalizatsiya yondashuvidir [15]. O‘qitish bosqichida ma’lum nuqtalardagi qabul qilingan signal kuchi ko‘rsatkichi, qabul qilingan

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42

signal kuchi ko‘rsatkichi, mos yozuvlar signali qabul qilingan sifati yoki boshqa signal xususiyatlari qayd etiladi; keyinchalik noma’lum nuqtada olingan o‘lchovlar ushbu bazadagi namunalar bilan taqqoslanib yoki o‘qitilgan modelga uzatilib, koordinatalar baholanadi. Ushbu usulning asosiy afzalligi murakkab tarqalish muhitini to‘g‘ridan-to‘g‘ri geometrik model bilan ifodalash zaruratining kamayishidir; asosiy cheklovi esa ma’lumotlar bazasini yig‘ish va muhit o‘zgarganda uni yangilash talabidir.

Radiochastota izi texnikalari - bu signal xususiyatlaridan "barmoq izlari" sifatida ishlaydigan naqshlar/shablonlarni aniqlash uchun foydalanadigan joylashuvni aniqlash usullari toifasi, ya'ni signal o‘lchovlari va pozitsiyalar o‘rtasidagi xaritalashni ta'minlaydi, bu esa keyinchalik yangi uchragan signal to‘plamining foydalanuvchi qurilma pozitsiyasini aniqlashda ishlatilishi mumkin [15]. AI va ML texnikalari ushbu usullarda muhim rol o‘ynashi mumkin, chunki ular naqshlarni aniqlash va pozitsiyani baholash uchun ilg‘or ramka taqdim etadi.

Shuni ta'kidlash kerakki, radiochastota izi texnikalari RAT ga bog‘liq bo‘lgan va RAT dan mustaqil texnologiyalarga asoslanishi mumkin va muqobil ravishda bir nechta texnologiyalardan foydalanish uchun qurilishi mumkin. Turli xil radiochastota izi usullari turli texnologiyalardan foydalangan holda o‘rganilgan, ya'ni 5G, WiFi, birlashtirilgan 5G va WiFi, boshqa va turli AI/ML mexanizmlari, nazorat ostida, o‘z-o‘zini nazorat qilish yoki nazoratsiz o‘rganishga asoslangan. O‘quv bosqichi oflayn tarzda amalga oshiriladi, bunda ma'lumotlarni tozalash va oldindan qayta ishlash bosqichidan so‘ng, agar kerak bo‘lsa, "barmoq izlari" modellashtiriladi. So‘ngra, ushbu texnika (ya'ni, yangi o‘qitilgan model) yangi foydalanuvchi qurilma o‘lchovining pozitsiyasini aniqlash uchun ishlatilishi mumkin (sinov bosqichi), 9-rasmda ko‘rsatilgan.



9-rasm Ofline/o'qitish bosqichi (a) va online inferensiya bosqichi (b) jarayonlarining grafik ko'rinishi. (a) Ofline bosqich va (b) online bosqich [15]

Wi-Fi RSSI asosidagi misolda ma’lumotlar o‘quv va sinov to‘plamlariga ajratilib, gradient kuchaytirilgan qaror daraxtlari (GBDT) hamda chuqur neyron tarmoqlari (DNN) qo‘llangan. GBDT yondashuvi XGBoost kabi kutubxonalar orqali amalga oshirilishi mumkin [16]. DNN esa signal belgilarining nochiziqli kombinatsiyalarini o‘rganish imkonini beradi [16]. Model samaradorligini baholashda o‘rtacha Yevklid masofasi kabi xatolik ko‘rsatkichidan foydalanish mumkin. Bunday natijalarni boshqa tadqiqotlar bilan taqqoslashda simulyatsiya maydoni, AP konfiguratsiyasi, o‘lchovlar soni va ma’lumotlarni bo‘lish usuli bir xil emasligi hisobga olinishi kerak.

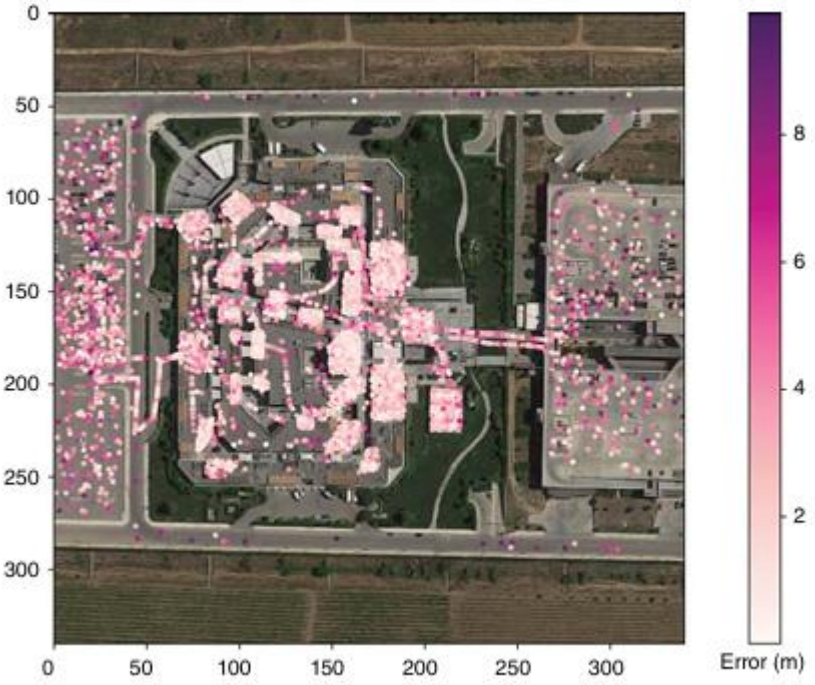
Manbada keltirilgan Wi-Fi RSSI simulyatsiyasi uchun DNN va GBDT natijalari alohida stsenariy sharoitida baholangan. DNN holatida xatolarning 90,8 foizi 3,5 m dan, 85 foizi esa 3 m dan kichik bo‘lgan; GBDT uchun mos ulushlar 83,4% va 77,5% sifatida berilgan. Ushbu qiymatlar mazkur maqola mualliflarining yangi tajriba natijalari emas, balki tegishli manbada keltirilgan

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42

natijalarni tahliliy tarzda qayta bayon qilishdir. Shu sababli ularni boshqa sharoitlarda bevosita takrorlanadigan universal aniqlik ko‘rsatkichi sifatida talqin qilish mumkin emas.

Nihoyat, shuni ta'kidlash kerakki, ikkala holat uchun ham xatolarning geografik taqsimoti simulyatsiya parametrlari (a) simulyatsiya maydonchasi ichidagi UE harakatchanligi va (b) berilgan WiFi AP geometrik konfiguratsiyasi bilan bog‘liq bo‘lib, ular muhim rol o‘ynashi mumkin, masalan, AP lar zichligi yuqori bo‘lgan va foydalanuvchi qurilmaning o‘lchovlari ko‘proq bo‘lgan hududlarda yaxshiroq natijalarga erishiladi, 10-rasmda ko‘rsatilgan.

Alohida chuqur o‘rganish yondashuvida avtokodlovchi va RNN/GRU arxitekturasi qo‘llanilgan. Manbada dastlabki lokalizatsiya xatosi taxminan 2 m atrofida bo‘lgani, ayrim baholashlarda 3 m gacha yetgani va simulyatsiya stsenariysi hamda o‘lchovlar soni yaxshilangach, baholashlarning 80% dan ortig‘ida xato 1,7 m dan kichik bo‘lgani ko‘rsatilgan. Ushbu raqamlar ham muayyan simulyatsiya sharoitlariga tegishli bo‘lib, umumiy tizim uchun kafolatlangan aniqlik sifatida qabul qilinmasligi kerak.



10-rasm. Tanlangan simulyatsiya maydonchasida o‘lchovlarning indikativ fazoviy taqsimoti va xatolik metrlarda [16]

Yumshoq axborotga asoslangan yondashuv: Yumshoq axborot (soft information, SI) yondashuvi bitta nuqtali o‘lchov bahosini ishlatish o‘rniga o‘lchovlarning ehtimoliy taqsimotini va kontekst axborotini lokalizatsiya jarayoniga kiritadi [17, 18]. Bunday axborot signal o‘lchovlari, masofa, yo‘nalish, tezlik, harakatlanish modeli yoki xarita kabi qo‘shimcha ma’lumotlar bilan birlashtirilishi mumkin. Natijada lokalizatsiya algoritmi faqat bitta masofa yoki burchak qiymatiga emas, balki mavjud ehtimoliy holatlar to‘plamiga tayangan holda baholashni amalga oshiradi.

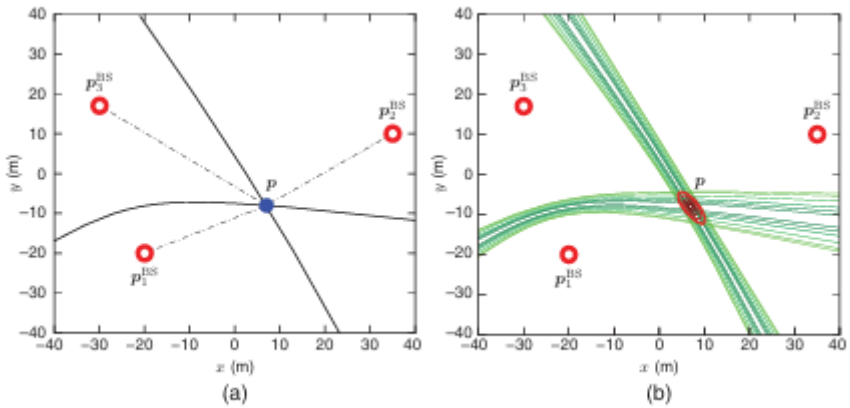
Yuqorida ta'kidlanganidek, radiochastota izi lokalizatsiyasi joylashuv baholarini taqdim etish uchun nazorat ostida va o‘z-o‘zini nazorat qiluvchi usullardan foydalanadi. Biroq, klassik algoritmlarga [17, 18] nisbatan aniqlikni sezilarli darajada yaxshilash uchun nazoratsiz mashinali o‘qitish algoritmlaridan ham foydalanish mumkin. Xususan, yumshoq axborot (SI) ga asoslangan lokalizatsiya statistik jihatdan o‘lchovlar va qurilma pozitsiyasi xususiyatlari (masalan, masofa, yo‘nalish va tezlik), shuningdek kontekst ma'lumotlari (masalan, harakatchanlik modellari, raqamli xaritalar va foydalanuvchi profillari) o‘rtasidagi bog‘liqlikni tavsiflaydi, bu esa

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42

lokalizatsiya aniqligini yaxshilaydi. kvaqtida qurilma pozitsiyasini $x^{(k)}$bilan, i-chi sensor tomonidan taqdim etilgan o‘lchov vektorini $y_i^{(k)}$bilan belgilang, bu yerda $i = 1,2,\dots,N$, va μkontekst ma'lumotlarini bildiradi. Nta sensor tomonidan to‘plangan mustaqil o‘lchovlar uchun (ular heterojen bo‘lishi mumkin), SI qurilma pozitsiyasining posterior taqsimoti sifatida quyidagicha beriladi:

$$f_{x^{(k)}}(x^{(k)} \mid \{y_i^{(k)}\}_{i=1}^{N}; \mu) \propto \underbrace{\prod_{i=1}^{N} \mathcal{L}_{y_i}(x^{(k)})}_{SFI} \underbrace{\Phi_{\mu}(x^{(k)})}_{SCI}, \tag{17}$$

bu yerda $\mathcal{L}_{y_i^{(k)}}(x^{(k)})i$-chi sensor tomonidan taqdim etilgan o‘lchovlar bilan bog‘liq SI ni, ya'ni SFI ni, $\Phi_{\mu}(x^{(k)})$esa kontekst ma'lumotlari bilan bog‘liq SI ni, ya'ni yumshoq kontekst axboroti (SCI) ni ifodalaydi. Ushbu posterior taqsimotdan qurilma pozitsiyasini aniqlash uchun foydalanish mumkin. Murakkab muhitlarda SFI ni Gauss aralashmasi modeli moslashuvi yoki yadro zichligi bahosi kabi nazoratsiz mashinali o‘qitish texnikasi orqali o‘rganilishi mumkin bo‘lgan generativ modellar orqali yaqinlashtirish mumkin [17]. 11-rasmda bitta qiymatli baholash (SVE) ga (chapda) va SFI ga (o‘ngda) asoslangan klassik lokalizatsiya texnikasining tasviriy ko‘rinishi keltirilgan, bunda uchta tayanch stansiya va bitta qurilmadan iborat tarmoqda TDoA o‘lchovlari ko‘rib chiqiladi.



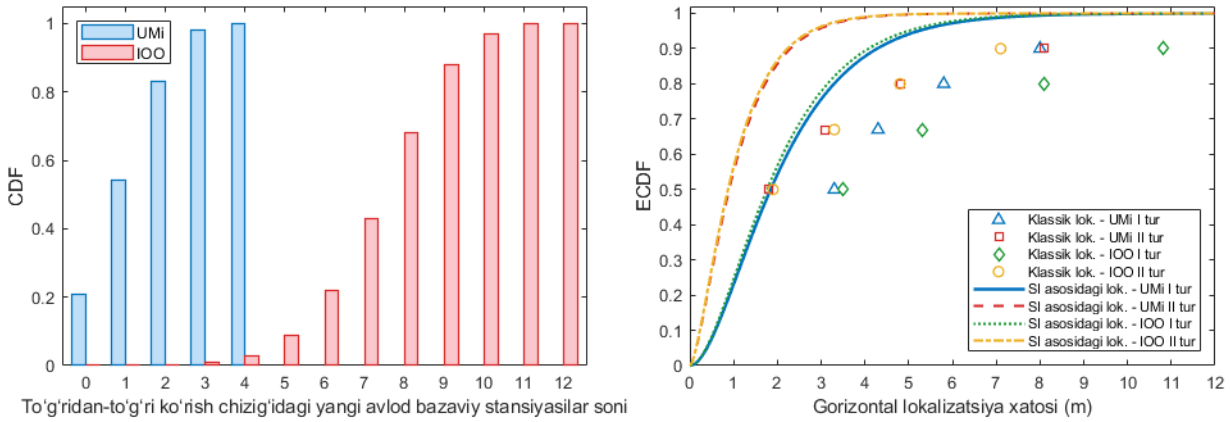
11-rasm. Uchta baza stansiyasidan iborat tarmoq uchun va kelish vaqtlari farqi (TDoA) o'lchovlarini hisobga olgan holda, bir qiymatli baholarga (a) va yumshoq xususiyat ma'lumotlariga (SFI) (b) asoslangan lokalizatsiya usullarining tasviriy ko'rinishi. (a) yagona qiymatli baholashga asoslangan lokalizatsiya va (b) SFI-ga asoslangan lokalizatsiya [17]

SI asosidagi lokalizatsiya klassik yagona qiymatli baholashga nisbatan murakkab simsiz muhitlarda qo‘shimcha statistik axborotdan foydalanadi [18]. 3GPP stsenariylarida UMi va IOO kabi muhitlar uchun to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud yangi avlod bazaviy stansiyasilar soni va lokalizatsiya xatosining empirik taqsimotlari alohida tahlil qilinadi [9]. Bunda natijalarni talqin qilishda holatining o‘lchami, yangi avlod bazaviy stansiyasilar soni, kanal modeli va o‘lchov konfiguratsiyasi kabi parametrlar albatta ko‘rsatilishi kerak.

Yagona qiymatli baholashga asoslangan klassik lokalizatsiya algoritmlari bilan taqqoslaganda, SI ga asoslangan lokalizatsiya hatto qiyin simsiz tarqalish stsenariylarida ham sezilarli samaradorlik yaxshilanishini ta'minlaydi [18]. 12-rasmda chap tomonda ikkita 3GPP standartlashtirilgan holat, ya'ni shahar mikro-hujayra (UMi) va yopiq ofis (IOO) holat [9] uchun to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud holatidagi yangi avlod bazaviy stansiyasilar sonining to‘plangan taqsimot funksiyasi (CDF) ko‘rsatilgan. UMi holatiga IOO holatiga nisbatan kattaroq

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42

bo‘lib, taxminan 500 m × 500 m maydonni egallaydi va unda 19 ta gNB joylashtirilgan, IOO stsenariysi esa taxminan 120 m × 60 m maydonni qamrab oladi va unda 12 ta yangi avlod bazaviy stansiyasilar joylashtirilgan. Shuni ta'kidlash mumkinki, UMi stsenariysi IOO holatiga nisbatan to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud holatida yangi avlod bazaviy stansiyasilar bo‘lish ehtimoli sezilarli darajada past. 12-rasmning o‘ng tomonida klassik va SI ga asoslangan lokalizatsiya uchun gorizontal lokalizatsiya xatosining empirik to‘plangan taqsimot funksiyasi (ECDF) ko‘rsatilgan. Xususan, klassik lokalizatsiya samaradorligi natijalari 3GPP texnik hisobotidan olingan [9]. Har bir stsenariy uchun 5-avlod (5G) lokalizatsiyasi o‘lchov jarayonida ishtirok etuvchi mos yozuvlar signalining turli parametrlari bilan pastga yo‘nalishdagi TDoA ga asoslangan: 2 GHz da 50 MHz polosa kengligi (rasmda "Type I" sifatida ko‘rsatilgan) va 4 GHz da 100 MHz polosa kengligi (rasmda "Type II" sifatida ko‘rsatilgan). Shuni ta'kidlash mumkinki, 90-persentilda SI ga asoslangan lokalizatsiya UMi Type I sozlamasi uchun gorizontal lokalizatsiya aniqligini taxminan 2,5 m ga va UMi Type II sozlamasi uchun taxminan 5 m ga yaxshilaydi. Xuddi shunday samaradorlik yaxshilanishlari IOO stsenariysi uchun ham kuzatilishi mumkin. Shuni ham ta'kidlash mumkinki, stsenariydan qat'i nazar, SI asosan mos yozuvlar signalining polosa kengligi bilan belgilanadigan taqqoslanadigan samaradorlikni ta'minlaydi.



11-rasm. 5G tarmoqlarida ikkita 3GPP standartlashtirilgan stsenariy, ya'ni UMi va IOOni hisobga olgan holda SI-ga asoslangan lokalizatsiya samaradorligi. (a) to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjuddagi yangi avlod bazaviy stansiyasilar soni uchun CDF va (b) gorizontal lokalizatsiya xatosi uchun empirik CDF [18]

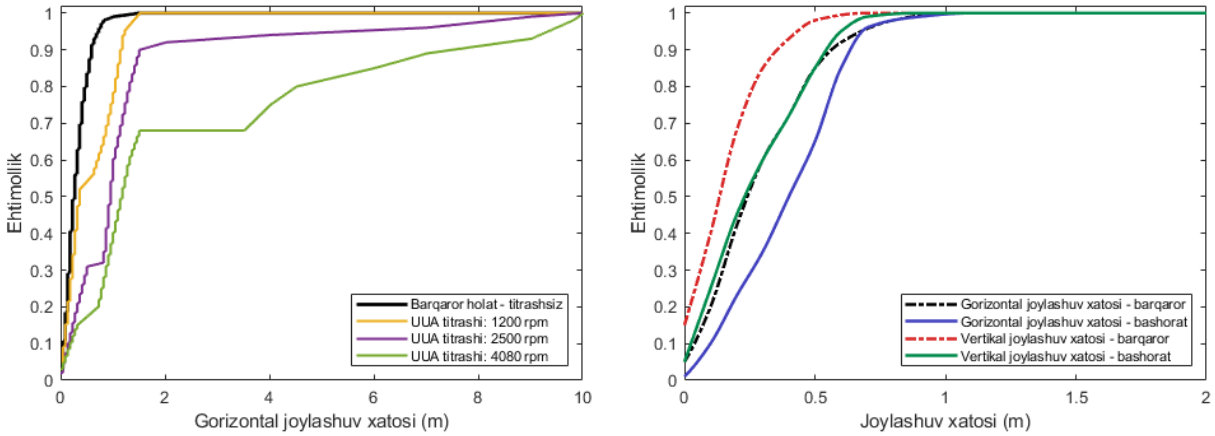
Amaliy buzilishlarni yumshatish uchun AI/ML: Ba’zi yopiq lokalizatsiya stsenariylarida ichki kirish nuqtalarining ishlamay qolishi yoki radio muhitining keskin o‘zgarishi raqamli izni aniqlash usulining samaradorligini pasaytirishi mumkin. Favqulodda vaziyatlarda tashqi manbalar, jumladan uchuvchisiz uchish aparati orqali uzatiladigan signallar yordamida lokalizatsiya imkoniyatini saqlab qolish ko‘rib chiqilgan [19]. AI/ML esa uchuvchisiz uchish aparati harakati, xususan jitter kabi amaliy buzilishlarning lokalizatsiya natijasiga ta’sirini o‘rganish va kompensatsiya qilish uchun ishlatilishi mumkin.

Jitterni kompensatsiya qilish bo‘yicha keltirilgan misolda ma’lumotlarning 80% o‘qitish , 20% esa sinov to‘plamiga ajratilgan va chuqur neyron tarmoq asosida kompensatsiya modeli o‘qitilgan [20]. Ushbu yondashuvning maqsadi uchuvchisiz uchish aparatining beqaror harakati sabab yuzaga keladigan koordinata xatosini kamaytirishdir. Bunda modelning haqiqiy samaradorligini baholash uchun o‘qitish va sinov ma’lumotlarini qat’iy ajratish, xatolikni alohida yo‘nalishlar bo‘yicha hisoblash va boshlang‘ich holat bilan taqqoslash talab etiladi.

Yuqorida tavsiflanganidek, nazorat ostida o‘rganish mexanizmidan ham foydalanish mumkin. Jitter ma'lumotlari uchuvchi uchuvchisiz uchish apparati havo va gaz kelebeği holatlarida

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42

turli rotor tezliklarida eksperimentda to‘plangan [20]. Havo oqimlarining turli tezliklari 12a-rasmning chap tomonida ko‘rsatilganidek, turli darajadagi jitterga olib keladi; jitterning og‘irligi tezlik ortishi bilan ortib bordi. Olingan ma'lumotlar o‘quv (80%) va sinov (20%) to‘plamlariga bo‘lingan. O‘quv bosqichida chuqur neyron tarmoq jitter ma'lumotlaridan barqaror dron pozitsiyasini bashorat qilish uchun kompensatsiya modelini o‘qitish uchun ishlatilgan. Sinov bosqichida olingan bashorat qilingan uchuvchisiz uchish aparati pozitsiyalari xatoni baholash uchun ishlatilgan va joylashuv baholarining aniqligi ikkala yo‘nalishda ham ularning asosiy ko‘rsatkichlari bilan taqqoslanadigan darajada ekanligi kuzatilgan (ya'ni, jitter xatosisiz pozitsiya bahosi). Xususan, 12b-rasmda bashorat qilingan uchuvchisiz uchish apparati pozitsiyalari bilan olingan gorizontal va vertikal joylashuv xatolari asosiy ko‘rsatkichlardan atigi 10 sm farq qilgan holda 95% xizmat ko‘rsatish ishonchliligida mos ravishda 0,75 va 0,55 m ni tashkil qiladi.



(a) (b)

12-rasm. Baholangan uchuvchisiz uchish apparati pozitsiyalari o'rtasidagi taqqoslash. (a) Jitter ma'lumotlari tufayli yuzaga kelgan lokalizatsiya xatosi va (b) NT (neyron tarmoq) kompensatsiyasining ta'siri [20]

Xulosa. 5G tarmoqlarida joylashuvni aniqlash statistik baholash, radioto‘lqinlarni qayta ishlash, geometrik model va ma’lumotlarga asoslangan AI/ML usullarining o‘zaro bog‘langan tizimi sifatida qaralishi kerak. Fisher axborot matritsasi va Kramér–Rao chegarasi lokalizatsiyaning nazariy aniqlik chegaralarini belgilashga, fisher axborot matritsasining ekvivalenti esa pozitsion parametrlar uchun foydali axborotni ajratishga xizmat qiladi. Qurilmaga asoslangan usullarda ToA, TDoA, AoA va ko‘p yo‘lli kanal parametrlari asosiy axborot manbalarini tashkil etadi; to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud bo‘lmagan va outlier o‘lchovlar esa robust baholashni talab qiladi. Joylashuv qurilmasiz aniqlash, nishonlarni aniqlash imkonini bersa, fingerprinting va yumshoq axborotga asoslangan AI/ML usullari murakkab radio muhitlarida qo‘shimcha statistik axborotdan foydalanadi. Maqolada keltirilgan sonli natijalar tegishli adabiyotlarda berilgan aniq stsenariylarga tegishli ekanligi alohida qayd etildi. Kelgusidagi tadqiqotlarda ko‘p sensorli ma’lumotlarni birlashtirish, to‘g‘ridan-to‘g‘ri ko‘rish chizig‘i mavjud bo‘lmagan holatlarini ishonchli aniqlash, real vaqt rejimida hisoblash va 5G/6G tarmoqlarida joylashuv hamda aloqa vazifalarini birgalikda optimallashtirish muhim yo‘nalishlar bo‘lib qoladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. S. M. Kay, Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory. Prentice Hall, 1993.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.42

2. H. Chen, H. Sarieddeen, T. Ballal, H. Wymeersch, M.-S. Alouini, and T. Y. Al-Naffouri, “A tutorial on terahertz-band localization for 6G communication systems,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 24, no. 3, pp. 1780–1815, 2022, doi: 10.1109/COMST.2022.3178209.

3. F. Gustafsson, Statistical Sensor Fusion. Studentlitteratur, 2010.

4. M. S. Arulampalam, S. Maskell, N. Gordon, and T. Clapp, “A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking,” IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 50, no. 2, pp. 174–188, 2002.

5. B. Khaleghi, A. Khamis, F. O. Karray, and S. N. Razavi, “Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art,” Information Fusion, vol. 14, no. 1, pp. 28–44, 2013.

6. F. Gustafsson and F. Gunnarsson, “Mobile positioning using wireless networks: Possibilities and fundamental limitations based on available wireless network measurements,” IEEE Signal Processing Magazine, vol. 22, no. 4, pp. 41–53, 2005.

7. M. Z. Win, Y. Shen, and W. Dai, “A theoretical foundation of network localization and navigation,” Proceedings of the IEEE, vol. 106, no. 7, pp. 1136–1165, 2018.

8. 3GPP, Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz, Technical Report TR 38.901, Release 16, March 2020.

9. 3GPP, Study on NR Positioning Support, Technical Report TR 38.855, Release 16, March 2019.

10. D. Dardari, A. Conti, U. J. Ferner, A. Giorgetti, and M. Z. Win, “Ranging with ultrawide bandwidth signals in multipath environments,” Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 2, pp. 404–426, 2009.

11. S. Bartoletti, Z. Liu, M. Z. Win, and A. Conti, “Device-free localization of multiple targets in cluttered environments,” IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 58, no. 5, pp. 3906–3923, 2022, doi: 10.1109/TAES.2021.3128964.

12. M. Chiani, A. Giorgetti, and E. Paolini, “Sensor radar for object tracking,” Proceedings of the IEEE, vol. 106, no. 6, pp. 1022–1041, 2018.

13. S. Bartoletti, A. Conti, and M. Z. Win, “Device-free counting via wideband signals,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 5, pp. 1163–1174, 2017.

14. F. Morselli, S. Bartoletti, S. Mazuelas, M. Z. Win, and A. Conti, “Crowd-centric counting via unsupervised learning,” in IEEE International Conference on Communications (ICC), Shanghai, China, 2019, pp. 1–6.

15. R. S. Campos and L. Lovisolo, “Fingerprinting location techniques,” John Wiley & Sons, Ltd., 2018, pp. 497–529. [Nashr to‘plami/bob nomi bibliografik bazada qayta tekshirilishi lozim.]

16. Y. Liu, Z. Deng, and L. Yin, “Gradient boost decision tree fingerprint algorithm for Wi-Fi localization,” in China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2018 Proceedings, Springer Singapore, 2018, pp. 501–509.

17. S. Mazuelas, A. Conti, J. C. Allen, and M. Z. Win, “Soft Range Information for Network Localization,” IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 66, no. 12, pp. 3155–3168, 2018, doi: 10.1109/TSP.2018.2795537.

18. A. Conti, F. Morselli, Z. Liu, S. Bartoletti, S. Mazuelas, W. C. Lindsey, and M. Z. Win, “Location Awareness in Beyond 5G Networks,” IEEE Communications Magazine, vol. 59, no. 11, pp. 22–27, 2021, doi: 10.1109/MCOM.221.2100359.

19. O. Kolawole and M. Hunukumbure, “A drone-based 3D localization solution for emergency services,” in IEEE International Conference on Communications (ICC), 2022.

20. E. Kuantama, I. Tarca, S. Dzitac, I. Dzitac, and E. Tarca, “Flight stability analysis of a symmetrically-structured quadcopter based on thrust data logger information,” Symmetry, vol. 10, no. 7, article 291, 2018.