

В.А. БУЛАГА

## ДОСЛІДЖЕННЯ КУТОВОГО РОЗПОДІЛУ ПОМИЛОК ПРИ РІЗНИХ ШВИДКОСТЯХ ПЕРЕДАЧІ В ДЕКАМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ

### Вступ

Відомо, що основними факторами, що спричиняють зменшення пропускної спроможності й надійності каналів зв'язку в декаметровому діапазоні є багатопроблемність і рівень завад від передавачів, що працюють за близькими частотами [1 – 4]. Один із способів боротьби з такими негативними явищами – це застосування в системах зв'язку фазованих антенних решіток (ФАР), які забезпечують поділ променів при прийомі. Водночас реалізація таких складних антенних систем як ФАР супроводжується значними економічними витратами, так як вони є високовартісними. В результаті виникає завдання в оцінці ефективності такої антенної системи за інформаційним критерієм "коефіцієнти помилок – кут місця". Представлені у літературі дослідження повною мірою не розкривають задачу, що розглядається. В [5] розглянуто проблеми формування та обробки радіолокаційної інформації в системах радіобачення авіаційно-наземного базування зі змінною відносною просторовою конфігурацією при дистанційному зондуванні радіопомітних об'єктів та об'єктів спостереження з радіопоглинаючою поверхнею. В [6, 7] проводиться аналіз методів визначення напрямку приходу сигналів в задачах просторово-часового доступу на основі методів радіопеленгації в системах мобільного зв'язку, наведено процедуру оцінки вектора розподілу поля, значення якого може бути обчислено спільно з оцінкою вектора вагових коефіцієнтів адаптивної антенної решітки. В [8] зроблено аналіз розвитку технології міліметрових і субміліметрових хвиль. В роботі [9] розглянуто метод оцінювання завадозахищеності радіообміну в мережах зв'язку в умовах реальних завад, який використовує імітаційне моделювання із визначенням коефіцієнтів подавлення радіозасобів залежно від просторового розташування постановників завад і орієнтації спрямованих антен засобів захисту своїх радіозасобів. В роботі [10] аналізуються методи визначення напрямку приходу сигналів в задачах просторово-часового доступу на основі методів радіопеленгації.

Мета роботи – дослідження кутового розподілу помилок при різних швидкостях передачі в короткохвильовому діапазоні при використанні фазованих антенних решіток за інформаційним критерієм "коефіцієнти помилок – кут місця".

### Аналіз кутового розподілу рівнів випадкових радіозавад

Для дослідження використовувалися експериментальні дані кутомісних розподілів числа помилок, які були отримані на радіотрасі ідеального напрямку протяжністю 600 км. Структурна схема вимірювання кутового розподілу рівнів випадкових радіозавад (рис. 1) містить: 1 – атенюатор; 2 – приймач Р-250-2М; 3 – детектор огинаючої; 4 – пристрій запису інформації; 5 – комутатор; 6 – АЦП (аналоговий цифровий перетворювач); 7 – ПК (персональний комп'ютер).

У передавальному пункті використовувався передавач "В'яз-М2", який працює на антену ВГДШ (вібратор горизонтальний діапазонний шунтовий). Короткохвильовий передавач В'яз-М2 призначений для роботи на радіотелефонних лініях зв'язку. Управління передавачем здійснювалося частотно-маніпульованими сигналами, які передавалися на вхід підсилювача низької частоти з швидкостями 50, 200, 600 і 1200 Бод від приладу ВО-2.

Для правильної оцінки коефіцієнта помилок під певними кутами фазування прийом відбувався одночасно на дві антени А1 і А2 з різними діаграмами направленості. В якості антени А1 використовувалося шість секцій ФАР (плече північ-південь) радіотелескопа УТР-2, А2 – одна секція.

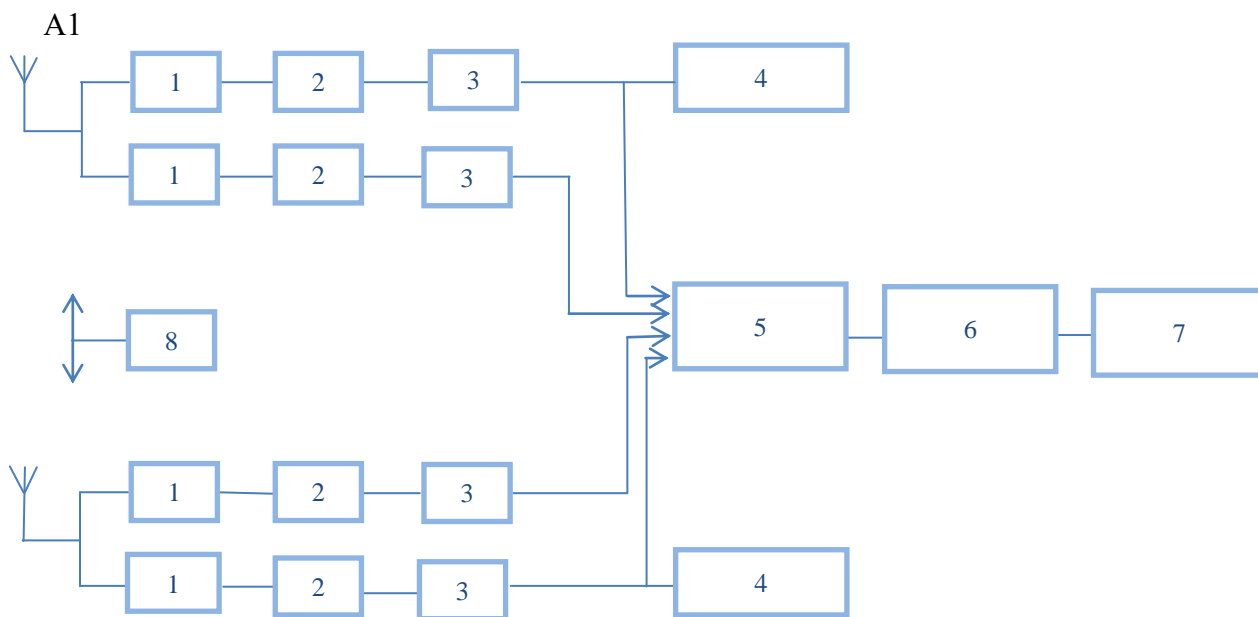


Рис. 1. Структурна схема вимірювання кутового розподілу рівнів випадкових радіозавад

Вибір антен такого виду був зумовлений наступними міркуваннями. Відомо, що порівняно невелика зміна висоти відображення, що діє, на трасі може призводити до помітних флуктуацій кутів виходу і приходу. В результаті у пункті прийому буде спостерігатися сектор кутів, в межах якого щільність потоку енергії прийнятого поля співмірна в напрямку середнього кута. Як показують дослідження, ширина сектору кутів приходу може становити одиниці або десятки градусів. У першому випадку спостерігається відбиття близьке до дзеркального, у другому – дзеркально розсіяне. Співвідношення між дзеркальним і розсіяним компонентами визначає статистичну структуру сигналу, від якої залежить завадозахищеність каналу. Тому для об'єктивної оцінки завадозахищеності каналу зв'язку і пояснення механізму розподілу радіохвиль необхідно проводити синхронні виміри на дві антени, одна з яких мала ширину діаграми одиниці градусів, а інша – десятки градусів. Залежність ширини діаграми для антени A1 та A2 на рівні 0,707 (рис. 2).

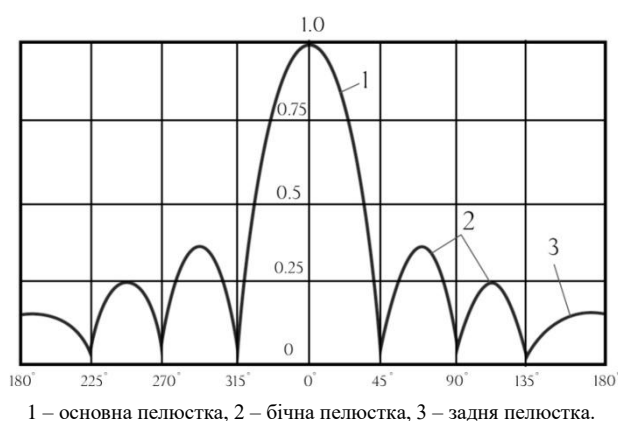


Рис. 2. Залежність ширини діаграми для антени A1 та A2 на рівні 0,707

Крок по кутку місця було обрано п'ять градусів. Такий крок забезпечує взаємне перекриття діаграми направленості під різними кутами фазування. При цьому можлива величина зміни рівня сигналу через рівномірне коливання кутів приходу щодо максимуму діаграми під певними кутами спостереження не перевищує 3 – 6 дБ, що відповідає допустимим змінам рівня приладу ВО-2, при якому помилки ще не фіксуються. Перед початком кожного сеансу

спостереження необхідно проводити калібрування вимірювального комплексу сигналами з виходу генератора Г4-18А на частоті випромінювання передавального пункту. Модуляція генератора Г4-18А здійснюється частотно-маніпульованими посилками від приладу ВО-2. Метою калібрування є вирівнювання підсилення трактів антен А1, А2 і виставлення такого підсилення за проміжною частотою приймача Р-250-2М, коли рівень сигналу на виході приладу ВО-2 відповідає номінальному.

При проведенні сеансу спостереження, окрім вимірювання коефіцієнта помилок, паралельно проводився запис огинаючої сигналу, що приймається. З цією метою сигнал з виходу підсилювача проміжної частоти приймача Р-250-2М подавався на детектор огинаючої. При цьому постійна часу детектора обирається рівною одній секунді. Така постійна часу дозволяє не враховувати вплив виду модуляції та, в той же час, реєструвати зміну огинаючого сигналу під впливом як швидких, так і повільних замирань. За реалізаціями тривалістю близько двох хвилин (інтервал стаціонарності огинаючої) для двох антен та певних кутів фазування обчислювалися математичне очікування, дисперсія, середнє квадратичне відхилення, коефіцієнт кореляції. В якості приклада на рис. 3 представлено зміни середнього значення сигналу по відношенню до рівня сигналу при калібруванні коефіцієнта помилки в залежності від кута фазування для одного з сеансів спостереження (кружечки – значення  $\bar{x}_{\text{дБ}}(\Theta^\circ)$  і  $K_{\text{ном}}(\Theta^\circ)$  відповідають одній секції ФАР; трикутники – шести секціям).

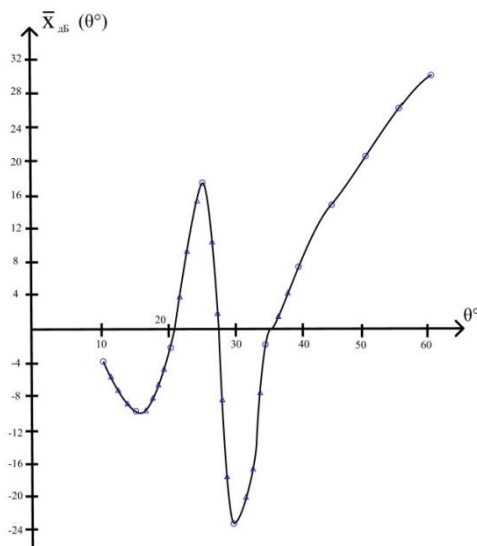


Рис. 3 Мінливість відносного середнього рівня сигналу та коефіцієнта помилок від кута місця

Рис. 3 ілюструє ступінь мінливості відносного середнього рівня сигналу та коефіцієнта помилок від кута місця. При цьому хоч і спостерігається взаємозв'язок між зміною  $\bar{x}_{\text{дБ}}(\Theta^\circ)$  і  $K_{\text{ном}}(\Theta^\circ)$ , в той же час є невідповідність. Так, більш вищому середньому рівню сигналу, прийнятого антеною А2, відповідає високе значення коефіцієнта помилок. Цей факт пояснюється тим, що хоч через слабку спрямованість антени А2 рівень сигналу великий, але через багатопроменеве поширення якість зв'язку падає. Отже, представлені графіки підтверджують відомий висновок про те, що рівень радіосигналу не може бути критерієм якості зв'язку. З цих же графіків випливає, що за рахунок просторової селекції строго спрямована антена А2, навіть в умовах прийому розсіяних компонент поля, дозволяє значно підвищити надійність зв'язку.

Так, під кутом фазування 25 і 30 градусів коефіцієнт помилки дорівнює нулю для антени А1, а для антени А2 – відповідно  $10^{-2}$  і  $10^{-3}$  при приблизно однакових середніх рівнях. Очевидно такі кути приходу для дальності 600 км відповідають відбиттю від області Е.

В результаті відношення робочої частоти до максимально застосованої частоти в області Е (МЗЧЕ) виявилось близьким до одиниці ( $f_p/f_{MЗЧЕ}=0,97$ ), а при такому значенні відношення, як відомо, поле в пункті прийому має в основному розсіяну структуру. Кут приходу 50 градусів, при якому коефіцієнт помилки як для антени А1 так і А2 виявляється рівним нулю, відповідає відбиттю від області F. У цьому випадку відношення робочої частоти до МЗЧФ склало  $f_p/f_{MЗЧФ}=0,85$ , і в пункті прийому переважає дзеркально відбита складова одного променя.

На рис. 4 наведено кореляційні функції огинаючої сигналів двох типів антен (трикутника ФАР із шести секцій, коло – одної секції) різних кутів фазування і того ж вибіркового сеансу спостереження. Шаг  $\Delta t=12$  с. Як видно з рис. 4, для більшості кутів фазування кореляційна функція спадаюча і є осцилюючою. При цьому ступінь осциляції виявляється різним, а при кутах фазування 30 і 50 градусів вони мінімальні або практично відсутні. Найбільш яскраво коливальний характер кореляційної функції проявляється (незалежно від типу антен) під кутами приходу, що не є оптимальними для даної дифузної багатопроменевості.

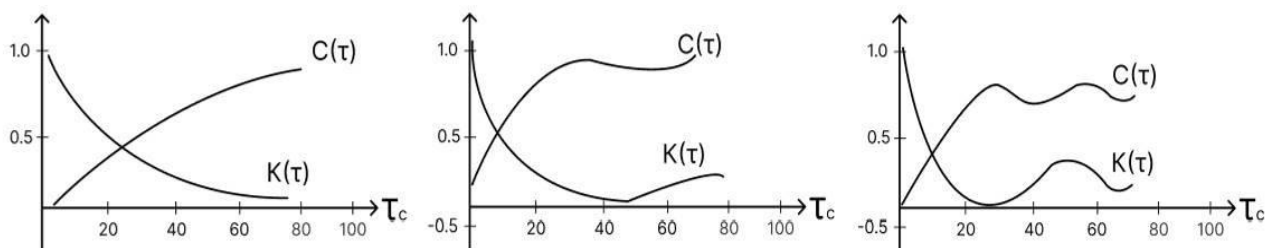


Рис. 4. Усереднені структурні та кореляційні функції

При кутах фазування 30 і 50 градусів коефіцієнт кореляції максимальний і досягає значень 0,65 і 0,85 відповідно; під іншими кутами фазування коефіцієнт кореляції має значення від 0,1 і 0,3. На підставі цього в першому випадку можна стверджувати, що сигнали мають однакову структуру і є залежними, у другому – різну і будуть незалежними. Цей результат є незалежним аргументом на користь оцінки ефективності ФАР за критерієм «коефіцієнт помилки – кут місця», а не за амплітудними значеннями прийнятого сигналу.

Оскільки значення коефіцієнта помилок від кута місця, виміряні в окремі дні, через нерегулярні зміни параметрів іоносфери виявляються нехарактерними. В результаті всього вище сказаного можна стверджувати наступне:

- коефіцієнт помилок має явну залежність від кута фазування. Для ненаправленої антени (поодинокий вібратор) коефіцієнт помилок залишається практично постійним і рівень помилок досить значний;

- фазована антенна решітка з шести секцій за інших рівних умов має коефіцієнт помилок менше, ніж одна секція. Виняток становлять лише ті кути фазування, які є оптимальними для даної траси за умовами поширення. Цей результат пояснюється в першу чергу вищими вибічковими здібностями ФАР з шести секцій або числом променів, що потрапляють у діаграму спрямованості, так як характер багатопроменевості в першу чергу впливає на величину коефіцієнта помилок;

- слабку відмінність у величині коефіцієнта помилок під різними кутами фазування та різних швидкостях передачі можна пояснити наявністю у складі вимірювального комплексу модемів і видом модуляції (АМ з двома бічними смугами);

- кути приходу 30 і 50 градусів є оптимальними за мінімальним коефіцієнтом помилок, залишаючись постійними для даного дня спостереження з 15.00 до 20.00. Такий результат здається дещо несподіваним, тому що добре відомо, що на такому інтервалі, а тим більше в перехідні години доби, коли іоносферні умови змінюються суттєво, і як наслідок, разом з діючими висотами відображення змінюються кути випромінювання та кути приходу. Очевидно, така стійкість кутів приходу 30 і 50 градусів пояснюється високою просторовою

вибірковістю ФАР із шести секцій, яка навіть у важких умовах (розсіяне поле, великий рівень загасання) дозволяє вести прийом з високою надійністю.

### **Висновки**

Отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

- проведені дослідження повною мірою підтверджують можливість використання приладів виявлення похибок при випробуванні надійності каналів зв'язку декаметрового діапазону;
- застосування керованих фазованих антенних решіток на приймальній стороні дозволяє вирішувати комплекс траєкторних завдань, а також дати оцінку ефективності систем зв'язку, що використовують на прийомі розподіл променів.

### **Список літератури:**

1. Лінії радіозв'язку та антенні пристрої : навч. посіб. / М.Д. Ільїнов, Т.Г. Гурський, І.В. Борисов, К.М. Гриценко. Київ : ВІТІ, 2018. 250 с.
2. Бондаренко І.М. Системи радіозв'язку. Кн.2, ч.1. Радіолінії зв'язку : навч. посіб. Харків : ХІ ВПС, 2003. 162 с.
3. Васильєв В. М. Радіонавігаційні системи : підручник. Київ : Політехніка, 2023. 338 с.
4. Огороднійчук М. Д., Чайка Ю. Д., Оксіюк О. Г. Комплекси і засоби військових телекомунікаційних мереж : навч. посіб. ; за ред. проф. М. Д. Огороднійчука. Київ : НУОУ, 2010. 384 с.
5. Толюпа С.В., Дружинін В. А., Наконечний В.С., Цьопа Н.В., Батрак Є.О. Методи та алгоритми обробки радіолокаційної інформації у багатопозиційних системах зі змінною просторовою конфігурацією. Київ : Логос, 2014. 230 с.
6. Alsaleem N., Moskalets M. and Teplytska S. The analysis of methods for determining direction of arrival of signals in problems of space-time access // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2016. Vol. 4, no. 982, p. 36. doi:10.15587/1729-4061.2016.75716.
7. Lima A. G. M. and Menezes L. R. A. X. Smart Antennas as an Approach to Instantaneous Air Interface with Software-Defined Radios // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2007. Vol. 49, no. 3, pp. 198–208. doi: 10.1109/MAP.2007.4293975.
8. Wiltse J. C. History of Millimeter and Submillimeter Waves // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1984. Vol. 32, no. 9, pp. 1118–1127. doi: 10.1109/TMTT.1984.1132823.
9. Іохов О. Ю. Метод оцінювання завадозахищеності радіообміну в мережах зв'язку угруповань військ (сил) // Системи озброєння і військова техніка. 2017. № 4. С. 11–16.
10. Alsaleem N. Y., Moskalets M., and Teplytska S. The analysis of methods for determining direction of arrival of signals in problems of space-time access // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 4, no. 9(82), p. 36. doi:10.15587/1729-4061.2016.75716.

*Надійшла до редколегії 20.02.2024*

### *Відомості про автора:*

**Булага Вікторія Анатоліївна** – Харківський національний університет радіоелектроніки, асистент кафедри комп'ютерної радіоінженерії та систем технічного захисту інформації, Україна; e-mail: [viktoria.bulaga@nure.ua](mailto:viktoria.bulaga@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9655-6684>