

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-64-37>

УДК 621.396.6

Нестеренко Ігор Костянтинович¹, к. т. н., с. н. с.

<https://orcid.org/0009-0003-9423-8203>

Лось Володимир Петрович¹, науковий співробітник

Соколов Володимир Васильович¹, старший викладач

¹ Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації ім. Героїв Крут, м. Київ, Україна

ПОРІВНЯННЯ ТОЧНОСТІ ПЕЛЕНГАТОРІВ З ЛІНІЙНОЮ ТА КРУГОВОЮ АНТЕННИМИ РЕШІТКАМИ

Нестеренко І. К., Лось В. П., Соколов В. В. Порівняння точності пеленгаторів з лінійною та круговою антенними решітками. Розглянуто особливості застосування сучасних радіопеленгаторів для визначення місцеположення джерел радіовипромінювання та проведено порівняння точності пеленгації системи KrakenSDR з лінійною та круговою антенними решітками. Обґрунтовано актуальність задачі локалізації радіопередавачів в умовах зростання насиченості радіоефіру та необхідності оперативного виявлення джерел випромінювання, особливо під час ведення бойових дій, виконання спеціальних операцій, забезпечення радіоелектронної розвідки, моніторингу спектра та протидії несанкціонованим радіопередавачам. Досліджено вплив геометрії антенної решітки на точність визначення азимуту та проведено порівняльний аналіз характеристик лінійної і кругової антенних решіток. Розглянуто переваги, недоліки та особливості їх практичного застосування залежно від умов експлуатації, робочого діапазону частот і вимог до точності пеленгації. Отримані результати можуть бути використані під час пеленгування джерел випромінювання, проектування та модернізації мобільних і стаціонарних систем радіопеленгації, а також при створенні недорогих комплексів радіомоніторингу та радіоелектронної розвідки на базі SDR-технологій.

Ключові слова: радіопеленгатор, KrakenSDR, алгоритм MUSIC, SDR, антенна решітка, радіомоніторинг.

Nesterenko I., Los V., Sokolov V. Comparison of the accuracy of direction finders with linear and circular antenna arrays. The features of the use of modern radio direction finders to determine the location of radio radiation sources are considered and the accuracy of the KrakenSDR system direction finding with linear and circular antenna arrays is compared. The relevance of the problem of localizing radio transmitters in conditions of increasing saturation of the radio spectrum and the need for prompt detection of radiation sources is substantiated, especially during combat operations, special operations, providing electronic reconnaissance, spectrum monitoring and countering unauthorized radio transmitters. The influence of the geometry of the antenna array on the accuracy of azimuth determination is studied and a comparative analysis of the characteristics of linear and circular antenna arrays is conducted. The advantages, disadvantages and features of their practical application are considered depending on the operating conditions, operating frequency range and requirements for direction finding accuracy. The results obtained can be used in direction finding of radiation sources, design and modernization of mobile and stationary radio direction finding systems, as well as in the creation of inexpensive radio monitoring and electronic reconnaissance complexes based on SDR technologies.

Keywords: radio direction finder, KrakenSDR, MUSIC algorithm, SDR, antenna array, radio monitoring.

Постановка наукової проблеми. У порівнянні з професійними пеленгаторами, які застосовуються у вищих ланках управління, на низовому рівні використовують пеленгатори, які створені на основі сучасних програмно-визначних радіосистем (SDR) та забезпечують значне зниження вартості побудови багатоканальних пеленгаторів без істотного погіршення їх функціональних можливостей. Прикладом такого пеленгатора є пеленгатор на відкритій платформі KrakenSDR, яка завдяки використанню синхронізованих приймальних каналів дозволяє реалізувати високоточне визначення напрямку на джерело сигналу [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Пеленгатори можуть застосовувати антенні системи, які різняться кількістю елементів, геометрією їх розташування, взаємною відстанню та ін. Задача отримання істинного пеленгу (напрямку на джерело випромінювання, Direction Finding, DF) з мінімально можливою погрішністю вирішується вибором типу антенної решітки та визначенням її геометричних параметрів. Сучасні дослідження також демонструють зростання інтересу до методів пеленгації з використанням цифрових антенних решіток [8, 9]. Методам пеленгації джерел випадкових сигналів з надвисокої роздільною здатністю та математичним моделям алгоритмів обробки сигналів від елементів решітки присвячено достатньо публікацій [3, 7]. Публікацій щодо аналізу залежності точності пеленгаторів, в яких реалізований метод надвисокої роздільної здатності, від геометрії розташування елементів антенної системи практично немає.

Для оптимального розташування елементів антенної решітки та визначення потенційно досяжних характеристик потрібно провести моделювання як самої антенної решітки, так і обраного методу та алгоритму пеленгації.

Метою статті є розробка рекомендацій щодо розташування антенних елементів пеленгатора для забезпечення найвищої точності пеленгування на основі моделювання як антенної системи, так і алгоритму обробки сигналів від елементів антени.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

У якості прикладу розглянемо пеленгатор KrakenSDR, який побудовано на основі п'яти взаємно когерентних SDR радіоприймачів. В пеленгаторі використовується один з найбільш відомих алгоритмів надвисокої роздільної здатності, відомий як кореляційна інтерферометрія, яка використовує інформацію про фазу, визначену в антенній решітці, яка розподілена за відомою схемою, що використовується для пеленгації у складній електромагнітній обстановці – за алгоритмом MUSIC (*Multiple Signal Classification*). Знімаючи численні показання пеленгу в різних місцях, визначити місце розташування передавача можна методом тріангуляції. Пеленгатор комплектується п'яттю штирьовими антенами на магнітній основі, які можуть бути розташовані довільно. Склад обладнання пеленгатора наведено на рис. 1 [1].

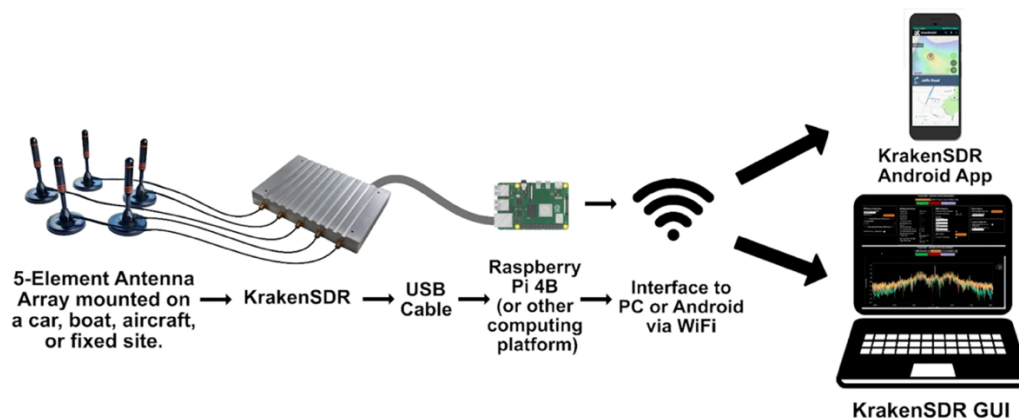


Рис. 1. Підключення елементів пеленгатора KrakenSDR

Точність пеленгації у KrakenSDR сильно залежить від геометрії антенної решітки (АР) і в першу чергу від робочої смуги частот та міжелементного інтервалу (відстані між суміжними елементами у решітці).

На рис. 2 для прикладу наведено залежність параметрів пеленгатора з круговою антенною решіткою від міжелементного інтервалу [1].

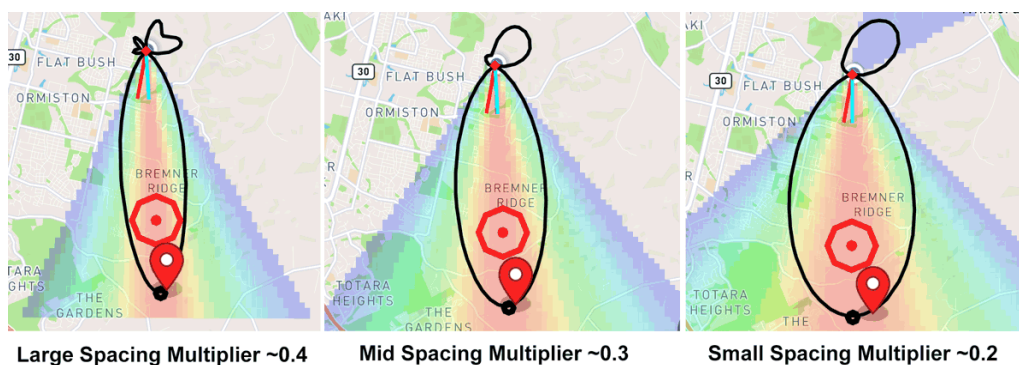


Рис. 2. Залежність роздільної здатності від міжелементного інтервалу

У всіх ситуаціях множник інтервалу d повинен бути меншим за $0,5 \cdot \lambda$, щоб уникнути неоднозначностей (більше одного можливого рішення для пеленгу). В ідеалі також слід тримати множник інтервалу вище приблизно $0,2 \cdot \lambda$ і ближче до $0,5 \cdot \lambda$. Чим більший множник інтервалу, тим більша роздільна здатність пеленгатора. Це означає кращу обробку багатопроменевості. Нижче $0,2 \cdot \lambda$ роздільна здатність стає занадто низькою.

Точність пеленгації сильно залежить також від геометрії антенної решітки. Для лінійної та кругової конфігурацій характеристики відрізняються досить суттєво.

Розглянемо характеристики спрямованості лінійної та кругової антенних решіток в азимутальній площині. Розрахунки виконано з допомогою MathCad.

1. Діаграма направленості (ДН) **лінійної** антенної решітки (ЛАР, Uniform Linear Array, ULA).

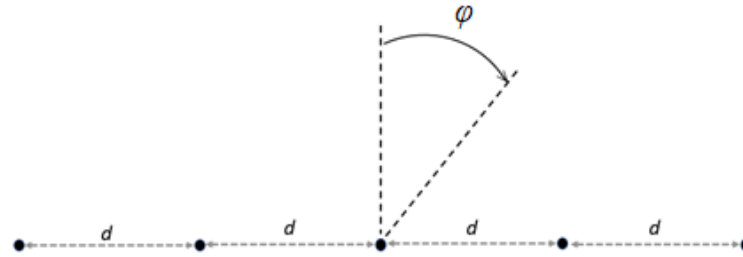


Рис. 3. Лінійна антенна решітка

Для лінійної антенної решітки з N однакових елементів, розташованих із кроком $d=0,5 \cdot \lambda$, множник решітки визначається виразом:

$$f(\varphi) = |\sum_{n=1}^N \exp[-i(n-1)\pi(\sin \varphi - \sin \varphi_{max})]|, \quad (1)$$

де:

- N – кількість антен;
- d – інтервал між сусідніми антенами;
- $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число;
- φ_{max} – кут сканування (напрямок максимуму ДН);
- φ – кут приходу сигналу.

Нормована ДН визначається за формулою $F(\theta) = \frac{f(\varphi)}{f(\varphi)_{max}}$.

На рисунку 4 та 5 наведені результати розрахунку діаграми направленості для 5-елементної лінійної та 5-елементної кругової решіток (при $d = 0,5 \cdot \lambda$).

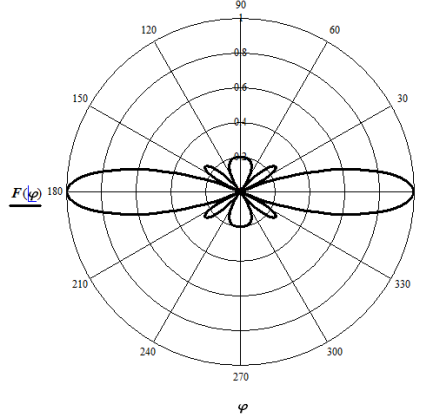


Рис. 4. Діаграма направленості лінійної АР для кута сканування $\varphi_{max} = 0^\circ$

Діаграма направленості має вузьку головну пелюстку та виражені бічні пелюстки. Ширина головної пелюстки становить близько 22° , рівень бічних пелюсток мінус 12 дБ. Наявність задньої пелюстки (дзеркальної відносно головної) приводить до фронтально-тилової неоднозначності при пеленгуванні. При збільшенні кута сканування форма діаграми направленості спотворюється та ширина головної пелюстки збільшується. ДН лінійної АР для кута сканування $32,5$ і 65 градусів наведені на рис. 5.

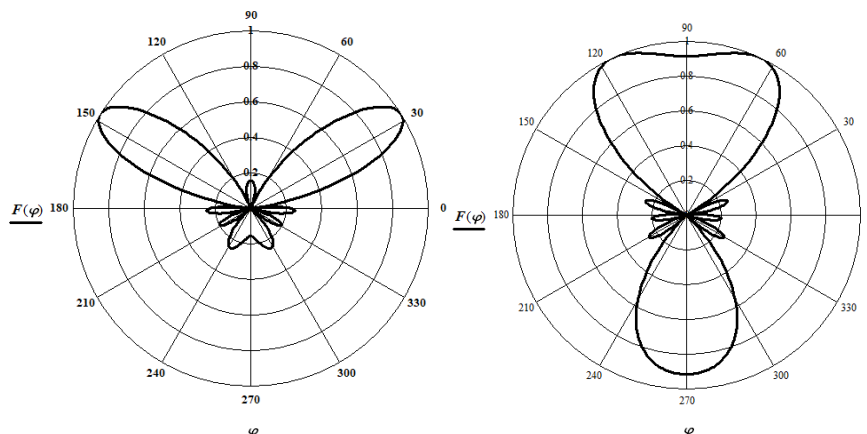
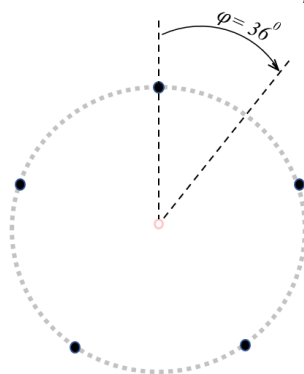


Рис. 5. Діаграма направленості лінійної АР для кута сканування 32,5 і 65 градусів

2. Діаграма спрямованості **кругової** антенної решітки (КАР, Uniform Circular Array, UCA)

Стандартна конфігурація KrakenSDR містить п'ять приймальних антен, рівномірно розташованих по колу. Кути розташування антен становлять $\varphi_n = \{0^\circ, 72^\circ, 144^\circ, 216^\circ, 288^\circ\}$.



де $\circ$ – центр решітки

Рис. 6. Кругова антенна решітка KrakenSDR

Якщо усі елементи однакові, амплітуди однакові; відповідно, діаграма направленості кругової антенної решітки [2]:

$$f(\varphi) = \left| \sum_{n=1}^N \exp[ikR[\cos(\varphi) - (n-1)\alpha] - \cos[\varphi_0 - (n-1)\alpha]] \right|, \quad (2)$$

де

$$R - \text{радіус решітки, } R = \frac{d}{2 \cos(\frac{\alpha}{2})}, \quad \alpha = 2 \frac{\pi}{N}.$$

Форма діаграми направленості кільцевої антенної решітки наведена на рис. 7, ширина головної пелюстки практично не залежить від кута сканування та перевищує 65 градусів, рівень зворотного випромінювання становить біля мінус 6,5 дБ.

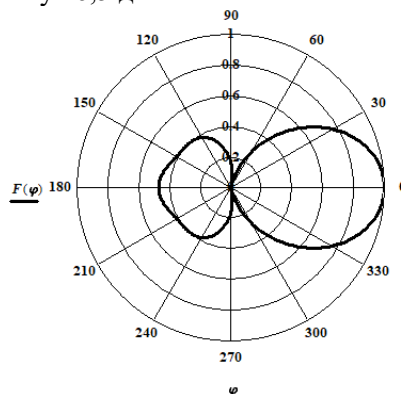


Рис. 7. Діаграма спрямованості кільцевої АР для кута сканування $\varphi = 0$

3. Порівняння діаграм направленості наведено у табл. 1

Розмір апертури $A_{кр}$ кругової антенної решітки у площині, яка перпендикулярна напрямку приходу сигналу, при міжелементній відстані $d = 0,5 \cdot \lambda$, дорівнює її діаметру та становить $A_{кр} = 0,85 \cdot \lambda$ і не залежить від напрямку.

Розмір апертури лінійної антенної решітки $A_{лр}$ залежить від кута між віссю решітки та напрямком приходу сигналу φ як функція $\cos \varphi$. При відстані між суміжними елементами решітки $d = 0,5 \cdot \lambda$ максимальний розмір апертури дорівнює $2 \cdot \lambda$, що у 2,34 рази перевищує розмір апертури кругової антенної решітки. Розміри апертур двох типів антен однакові при $\varphi = 65^\circ$.

Таблиця 1

Лінійна решітка	Кругова решітка
Висока точність уздовж осі решітки	Практично однакова точність у всіх напрямках
Можливі неоднозначності (front-back ambiguity)	Неоднозначність практично відсутня
Простіша конструкція	Складніша конструкція
Найкраще працює в одному секторі	Забезпечує огляд 360°
Менше обчислень	Потребує більшої обчислювальної потужності

Саме тому у сучасних SDR-пеленгаторах (KrakenSDR, KerberosSDR тощо) переважно застосовують **кругову антенну решітку**.

Якщо, наприклад, п'ятиелементну антенну решітку використовувати в амплітудних пеленгаторах за принципом пеленгування по максимальному значенню сигналу, точність пеленгування яких складає близько однієї п'ятої від ширини ДН на рівні половинної потужності $\Delta\alpha \approx 0,2\varphi_0$, похибка пеленгування буде недопустима. Для зменшення похибки потрібно або змінювати принцип пеленгації, збільшувати апертуру пеленгаційної антени і відповідно кількість антенних елементів, або застосовувати один з методів надвисокої розрізняювальної здатності. В пеленгаторі KrakenSDR реалізований метод надвисокої розрізняювальної MUSIC.

Основні фактори, що впливають на точність пеленгації

Для будь-якої решітки точність визначається:

- кількістю антен (у KrakenSDR – до 5 каналів);
- відношенням сигнал/шум (SNR);
- міжелементною відстанню;
- частотою сигналу;
- багатопроменевістю (відбиттями);
- алгоритмом обробки (MUSIC, Bartlett, Capon тощо).

Теоретично похибка оцінки кута приблизно обернено пропорційна:

- SNR;
- ефективній апертурі решітки;
- кількості елементів.

На рис. 8 наведено приклад схеми адаптивної антенної решітки (4 антенних елементи), в якій може бути реалізований алгоритм адаптації або алгоритм надвисокої роздільної здатності для пеленгації.

Фізично в основі методів пеленгації джерел випадкових сигналів з надвисокою роздільною здатністю лежить той самий ефект, що і в адаптивній антенній решітці – когерентна компенсація (придушення) сигналів джерел, що заважають, причому у якості джерел, що заважають для кожного з джерел виступають всі інші, що не збігаються з ним за напрямом. Тому цілком природною виявляється і спільність апарату і математичних методів, що використовуються в адаптивних антенних решітках і нелінійних методах пеленгації з надвисокою роздільною здатністю.

Як видно з рисунка, антенна решітка розглядається як адаптивний фільтр. Власне, знаходження оптимального вектора коефіцієнтів (W_{opt}) і є основним завданням адаптивних антенних решіток з математичної точки зору.

Спочатку невідомо, з яких напрямків приходять сигнали і скільки їх. Саме для вирішення даної суперечності застосовується алгоритм MUSIC – алгоритм оцінки просторових частот з високою роздільною здатністю.

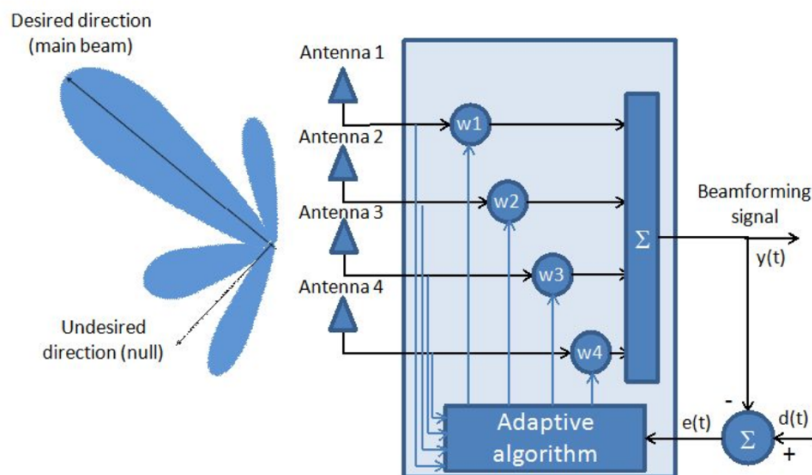


Рис. 8. Адаптивна антенна система.

MUSIC — це високороздільний алгоритм обробки сигналів, який використовується для оцінки параметрів декількох джерел сигналу, наприклад:

- визначення напрямку приходу радіосигналів (DOA, Direction of Arrival);
- спектрального аналізу;
- обробки даних від антенних елементів решітки;
- радіолокації, гідролокації та бездротового зв'язку.

Основна ідея

Алгоритм використовує зворотню матрицю вимірювальних сигналів і розкладає її на:

- сигнальний підпростір — містить інформацію про джерела сигналів;
- шумовий підпростір — містить тільки шум.

Для справжнього напрямку джерела, вектор відклику антени ортогональний до шумового підпростору. На цьому засновано функцію MUSIC:

$$P(\varphi) = \frac{1}{a^H(\varphi)E_n E_n^H a(\varphi)}, \quad (3)$$

де:

- $a(\varphi)$ — вектор відгуку антенної решітки;
- E_n — матриця власних векторів шумового простору;
- H — ермітове транспонування.

Піки функції $P(\varphi)$ відповідають оцінкам напрямів приходу сигналів θ .

Кроки алгоритму

Зібрати дані з масиву датчиків/антен.

- Побудувати зворотню матрицю.
- Виконати власне розкладання (eigenvalue decomposition).
- Виділити сигнальний та шумовий підпростори.
- Обчислити псевдоспектр MUSIC.
- Знайти вершини псевдоспектру.

Переваги

- Дуже висока роздільна здатність.
- Може розділяти близькорозташовані джерела.
- Часто перевершує класичні методи (наприклад, БПФ) за точністю.

Недоліки

- Вимагає знання чи оцінки числа джерел сигналу.
- Чутливий до помилок моделі.
- Обчислювально більш витратний, ніж прості спектральні методи.

Для моделювання алгоритму MUSIC, зазвичай, використовують Python/ MATLAB. Сфера застосування Python значно ширша, ніж у MATLAB.

Порівняння результатів моделювання

Лінійна решітка

Для 5 антен, розташованих в одну лінію:

Переваги

- Найбільша апертура за однакової кількості антен.
- Найкраща кутова роздільна здатність уздовж осі спостереження.
- Простіше калібрування.

Недоліки

- Існує двозначність фронт/тил (180° ambiguity).
- Погіршення точності для сигналів, що приходять уздовж осі решітки.
- Не забезпечує справжнього визначення пеленгу без додаткових методів.

Кругова решітка

Стандартна конфігурація KrakenSDR (5 антен по колу)

Переваги

- Повне покриття 360° .
- Відсутність фронтально-тилової неоднозначності.
- Більш стабільна точність по всьому азимуту.
- Краще підходить для мобільних пеленгаторів.

Недоліки

- Менша ефективна апертура порівняно з довгою лінійною решіткою.
- Теоретично трохи нижча роздільна здатність.
- Вимогливіша до точної геометрії.

Типова точність пеленгації наведена у таблиці 2.

Таблиця 2

SNR	Типова похибка MUSIC	
	Лінійна решітка	Кругова решітка
0 dB	$5^\circ - 15^\circ$	$7^\circ - 20^\circ$
10 dB	$1^\circ - 5^\circ$	$2^\circ - 6^\circ$
20 dB	$0.5^\circ - 2^\circ$	$1^\circ - 3^\circ$
	У відкритій місцевості при хорошому калібруванні часто отримують похибку близько $1^\circ - 3^\circ$	На практиці для сильних сигналів часто отримують $1 - 4^\circ$ по всьому колу

Порівняння параметрів пеленгатора KrakenSDR для різних конфігурацій антенної решітки наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Параметр	Лінійна	Кругова
360° покриття	Ні	Так
Невизначеність Front-back	Так	Ні
Максимальна роздільна здатність	Краща	Трохи гірша
Однорідність точності за напрямком	Гірша	Краща
Мобільний пеленгатор	Незручно	Краща
Пошук передавача	Посередньо	Дуже добре

Вплив багатопроменевості

У міській забудові відбиття часто стають головним джерелом помилки:

- кругова решітка: типово $5 - 15^\circ$;
- лінійна решітка: $3 - 10^\circ$ у сприятливому напрямку, але може різко погіршуватися в окремих секторах, близьких до осі решітки.

В реальних умовах різниця між ними часто менша, ніж передбачає теорія.

Висновки та перспективи подальшого дослідження.

Якщо мета — максимальна точність вимірювання кута в одному секторі, лінійна 5-елементна лінійна решітка, зазвичай, забезпечує найменшу похибку завдяки більшій апертурі.

Якщо мета — радіопеленгація на 360° (пошук джерел, TDOA/DF, мобільні комплекси, моніторинг ефіру), кругова решітка є кращим вибором для KrakenSDR, оскільки усуває неоднозначність напрямку та дає майже однакову точність по всьому азимуту.

Наявність високої апріорної інформації про очікувані напрямки надходження сигналів, що потрібно пеленгувати, дозволяє використовувати лінійну антенну решітку. У разі апріорної невизначеності можливих напрямків надходження сигналів доцільно застосовувати кільцеву антенну решітку.

Вибір варіанта АР залежить також від можливості реалізації, обумовленою наявністю металевої поверхні (як правило, дах автомобіля) потрібних розмірів для розміщення антен.

Список бібліографічного опису

1. *URL: <https://www.krakenrf.com>.
2. Тютюнник В. А., Дуду А. С., Флоров А. Д., Трофимов И. Н. Анализ диаграммы направленности приемопередающей кольцевой антенной решетки с малым уровнем боковых лепестков. Радиоэлектроника, информатика, управління. 2018. № 4, С. 23- 30.
*URL: <https://DOI.10.15588/1607-3274-2018-4-2>.
3. Haykin, Simon, and KJ Ray Liu. Handbook on array processing and sensor networks. 2010. Vol. 63. pp. 102-107.
4. Hayes M. H. Statistical digital signal processing and modeling. John Wiley & Sons. 2009.
5. Haykin, Simon S. Adaptive filter theory. Pearson Education India, 2008. pp. 422-427.
6. Richmond, Christ D. Capon algorithm mean-squared error threshold SNR prediction and probability of resolution. IEEE Transactions on Signal Processing. 2005. 53.8. pp.2748-2764.
7. Gupta S. K. P. MUSIC and improved MUSIC algorithm to estimate direction of arrival. IEEE. 2015.
8. Наритник Т. М., Авдєєнко Г. Л., Якорнов Є. А. Моделювання методів пеленгації джерел радіовипромінювання з використанням антенних решіток. Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології. 2022. № 1. С. 115-152.
*URL: <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2022-01-03-08>.
9. Бруско А. В., Мирончук О. Ю., Олійник М. В. Визначення напрямку на джерело радіовипромінювання за допомогою двоканального SDR приймача. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2024. № 3, С. 132-137.
*URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-174-3-132-137>.

References

1. *URL: <https://www.krakenrf.com>.
2. Tyutyunnyk V. A., Dudu A. S., Florov A. D., Trofimov I. N. Analysis of the directional diagram of the receiving-transmitting ring antenna array with a small level of side lobes. Radio electronics, informatics, management. 2018. No. 4, pp. 23-30.
*URL: <https://DOI.10.15588/1607-3274-2018-4-2>.
3. Haykin, Simon, and KJ Ray Liu. Handbook on array processing and sensor networks. 2010. Vol. 63. pp. 102-107.
4. Hayes M. H. Statistical digital signal processing and modeling. John Wiley & Sons. 2009.
5. Haykin, Simon S. Adaptive filter theory. Pearson Education India, 2008. pp. 422-427.
6. Richmond, Christ D. Capon algorithm mean-squared error threshold SNR prediction and probability of resolution. IEEE Transactions on Signal Processing. 2005. 53.8. pp.2748-2764.
7. Gupta S. K. P. MUSIC and improved MUSIC algorithm to estimate direction of arrival. IEEE. 2015.
8. Narytnik T. M., Avdeenko G. L., Yakornov E. A. Modeling of direction finding methods for radio radiation sources using antenna arrays. Infocommunication and computer technologies. 2022. No. 1. P. 115-152.
*URL: <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2022-01-03-08>.
9. Brusko A. V., Myronchuk O. Yu., Oliynyk M. V. Determining the direction to the source of radio radiation using a two-channel SDR receiver. Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute. 2024. No. 3, pp. 132-137.
*URL: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-174-3-132-137>.

Історія статті:

Отримано: 15.07.2026 Доопрацьовано: 19.08.2026 Прийнято до друку: 23.09.2026 Опубліковано: 29.09.2026