

В. М. Почерняєв<sup>1</sup>, М. С. Магомедова<sup>2</sup>, Н. М. Сивкова<sup>1</sup>, О. В. Шефер<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Національна академія Служби безпеки України, Київ, Україна

<sup>2</sup> Київський фаховий коледж зв'язку, Київ, Україна

<sup>3</sup> Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Україна

## КУТОВИЙ РОЗНЕСЕНИЙ ПРИЙОМ НА ЛІНІЯХ ТРОПОСФЕРНОГО ТА ІОНОСФЕРНОГО ЗВ'ЯЗКУ

**Анотація.** В роботі оцінено ефективність кутового рознесення сигналів на тропосферних та іоносферних лініях через визначення оптимального кута рознесення та енергетичного виграшу від кутового рознесення. Записано залежність потужності на вході приймача від азимутального кута при азимутальному кутовому рознесенні. Отримано коефіцієнт кореляції огинаючої сигналу при кутовому рознесенні по азимуту. Знайдено енергетичний виграш при кутовому рознесенні при орієнтації діаграми спрямованості вздовж напрямку радіохвиль на трасі. Надано наближену формулу для ймовірності помилки при четвертному прийомі. Представлено формулу енергетичного виграшу при переході від подвійного просторово-рознесеного прийому до четвертного прийому з кутовим рознесенням. Знайдено максимальний енергетичний виграш при оптимальному куті в порівнянні з подвійним просторово-рознесеним прийомом. Оцінено оптимальні кути рознесення при різних діаграмах спрямованості антен.

**Ключові слова:** кутовий рознесений прийом, просторово-рознесений прийом, тропосферний зв'язок, іоносферний зв'язок, коефіцієнт кореляції, енергетичний виграш.

### Вступ

Завмирання на лініях тропосферного та іоносферного зв'язку впливають на ймовірність помилки при прийомі сигналів [1]. Одним із способів отримання некорельованих завмирань при рознесеному прийомі на радіолініях з використанням іоносферного розсіювання метрових хвиль та тропосферного розсіювання сантиметрових хвиль може бути кутове рознесення діаграм спрямованості приймальної антени в горизонтальній площині.

Кутове рознесення не є повноцінною заміною просторового рознесення антен, оскільки при великих кутах рознесення, необхідних для отримання некорельованих завмирань, зменшується абсолютний рівень розсіяного сигналу. Видається необхідним визначити оптимальний кут рознесення, при якому

кутове рознесення забезпечує максимальний виграш по відношенню до одинарного прийому, а також оцінити ефективність кутового рознесення в порівнянні з просторово-рознесеним прийомом.

За наявності двох антен, рознесених у просторі, кутове рознесення можна здійснити на кожній з них і, в результаті, отримати четвертний прийом (подвійний просторово-рознесений прийом у поєднанні з кутовим рознесенням прийомом). Такий прийом при використанні кутового рознесення має перевагу в порівнянні з подвійним просторово-рознесеним прийомом, але поступається за ефективністю четвертному просторово-рознесеному прийому.

При кутовому рознесеному прийомі кожна з діаграм антени «вирізає» у просторі свій обсяг перевипромінювання (рис. 1), де 1, 2, 3, 4 – об'єми перевипромінювання.

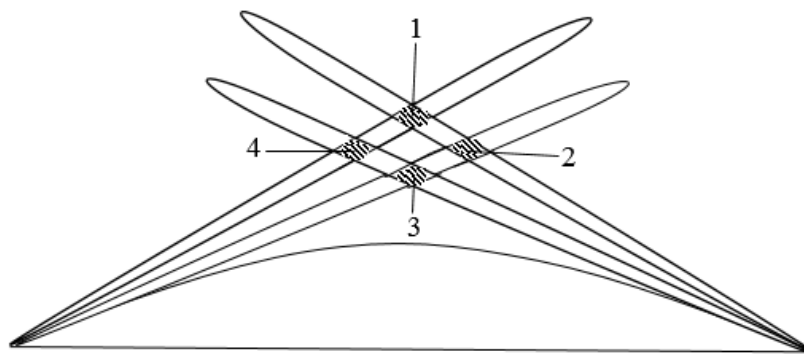


Рис. 1. Обсяги перевипромінювання, які відповідають двухпроменевому кутовому рознесенню сигналів

Якщо рознесення між діаграмами спрямованості досить великий, ці обсяги виявляються ізольованими один від одного. Взаємне розташування та вид неоднорідностей діелектричної проникності повітря в ізольованих обсягах будуть різними. Тому сигнали можуть бути достатньо некорельованими і кутовий рознесений прийом буде ефективним за умови, що середнє значення амплітуд цих сигналів не будуть сильно відрізнятися. Інакше ефективність рознесеного прийому різко

знижується. Остання умова накладає обмеження на величину кутового рознесення. Справа в тому, що рівень сигналу при дальньому тропосферному розповсюдженню радіохвиль залежить від спрямованості прийому. У головному напрямку спостерігається максимум сигналу і при відхиленні від головного напрямку рівень сигналу різко падає. Це призводить до того, що кутовий рознесений прийом виявляється ефективним лише за використанням гостронаправлених антен та є доціль-

ним для впровадження в комбінованих телекомунікаційних системах, наприклад, в мобільних цифрових тропосферно-іоносферних та мобільних цифрових тропосферно-радіорелейних станціях [2-6].

**Аналіз літературних джерел.** Техніка рознесеного прийому широко використовується у радіозв'язку. Найбільшого поширення набув просторово-рознесений прийом, який застосовується в системах МІМО [7, 8], під час передачі сигналів OFDM [9], у системах міліметрового діапазону хвиль [10], у системах зв'язку різного призначення [11–13]. Кутовий рознесений прийом використовується в системах МІМО [14], у сенсорних мережах зв'язку [15], на високошвидкісних лініях зв'язку [16–18]. Зазначимо, що поляризаційне рознесення сигналів використовується як у мережах радіозв'язку [19], так і у радіолокації [20].

**Мета роботи** – оцінити ефективність кутового рознесення сигналів на тропосферних та іоносферних лініях через визначення оптимального кута рознесення та енергетичного вирашу від кутового рознесення.

### Основна частина

При азимутальному кутовому рознесенні залежність потужності на вході приймача  $P_{\text{прм}}$  від азимутального кута  $\beta$  можна записати у вигляді:

$$P_{\text{прм}} = A(\beta)G_{\text{прд}}G_{\text{прм}}, \quad (1)$$

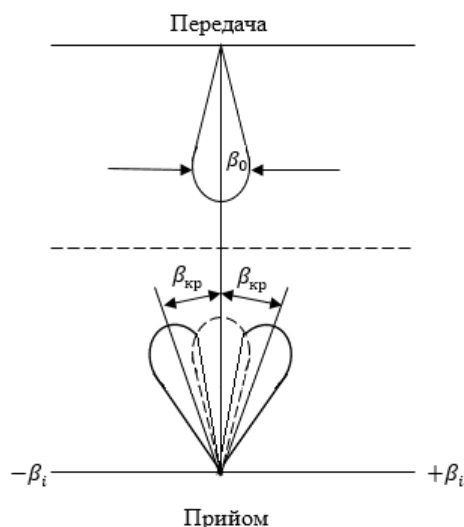
де  $A(\beta)$  – множник, що характеризує спрямовані властивості розсіювального середовища;  $G_{\text{прд}}$ ,  $G_{\text{прм}}$  – коефіцієнти спрямованої дії передавальної та приймальної антен відповідно.

Формули для визначення величин, що входять до (1) наступні:

$$A(\beta) = e^{-\beta^2}, \quad (2)$$

$$G_{\text{прд}} = G_{\text{прм}} = e^{-\alpha^2\beta^2}. \quad (3)$$

На практиці, найчастіше, має місце випадок, коли обидві діаграми спрямованості приймальної антени зрушені симетрично, щодо напрямку поширення радіохвиль на трасі, як показано на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема розташування передавальної та приймальної діаграм спрямованості при кутовому рознесенні сигналів

Тоді, коефіцієнт  $\alpha$  у формулі (1) має вигляд:

$$\alpha^2 = e/(\beta_0)^2, \quad (4)$$

де  $\beta_0$  – ширина діаграми спрямованості у горизонтальній площині.

Коефіцієнт кореляції миттєвих значень напруги сигналу при кутовому рознесенні відповідно до роботи [21] може бути записаний таким чином:

$$r(\beta_{\text{кр}}) = \exp[-\beta_{\text{кр}}\alpha^2(1 - \alpha^2/\rho^2)], \quad (5)$$

де величина  $\rho^2 = 2\alpha^2 + 1$ .

Будемо вважати, що огинаюча сигналу на лініях тропосферного та іоносферного зв'язку розподілена за законом Релея і коефіцієнт кореляції огинаючого сигналу може бути представлений у вигляді:

$$R(\beta_{\text{кр}}) \approx [r(\beta_{\text{кр}})]^2. \quad (6)$$

З урахуванням (4), (5), (6) отримаємо коефіцієнт кореляції огинаючої сигналу при кутовому рознесенні по азимуту в наступному явному вигляді:

$$R(\beta_{\text{кр}}) = \exp\left\{-\beta_{\text{кр}}^2 \frac{e^2}{(2\beta)^2} \left[\frac{1 + \frac{e}{(2\beta)^2}}{1 + 2\frac{e}{(2\beta)^2}}\right]\right\}. \quad (7)$$

Формула (7) показує, що кореляція визначається не тільки кутовим рознесенням, але і відношенням ширини діаграми спрямованості антен до ширини кутового енергетичного спектру розсіяних тропосферою хвиль. Слід зазначити, що з виведення формул не враховувалася ширина діаграми спрямованості антени, що передає. Однак відомо [21], що при збільшенні розміру розкриття антени, що передає, звужується кутовий енергетичний спектр. Якщо це взяти до уваги, то у формулі (7) величину  $\frac{1}{\rho^2}$  слід замінити на величину

$$\frac{1}{\rho^2} + \frac{1}{\beta_{\text{прд}}^2},$$

де  $\beta_{\text{прд}}$  – ширина діаграми спрямованості передавальної антени.

Якщо взяти відношення потужності сигналу  $\sigma$  при кутовому рознесенні сигналу при  $\beta_{\text{кр}} = 0$ , то величина  $\sigma$  збігається з коефіцієнтом кореляції миттєвих значень сигналу:

$$\delta = \frac{P_{\text{кр}}}{P_0} = \exp[-\beta_{\text{кр}}^2\alpha^2(1 - \alpha^2/\rho^2)]. \quad (8)$$

Цього вимагає і теорія дальнього тропосферного розповсюдження радіохвиль.

Для визначення енергетичного вирашу при кутовому рознесенні необхідно знати ймовірність помилки від відношення сигнал/шум при одинарному прийомі та прийомі з кутовим рознесенням.

Відповідно до [22] при одинарному прийомі ймовірність помилки наступна:

$$P_{\text{пом}} \approx 1/h_0^2, \quad (9)$$

де  $h_0$  – середнє значення відношення потужності сигналу до потужності шуму.

Вираз для ймовірності помилки для подвійного некогерентного прийому наближено визначається наступним чином:

$$P_{\text{2пом}} \approx 4/h_0^2(1 - R). \quad (10)$$

Енергетичний виграш при подвійному прийомі в порівнянні з одинарним прийомом можна отримати, використовуючи формули (9), (10):

$$h_1^2/h_2^2 = \frac{1}{2} \sqrt{(1-R)/P_{\text{пом}}}, \quad (11)$$

де  $h_1, h_2$  – відношення сигнал/шум при одинарному та подвійному прийомі відповідно. Енергетичний виграш при кутовому рознесенні при орієнтації діаграми спрямованості вздовж напрямку розповсюдження радіохвиль на трасі знаходимо з урахуванням (8):

$$\Delta h_{2-1}^2 = \frac{h_2^2}{h_1^2} \delta. \quad (12)$$

Враховуючи (5), (6), (8) отримаємо:

$$\Delta h_{2-1}^2 = \frac{\sqrt{\exp[-2\beta_{\text{кр}}^2 \alpha^2 (1 - \frac{\alpha^2}{\rho^2})] [1 - \exp[-2\beta_{\text{кр}}^2 \alpha^2 (1 - \frac{\alpha^2}{\rho^2})]]}}{2\sqrt{P_{\text{пом}}}}. \quad (13)$$

Величина оптимального кута рознесення при якому має місце максимальний енергетичний виграш:

$$\beta_{\text{opt}} = \left[ \ln 2 / (2\alpha^2 (1 - \frac{1}{\rho^2})) \right]^{1/2}. \quad (14)$$

Підставляючи в (13) вираз (14) знаходимо максимальний енергетичний виграш при  $\beta_{\text{opt}}$ :

$$\Delta h_{\text{max}}^2 \approx 0.25 \sqrt{P_{\text{пом}}}. \quad (15)$$

На цифрових тропосферних станціях [23] можуть використовуватися дві просторово-рознесені антени і на кожній з них здійснювати кутове рознесення. Відповідно до роботи [22] наближена формула для ймовірності помилки при четвертому прийомі така:

$$P_{4\text{пом}} \approx \frac{8\pi e^2}{h_0^4 (1-R)^2}. \quad (16)$$

Енергетичний виграш при переході від подвійного просторово-рознесення прийому до четвертого прийому з кутовим рознесенням з урахуванням (10), (16) можна представити наступною формулою:

$$\Delta h_{4-2}^2 = \frac{\sqrt{\exp[-2\beta_{\text{кр}}^2 \alpha^2 (1 - \frac{\alpha^2}{\rho^2})] [1 - \exp[-2\beta_{\text{кр}}^2 \alpha^2 (1 - \frac{\alpha^2}{\rho^2})]]}}{\sqrt[4]{12P_{\text{пом}}}}. \quad (17)$$

Використовуючи формули (14), (17) знаходимо максимальний енергетичний виграш при  $\beta_{\text{opt}}$  в порівнянні з подвійним просторово-рознесенням прийомом:

$$\Delta h_{4-2\text{max}} \approx 0.25 / \sqrt[4]{P_{\text{пом}}}. \quad (18)$$

Оцінимо попередньо оптимальні кути рознесення  $\rho_{\text{opt}}$  при різних діаграмах передавальної та приймальної антени в табл. 1.

Таблиця 1 – Оптимальні кути рознесення при наведених діаграмах спрямованості

$\beta_0$	$\beta_{\text{opt}}$
$1^0$	$51'$
$10^0$	$4^0 44'$
$12^0$	$5^0 22'$

З табл.1 видно, що при використанні відносно вузькоспрямованих антен величина оптимального кута рознесення  $\beta_{\text{opt}}$  відповідає приблизно половині ширини діаграми спрямованості приймальної антени для іоносферних ліній і незначно менше для тропосферних ліній.

## Висновки

При оптимальному куті рознесення (для заданої ширини діаграми спрямованості антени) ефективність подвійного та четвертого прийому не залежить від діаграм спрямованості антен, що використовуються.

При куті  $\beta_{\text{opt}}$  подвійний прийом при кутовому рознесенні в порівнянні з одинарним прийомом дає енергетичний виграш порядку 9 дБ при  $P_{\text{пом}} = 10^{-3}$  та 13 дБ при  $P_{\text{пом}} = 10^{-4}$ .

Подвійний прийом при кутовому рознесенні в порівнянні з подвійним просторово-рознесенням прийомом має енергетичний програт 3 дБ.

При куті  $\beta_{\text{opt}}$  четвертий прийом з кутовим рознесенням порівняно зі подвійним просторово-рознесенням прийомом дає енергетичний виграш порядку 3 дБ при  $P_{\text{пом}} = 10^{-4}$ .

Четвертий прийом при використанні кутового рознесення в порівнянні з четвертим прийомом при просторовому рознесенні антен має енергетичний програт близько 3 дБ.

При кореляції сигналів  $R = 0,5 \dots 0,6$  ступінь поліпшення системи за рахунок рознесення прийому практично така сама, як і при прийомі повністю некорельованих сигналів.

Враховуючи певну змінність коефіцієнта кореляції в часі, можна констатувати, що при  $R = 0,5 \dots 0,6$  ефективність кутового рознесення прийому буде така ж, як і повністю некорельованих сигналів.

Для мобільних цифрових тропосферних станцій кутовий рознесений прийом краще реалізовувати по горизонталі, ніж по вертикалі.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Pochernyaev V., Syvkova N., Mahomedova M. Error Probability of a Multipath Communication Channel With Inaccurate Estimation of the Impulse Characteristic of Such Channel// Visnyk NTUU KPI Seriya - Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia, 2023.- (92), pp. 23-27.
- Почерняев В.Н., Повхлеб В.С. Управление мобильной цифровой тропосферно-радиорелейной станцией, Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку, 2014, №6, с.27-32.
- Почерняев В.Н., Повхлеб В.С. Мобильная цифровая станция СВЧ диапазона двойного назначения. Научные труды ОНАС им. АС Попова, 2014, №2, с.76-82.
- Почерняев В. Н. Состояние и направления развития мобильных цифровых радиорелейных систем / В. Н. Почерняев, В. С. Повхлеб // Системи озброєння і військова техніка. - 2018. - № 1. - С. 183-188.

5. Почерняев В.Н., Повхлеб В.С. Состояние и направления развития мобильных цифровых тропосферных систем связи. Системы озброєння і військова техніка, 2018, №2, с.51-60
6. Pochernyaev V. Іоносферний зв'язок з використанням штучних іонізованих неоднорідностей / V. Pochernyaev, M. Mahomedova, N. Syvkova // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2022. – Т. 2 (68). – С. 124-128. – doi:https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.2.124.
7. Weimin Kang. A Probabilistic Shaping Scheme for MIMO Systems with Signal Space Diversity/ IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 10-13 April 2022, Austin, TX, USA.
8. Xiang Gao. Enhanced MIMO cooperative communication based on signal space diversity/Xiang Gao, Zhanji Wu, Sheng He, Yongtao Shi, Xiaoping Zhou// 9th International Conference on Communications and Networking in China, 14-16 August 2014, Maoming, China.
9. Aekkarat Lorphichian. Performance analysis of space diversity for OFDM transmission/Aekkarat Lorphichian, Auttapon Pomsathit, Jintana Nakasuwan, Thanupong Srikalsin, Chawalit Benjangkprasert//International Conference on Control, Automation and Systems/14-17 October 2008, Seoul, Korea (South).
10. Chang-Soon Choi. Analysis of receiver space diversity gain for millimeter-wave self-heterodyne transmission techniques under two-path channel environments/Chang-Soon Choi, Yozo Shoji, Hiroyo Ogawa//IEEE Radio and Wireless Symposium, 09-11 January 2007, Long Beach, CA, USA.
11. Mehmet Akif Kurt. Spatial Modulation Using Signal Space Diversity/Mehmet Akif Kurt, Ali Tugberk Dogukan, Ertugrul Basar//IEEE Communications Letters, 11 January 2023, pp.1020 – 1024.
12. Tingting Song. Demonstration of Optical Wireless Communications using Spatial Modulation with Signal Space Diversity/Tingting Song, Ke Wang, Ampalavanapillai Nirmalathas, Christina Lim, Elaine Wong, Kamal Alameh // IEEE Photonics Conference (IPC), 29 September 2019 - 03 October 2019, San Antonio, TX, USA.
13. Сайко В. Г., Наконечний В. С., Баховський П. Ф., Сивкова Н. М. Алгоритм реалізації методу завадостійкого прийому сигналів, які випромінюються просторово-рознесеними передавачами. Modern science: problems and innovations. Abstracts of the 1st Int. scientific and practical conference. SSPG Publish. Stockholm, Sweden. 5-7 April 2020. Pp. 247-253.
14. Qin Li. A High Isolation UWB MIMO Antenna based on Angle Diversity /Qin Li, Yufa Sun//IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), 20-23 September 2020, Shanghai, China.
15. Chin-Lung Yang. Directional antennas for angular diversity in wireless sensor networks/Chin-Lung Yang, J.F. Mastarone, W.J. Chappell//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 03-08 July 2005, Washington, DC, USA.
16. Vipul Dixit. Performance Analysis of Indoor Visible Light Communication System with Angle Diversity Transmitter / Vipul Dixit, Atul Kumar// IEEE 4th Conf. on Information & Communication Technology (CICT), 03-05 Dec. 2020, Chennai, India.
17. Abrar S. Alhazmi. Angle Diversity Trasmmitter For High Speed Data Center Uplink Communications/Abrar S. Alhazmi, Sanaa H. Mohamed, Osama Z. Aletri, T. E. H. El-Gorashi, Jaafar M. H. Elmirghani //IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), 15-17 December 2021, Thessaloniki, Greece.
18. Roua Muwafaq Younus. Angle Diversity Receiver for Indoor Optical Wireless Communication Systems/Roua Muwafaq Younus, Mahmod Ahmed Al Zubaidy, Safwan Hafeedh Younus//4th International Conference on Advanced Science and Engineering (ICOASE), 21-22 September 2022, Zakho, Iraq.
19. Weitzen J. Analysis of diversity performance of space diversity and cross polarization for PCS base stations/J. Weitzen, M. Wallace//Ninth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (Cat. No.98TH8361), 06 August 2002, Boston, MA, USA.
20. Mengqi Zhang. Radar Polarization Diversity Technology for Low-altitude Targets / Mengqi Zhang, Lin Peng, Yan Liang, Yufei Wang, Jie Cui//CIE International Conference on Radar (Radar), 15-19 December 2021, Haikou, Hainan, China.
21. Прокис Дж. Цифровая связь - М.: Радио и связь, 2000.-800 с.
22. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений – М.: Сов.радио,1970. - 727с.
23. Патент України на винахід №122168 Мобільна високошвидкісна цифрова тропосферна станція/ Почерняев В.М., Повхліб В.С., Наритник Т.М.

Received (Надійшла) 12.10.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.12.2023

### Angular spaced reception on troposcatter and ionospheric communication lines

V. Pochernyaev, M. Mahomedova, N. Syvkova, O. Shefer

**Abstract.** In the article paper estimates the effectiveness of the angular diversity of signals on troposcatter and ionospheric communication lines by determining the optimal angle of diversity and energy gain from angular diversity. The dependence of the power at the input receiver of the azimuthal angle at the a angular diversity is presented. The correlation coefficient of the signal envelope at the angular spread in azimuth was obtained, which shows that the correlation is determined not only by the angular spread, but also by the ratio of the width of the antenna directional diagram to the width of the angular energy spectrum of waves scattered by the troposphere. The energy gain at the angular diversity when the directional pattern is oriented along the direction of the radio waves on the track is found. An approximate formula for the error probability of a quadruple reception is given. The formula for energy gain when switching from double spatially dispersed reception to quadruple reception with angular diversity is presented. The maximum energy gain at the optimal angle in compare with the double spatially dispersed reception is found. It was established that the double reception with angular separation has an energy loss in comparison with the double spatially separated reception. The optimal diversity angles for different antenna patterns diagrams is estimates. It is proved that the degree of improvement of the system due to the spread reception is almost the same as when receiving completely uncorrelated signals. Taking into account the change in the correlation coefficient over time, it was established that the efficiency of angular diversity reception will be the same as that of completely uncorrelated signals. It is recommended that angular spread reception for mobile digital troposcatter stations is better implemented horizontally than vertically.

**Keywords:** angular diversity reception, spatially diversity reception, troposcatter communication, ionospheric communication, correlation coefficient, energy gain.