

Т.В. Воробкало, к.т.н., доц.
О.С. Гавриш, к.ф.-м.н., доц.
В.В. Філіпов, к.т.н., доц.
С.С. Мартиненко, к.ф.-м.н., доц.
П.А. Клопотовський, ст. викладач
Черкаський державний технологічний університет

Визначення кутового положення джерела сигналу при рознесеному прийомі на фоні негауссівських завад

Визначення кутового положення джерела сигналу є важливим завданням у системах радіолокації, радіонавігації та зв'язку. В роботі, для визначення кутового положення джерела, запропоновано використання різниці фаз сигналів, що надходять на просторово рознесені приймальні елементи. Як модель корисного сигналу розглянуто гармонічне коливання, а як завада – негауссівські завади, які найбільш точно описують завадову ситуацію на практиці. Це завдання має статистичний характер, і для оцінки фази сигналу в кожному з приймальних елементів використовується метод максимізації полінома, який дозволяє знаходити найбільш ефективні оцінки випадкових величин у разі їх негауссівського характеру, завдяки застосуванню моментно-кумулянтного опису. В роботі методом максимізації полінома розроблено методи обчислення оцінки фази сигналу в окремому приймальному елементі, та на їх основі побудовано графічну модель обчислення кутового положення джерела сигналу при двоканальному прийомі корисного сигналу. Також в роботі проведено дослідження точності розроблених обчислювальних методів, шляхом аналізу дисперсій знайдених оцінок, показано, що при врахуванні негауссівського характеру завади у вигляді кумулянтних коефіцієнтів (коефіцієнта асиметрії та коефіцієнта ексцесу) можна досягти значного зменшення дисперсії оцінки, тим самим підвищуючи точність визначення параметрів прийнятого сигналу на фоні завад. На основі розроблених у роботі алгоритмів можна будувати пристрої для визначення кутового положення джерела сигналу, які будуть відрізнятися підвищеною ефективністю при складних завадових ситуаціях.

Ключові слова: кутове положення джерела сигналу; рознесений прийом; негауссівські завади; оцінка параметра сигналу; метод максимізації полінома; кумулянтні коефіцієнти.

Актуальність теми. Рознесений прийом сигналів набуває все більшої популярності в сучасних радіотехнічних та телекомунікаційних системах зв'язку. Ця технологія відіграє ключову роль у підвищенні якості та надійності передачі даних, особливо в умовах складних радіоканалів, коли наявні завади та замирання сигналу. За рахунок об'єднання сигналів, прийнятих різними антенами, можна суттєво покращити якість прийому, а також визначити різноманітні параметри об'єктів: дальність, кутові координати, радіальну та кутову швидкості. Всі ці завдання зводяться до оцінювання інформативних параметрів сигналу, що приймається на фоні завад. Класичні методи оцінювання параметрів випадкових величин, засновані на припущенні про гауссівський характер завад і, часто, виявляються неефективними в реальних умовах, де завади можуть мати більш складну структуру і не підкорятися гауссівському закону розподілу. Тому розробка ефективних методів та алгоритмів визначення оцінки кутового положення джерела сигналу в умовах негауссівських завад є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Завдання визначення кутових координат, як пасивних, так і активних джерел сигналів, на сьогоднішній час досить популярне та розглядається в багатьох роботах [1–3]. Визначити кутове положення джерела сигналу можливо лише застосовуючи рознесений прийом, що передбачає використання декількох приймальних антен, рознесених у просторі для прийому одного і того ж сигналу [4].

Це завдання має статистичний характер, оскільки в каналах зв'язку до корисного сигналу додаються різноманітні завади, які накладають істотні обмеження на точність обробки сигналів. У більшості робіт, присвячених оцінюванню параметрів сигналів на фоні завад, розглядають модель завади у вигляді білого гауссівського шуму [2, 3, 5]. Але на практиці завади, що впливають на радіотехнічні та телекомунікаційні системи, зазвичай мають розподіл, який відрізняється від нормального (тобто гауссівського), і для їх опису використовують інші розподіли ймовірностей, такі як розподіл Релея, Райса, логнормальний та інші, і називають негауссівськими завадами [6, 7].

Одним з класичних підходів для оцінювання параметрів сигналів є метод максимальної правдоподібності, що базується на використанні функції щільності ймовірності [8, 9], але він визве труднощі, пов'язані з тим, що негауссівські розподіли мають досить складні функції щільності

ймовірності, тому при оцінюванні параметрів зручніше буде застосовувати метод, що базується на моментно-кумулянтному описі завад. Таким методом є метод максимізації полінома [10]. Застосування цього методу дозволяє більш ефективно використовувати апіорний опис випадкових негауссівських величин у вигляді кінцевої послідовності моментів і кумулянтів, завдяки чому отримані оцінки параметрів виявляються більш точними порівняно з оцінками, знайденими в припущенні про гауссівський характер розподілу завади.

Метою статті є розробка ефективного методу визначення кутового положення джерела випромінювання сигналу при впливі негауссівських завад, шляхом оцінювання фаз сигналу в двох рознесених приймальних елементах методом максимізації полінома та дослідження точності розроблених методів.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо надходження електромагнітної хвилі на два ненаправлених антенних елемента, які розташовані на відстані d одне від одного (рис. 1). Джерело сигналу вважається точковим і знаходиться на значній відстані від антен, тому фронт хвилі можна наближено вважати плоским, тоді електромагнітна хвиля буде надходити під кутом α щодо нормалі до антен. Сигнал до другого антенного елемента буде надходити із запізненням по часу τ відносно першого. Зв'язок між кутом приходу хвилі і запізненням визначається виразом:

$$\tau = \frac{d}{c} \sin \alpha, \quad (1)$$

де c – швидкість поширення хвилі в середовищі. Час затримки (1) спричиняє фазовий зсув хвилі:

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{d}{\lambda_0} \sin \alpha, \quad (2)$$

де λ_0 – довжина хвилі, а також враховано співвідношення $c = f\lambda_0$.

Нехай джерело випромінює гармонічний сигнал тоді на приймальних елементах будуть спостерігатися сигнали такого вигляду:

$$\begin{aligned} S_1(t) &= a_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \\ S_2(t) &= a_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \Delta\varphi), \end{aligned} \quad (3)$$

де a_0 , ω_0 , φ_0 – параметри гармонічного сигналу, відповідно амплітуда, частота і фаза.

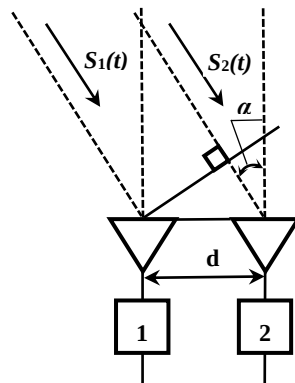


Рис. 1. Рознесений прийом сигналу

Для визначення кутового положення джерела сигналу α необхідно оцінити фази сигналів у кожному елементі, та на основі їх різниці з форми (1) визначити кут.

Розглянемо постановку задачі оцінювання фази гармонічного сигналу на фоні завад. Нехай корисний сигнал надходить на приймальний елемент. Будемо вважати, що взаємодія сигналу і завади є адитивною, тоді випадковий процес, що спостерігається, описується таким виразом:

$$\xi(t) = S(t) + n(t), \quad (4)$$

де $n(t)$ – негауссівська завада.

У результаті спостереження випадкового процесу (4) отримаємо множину статистично незалежних випадкових вибірових величин $\vec{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,

$$x_v = S_v + n_v, v = \overline{1, n}, \quad (5)$$

використовуючи які потрібно знайти оцінку фази прийнятого сигналу.

Модель гармонічного сигналу в дискретному вигляді:

$$S_v = a_0 \cos(\omega_0 v\Delta + \varphi). \quad (6)$$

Будемо вважати, що такі параметри моделі (6), як a_0, ω_0 відомі, а невідомим параметром є фаза φ . Для опису негауссівської завади застосовуються апріорно відомі кумулянтні коефіцієнти $\chi_2, \gamma_3, \gamma_4, \dots$. Оцінку невідомого параметра будемо знаходити методом максимізації полінома [10], згідно з яким, оцінка параметра випадкової величини знаходиться з розв'язку системи рівнянь максимізації полінома:

$$\sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^s h_{iv}(\varphi) [x_v^i - m_{iv}(\varphi)] \Big|_{\varphi=\hat{\varphi}} = 0, \quad (7)$$

де s – степінь стохастичного поліному, $m_{iv}(\varphi)$ – початкові моменти випадкового процесу (4), $h_{iv}(\varphi)$ – оптимальні вагові коефіцієнти, що знаходяться з розв'язку такої системи рівнянь:

$$\sum_{j=1}^s h_{jv}(\varphi) F_{(i,j)v}(\varphi) = \frac{d}{d\varphi} m_{iv}(\varphi), j = \overline{1, s}, \quad (8)$$

де $F_{(i,j)v}(\varphi) = m_{(i+j)v}(\varphi) - m_{iv}(\varphi) \cdot m_{jv}(\varphi)$ – центровані корелянти, що визначаються через початкові моменти [10].

Згідно з описаного вище методом отримаємо рівняння максимізації полінома при першому степені, попередньо розрахувавши початкові моменти, центровані корелянти та оптимальні вагові коефіцієнти:

$$\sum_{v=1}^n x_v a_0 \sin(\omega_0 v \Delta + \varphi) \Big|_{\varphi=\hat{\varphi}} = 0. \quad (9)$$

З рівняння (9) можна виразити в явному вигляді шукану оцінку $\hat{\varphi}$:

$$\hat{\varphi} = -\arctg \frac{\sum_{v=1}^n x_v \cos \omega_0 v \Delta}{\sum_{v=1}^n x_v \sin \omega_0 v \Delta}. \quad (10)$$

На основі виразу (10) побудовано графічну модель для технічної реалізації методу обчислення оцінки фази гармонічного сигналу (рис. 2).

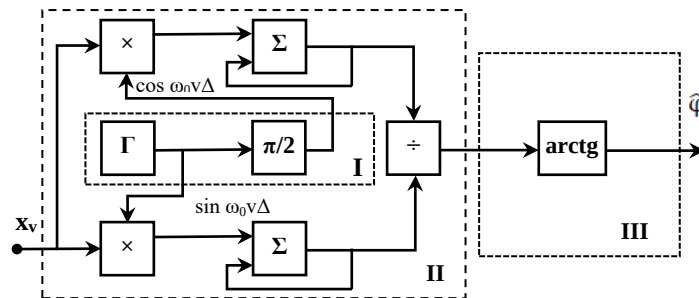


Рис. 2. Графічна модель обчислення оцінки фази прийнятого сигналу при $s = 1$

Як видно з рисунка 2, для технічної реалізації обчислення оцінки фази сигналу необхідно застосувати генератор, позначимо Γ , який буде генерувати дискретні значення синусного гармонічного коливання, з якого, зсувом фази на $\pi/2$, можна отримати косинусне гармонічне коливання. В другому блоці кожне вибіркове значення x_v помножується на відповідне синусне $\sin \omega_0 v \Delta$ і косинусне $\cos \omega_0 v \Delta$ значення, отримані результати циклічно підсумовуються по $v = \overline{1, n}$ і косинусна складова ділиться на синусну. В третьому блоці від отриманого значення обчислюється арктангенс. Таким чином обчислюється оцінка фази сигналу в кожному з приймальних елементів.

Такий метод є оптимальним для випадку, коли завада є гауссівською. Перевагами такої оцінки є простота її обчислення та технічної реалізації, а основним недоліком – неврахування негауссівського характеру завади, у вигляді кумулянтних коефіцієнтів $\chi_2, \gamma_3, \gamma_4, \dots$.

Згідно з методом максимізації полінома отримано рівняння максимізації полінома (7) при другому степені полінома, з розв'язку якого знаходиться оцінка фази:

$$[\chi_2^{0.5}(\gamma_4 + 2)Z_{1(c)1} - \gamma_3 Z_{2(c)1}] \sin \varphi + [\chi_2^{0.5}(\gamma_4 + 2)Z_{1(s)1} - \gamma_3 Z_{2(s)1}] \cos \varphi + a_0 \gamma_3 [Z_{1(c)2} \sin 2\varphi + Z_{1(s)2} \cos 2\varphi] \Big|_{\varphi=\hat{\varphi}} = 0. \quad (11)$$

У рівнянні (11), для спрощення технічної реалізації методу обчислення оцінки, введено позначення $Z_{r(s)k}, Z_{r(c)k}$, які назвемо статистиками. Перший індекс (r) вказує на величину степені вибіркового

значення; другий індекс вказує, яка саме зі статистик використовується, синусна (s) чи косинусна (c); а третій індекс (k) вказує на значення множника частоти гармонічного коливання:

$$Z_{r(s)k} = \sum_{v=1}^n x_v^r \sin k\omega_0 v\Delta$$

$$Z_{r(c)k} = \sum_{v=1}^n x_v^r \cos k\omega_0 v\Delta, r, k = 1, 2, \dots$$
(12)

На рисунку 3 приведена графічна модель обчислення оцінки фази сигналу методом максимізації полінома при другому степені.

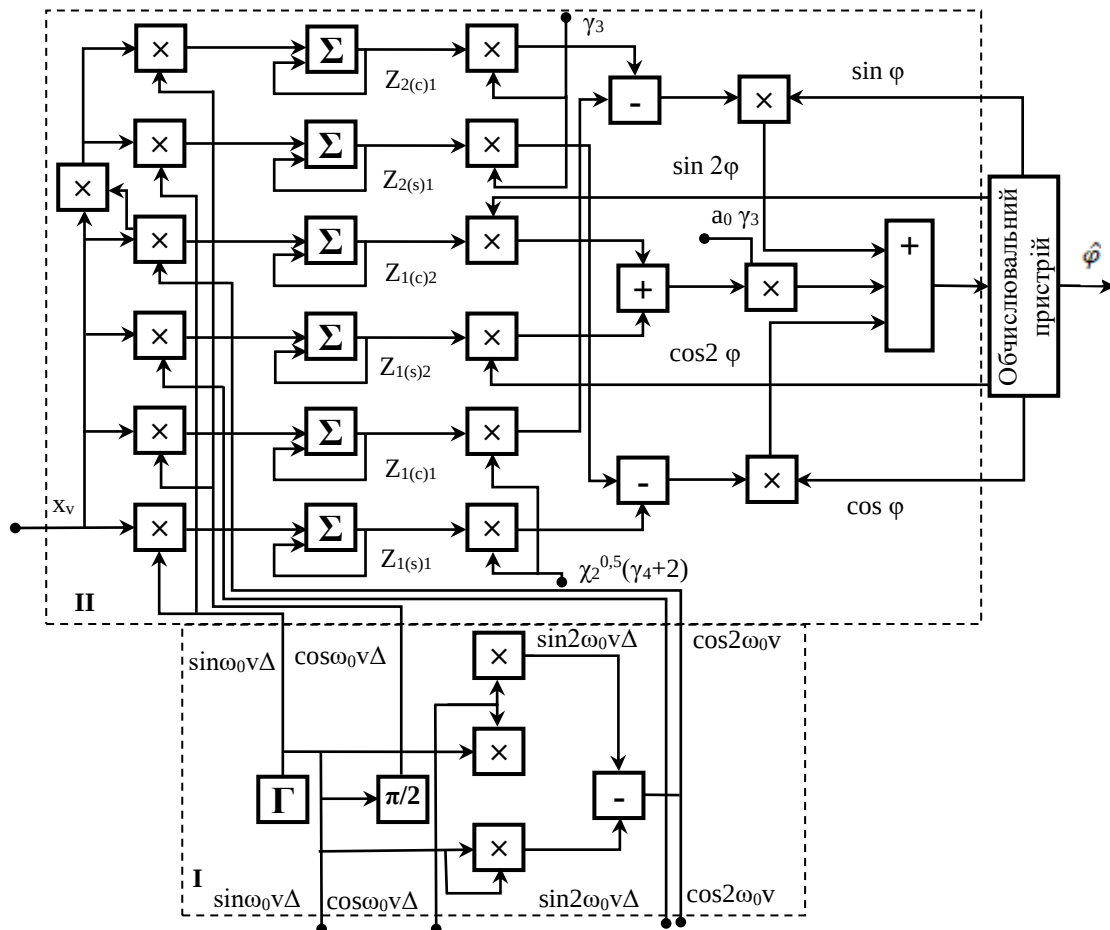


Рис. 3. Графічна модель обчислення оцінки фази сигналу при $s = 2$

Побудована модель складається з трьох блоків. У першому блоці, аналогічно випадку $s = 1$, наявний дискретний генератор Γ , на виході якого спостерігається синусоїдальне гармонічне коливання, та формуються: косинусне гармонічне коливання, синусні і косинусні коливання з подвоєною частотою. Таким чином на виході I блоку наявні чотири гармонічні коливання: $\sin \omega_0 v\Delta, \cos \omega_0 v\Delta, \sin 2\omega_0 v\Delta, \cos 2\omega_0 v\Delta$. У блоці II формуються статистики $Z_{r(s)k}, Z_{r(c)k}$, шляхом піднесення вибірових значень x_v до відповідного степеня, множенням на косинусні або синусні складові і циклічним підсумовуванням. Також на відведенні входи блоку II подаються апріорно відомі характеристики завади $\chi_2, \gamma_3, \gamma_4$ та значення амплітуди сигналу, і формується ліва частина рівняння (11). Сформоване рівняння надходить у вирішальний пристрій, в якому здійснюється розв'язання рівняння відповідно до обраного ітеративного чисельного методу, наприклад методу Ньютона – Рафсона. Розв'язання лівої частини рівняння відбувається при різних значеннях φ , згідно з ітеративним алгоритмом, тому в блок-схемі передбачено зворотний зв'язок для значень $\sin \varphi, \cos \varphi, \sin 2\varphi, \cos 2\varphi$. Також у графічній моделі передбачені виходи сигналів блока гетеродинів, що можуть використовуватися для синхронного оцінювання фази сигналу на виході другого приймального елемента.

На основі методу обчислення оцінки фази в окремому приймальному елементі розроблено графічну модель визначення кута надходження сигналу при рознесеному прийомі, яка зображена на рисунку 4. Виконується двоканальна обробка сигналів. З приймальних елементів сигнали надходять на блоки дискретизації, на виході яких спостерігається вибірка з адитивної суміші корисного сигналу та негауссівської завади (4). На основі вибірових значень відбувається обчислення оцінки фази сигналу в кожному каналі за алгоритмами, що описані вище, знаходиться різниця отриманих оцінок фаз, на основі якої з формули (2) визначається кут надходження сигналу α на антенну систему.

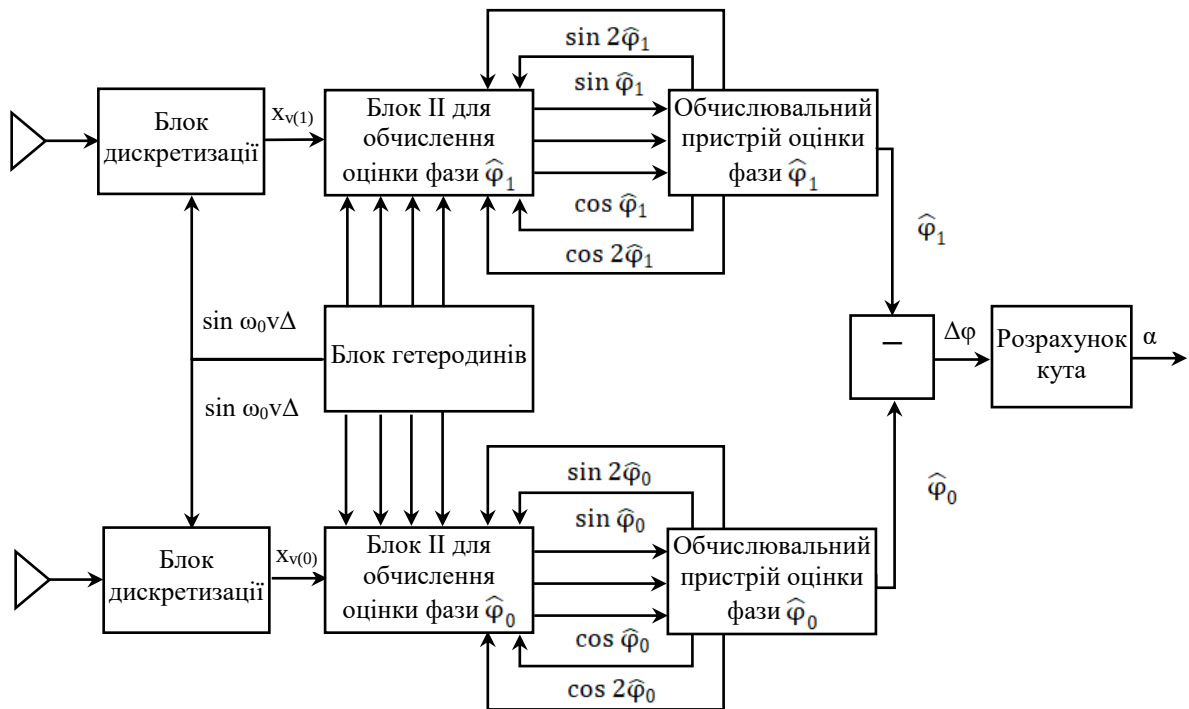


Рис. 4. Графічна модель обчислення кута надходження сигналу при рознесеному прийомі

Також проведено дослідження точності розроблених обчислювальних методів. Згідно з методом максимізації полінома, для дослідження точності оцінки розраховується дисперсія оцінки [10]:

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{J_{sn}(\varphi)}, \quad (13)$$

де $J_{sn}(\varphi)$ кількість здобутої інформації про параметр φ яка визначається за формулою:

$$J_{sn}(\varphi) = \sum_{v=1}^n \sum_{i=1}^s h_{iv}(\varphi) \frac{d}{d\varphi} m_{iv}(\varphi). \quad (14)$$

У роботі отримано дисперсію оцінки фази при першому степені полінома,

$$\sigma_1^2 = \frac{2\chi_2}{a_0^2 n}, \quad (15)$$

яка залежать від відношення сигнал – шум по потужності a_0^2 / χ_2 та числа вибірових значень n . При першому степені полінома не враховуються кумулянтні коефіцієнти вищих порядків, тобто не враховується негауссівський характер завади.

Також отримано дисперсію оцінки при другому степені полінома:

$$\sigma_2^2 = \frac{2\chi_2}{a_0^2 n} \left[1 - \frac{\gamma_3^2}{\gamma_4 + 2} \right]. \quad (16)$$

Під час порівняння виразів (15) та (16) бачимо, що дисперсія оцінки при другому степені відрізняються від дисперсії при $s = 1$ в коефіцієнт, який позначається як q_{21} :

$$q_{21} = 1 - \frac{\gamma_3^2}{\gamma_4 + 2}, \quad (17)$$

та називається коефіцієнтом ефективності [10]. Він показує наскільки зменшується дисперсія оцінки при нелінійній обробці вибірки по відношенню до лінійної та залежить від коефіцієнтів асиметрії γ_3 та ексцесу γ_4 .

Оскільки коефіцієнт ефективності одночасно залежить від двох параметрів, то для більшої наочності побудовано 3D-графік залежності коефіцієнта зменшення дисперсії оцінки при $s = 2$ та його проєкцію на площину (рис. 5). Проєкція дозволяє бачити область визначення параметрів γ_3, γ_4 . З рисунка 5 видно, що коефіцієнт q_{21} менше одиниці та прямує до нуля на границях областей допустимих значень параметрів завади γ_3, γ_4 [10], з чого можна зробити висновки, що існують такі негауссівські завади, для яких зменшення дисперсії може бути значним, а отже знайдені оцінки параметрів будуть більш точними порівняно з оцінками, що отримані при припущенні про гауссівський характер завади.

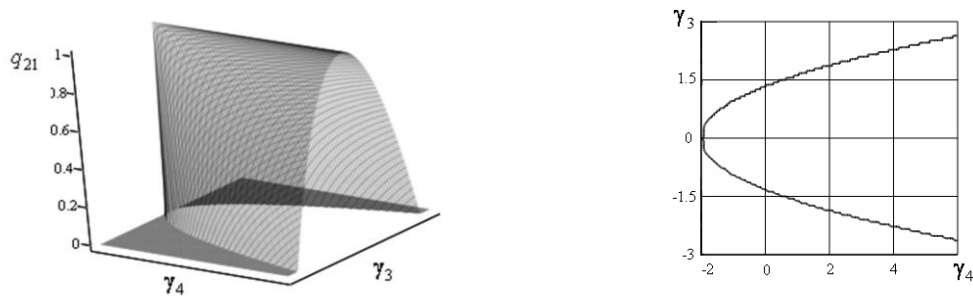


Рис. 5. Графік залежності q_{21} від кумулянтних коефіцієнтів

Висновки та перспективи подальших досліджень. У роботі на основі фазово-різницевого методу розроблено метод обчислення оцінки кута надходження сигналу на два рознесених у просторі приймальних елементи на фоні негауссівських завад. Для знаходження оцінки фази гармонічного сигналу, що надходить на приймальний елемент, застосовано метод максимізації полінома, при степенях полінома $s = 1, 2$, отримано рівняння максимізації полінома та на їх основі побудовані графічні моделі обчислення оцінки фази сигналу в окремому прийальному елементі. Також побудовано графічну модель обчислення кутового положення джерела сигналу при двоканальній обробці прийнятого сигналу. У роботі проведено дослідження точності розроблених методів обчислення оцінок, яке показало, що врахування характеристик негауссівських завад у вигляді кумулянтних коефіцієнтів, таких як коефіцієнт асиметрії та коефіцієнт ексцесу, дозволяє отримати більш точні оцінки параметрів сигналу, прийнятого на фоні негауссівських завад. Тому отримані в цій роботі результати можна використовувати для побудови високоточних вимірювачів кутового положення джерела сигналу за допомогою рознесеного прийому в складних завадових умовах. В подальшій перспективі планується проведення досліджень при збільшенні приймальних елементів рознесеного прийому, що має призвести до ще більшого підвищення точності оцінювання параметрів сигналів.

Список використаної літератури:

1. Підвищення точності вимірювання кутових координат повітряних об'єктів при багатоканальному прийомі радіолокаційного сигналу / О.Л. Кузнєцов, О.В. Коломійцев, С.В. Яровий та ін. // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. – 2021. – Т. 9, № 3. – С. 65–72. DOI: 10.37701/dndivsovt.9.2021.09.
2. Ципоренко В.В. Оцінка часової ефективності радіопеленгатора, що працює на основі безпошукового спектрального методу дисперсійно-кореляційного радіопеленгування / В.В. Ципоренко, В.Г. Ципоренко, О.В. Андрєєв // Технічна інженерія. – 2020. – № 1 (85). – С. 184–190.
3. High accuracy unambiguous angle estimation using multi-scale combination in distributed coherent aperture radar / T.Long, H.Zhang, T.Zeng and other // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2017. – Vol. 11. – P. 1090–1098. DOI: 10.1049/iet-rsn.2016.0450.
4. Sayed Mohammed B. New trends for angle of arrival estimation / B.Sayed Mohammed, Hadeer Hussein Ali // Journal of Engineering and Sustainable Development. – 2018. – Vol. 22, № 6. – P. 43–57. DOI: 10.31272/jeasd.2018.6.5.
5. Козерук С.О. Визначення часових затримок хвиль в задачах акустичної локації / С.О. Козерук, О.В. Сергієнко // Scientific Journal «ScienceRise». – 2017. – № 12 (41). – С. 82–85. DOI: 10.15587/2313-8416.2017.11828.
6. Middleton D. Non-Gaussian Statistical Communication Theory / D.Middleton. – New Jersey : Jonn Willey & Sons, 2012. – 664 p.

7. Методи статистичного оцінювання параметрів сигналу на фоні негаусових корельованих завад / Д.О. Смірнов, Д.А. Ведерников, О.А. Палагіна, В.В. Палагін // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія : Технічні науки. – 2021. – Вип. 22. – С. 106–118. DOI: 10.32626/2308-5916.2021-22.106-118.
8. Parameter estimation of exponentiated U-quadratic distribution: alternative maximum likelihood and percentile methods / M.Muhammad, S.Rano, R.Sani and other // Asian Research Journal of Mathematics. – 2018. – Vol. 9, Issue 2. – P. 1–10. DOI: 10.9734/ARJOM/2018/39446.
9. Туровський О.Л. Порядок оцінки несучої частоти сигналу, що приймається супутниковою системою зв'язку в безперервному режимі / О.Л. Туровський, О.В. Дробик // Радіoeлектроніка, інформатика, управління. – 2021. – № 2. – С. 28–38. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-2-3.
10. Kunchenko Y.P. Polynomial parameter estimation of close to Gaussian random variables / Y.P. Kunchenko. – Aachen : Shaker Verlag, 2002. – 396 p.

References:

1. Kuznietsov, O.L., Kolomiitsev, O.V., Yarovyi, S.V. et al. (2021), «Pidvyshchennia tochnosti vymiriuvannia kutovykh koordynat povitrianykh ob'ektiv pry bahatokanalnomu pryomi radiolokatsiynoho syhnalu», *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnogo naukovo-doslidnogo instytutu viprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki*, Vol. 9, No. 3, pp. 65–72, doi: 10.37701/dndivsovt.9.2021.09.
2. Tsyporenko, V.V., Tsyporenko, V.H. and Andreiev, O.V. (2020), «Otsinka chasovoi efektyvnosti radiopelenhatora, shcho pratsiuiie na osnovi bezposhukovoho spektralnogo metodu dyspersiino-koreliatsiynoho radiopelenhuvannia», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (85), pp. 184–190.
3. Long, T., Zhang, H., Zeng, T. et al. (2017), «High accuracy unambiguous angle estimation using multi-scale combination in distributed coherent aperture radar», *IET Radar, Sonar & Navigation*, Vol. 11, pp. 1090–1098, doi: 10.1049/iet-rsn.2016.0450.
4. Sayed Mohammed, B. and Hadeer Hussein Ali (2018), «New trends for angle of arrival estimation», *Journal of Engineering and Sustainable Development*, Vol. 22, No. 6, pp. 43–57, doi: 10.31272/jeasd.2018.6.5.
5. Kozeruk, S.O. and Serhiienko, O.V. (2017), «Vyznachennia chasovykh zatrymok khvyli v zadakhakh akustychnoi lokatsii», *Scientific Journal «ScienceRise»*, No. 12 (41), pp. 82–85, doi: 10.15587/2313-8416.2017.11828.
6. Middleton, D. (2012), *Non-Gaussian Statistical Communication Theory*, John Wiley & Sons, New Jersey, 664 p.
7. Smirnov, D.O., Vedernikov, D.A., Palahina, O.A. and Palahin, V.V. (2021), «Metody statystychnoho otsiniuvannia parametriv syhnalu na foni nehausovykh korelovanykh zavod», *Matematychni ta kompiuterni modeliuvannia. Seriia Tekhnichni nauky*, Issue 22, pp. 106–118, doi: 10.32626/2308-5916.2021-22.106-118.
8. Muhammad, M., Rano, S., Sani, R. et al. (2018), «Parameter estimation of exponentiated U-quadratic distribution: alternative maximum likelihood and percentile methods», *Asian Research Journal of Mathematics*, Vol. 9, Issue 2, pp. 1–10, doi: 10.9734/ARJOM/2018/39446.
9. Turovskyi, O.L. and Drobyk, O.V. (2021), «Porядok otsinky nesuchoi chastoty syhnalu, shcho pryimaietsia suputnykovoiu systemoiu zviazku v bezperernom rezhymy», *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*, No. 2, pp. 28–38, doi: 10.15588/1607-3274-2021-2-3.
10. Kunchenko, Y.P. (2002), *Polynomial parameter estimation of close to Gaussian random variables*, Shaker, Verlag, Aachen, 396 p.

Воробкало Тетяна Василівна – кандидат технічних наук, доцент Черкаського державного технологічного університету.

<https://orcid.org/0000-0002-8985-9924>.

Наукові інтереси:

– розробка математичних моделей та методів оцінювання параметрів сигналів при багатоканальній обробці негаусівських випадкових величин.

E-mail: t.vorobkalo@chdtu.edu.ua.

Гавриш Олександр Степанович – кандидат фізико-математичних наук, доцент Черкаського державного технологічного університету.

<https://orcid.org/0000-0003-4621-9510>.

Наукові інтереси:

– статистичне опрацювання сигналів при негаусівських завадах;

– моделювання антен та НВЧ-пристроїв.

E-mail: o.havrysh@chdtu.edu.ua.

Філіпов Віталій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент Черкаського державного технологічного університету.

<https://orcid.org/0000-0002-2574-5194>.

Наукові інтереси:

– статистичне опрацювання сигналів при негаусівських завадах із застосуванням усічених стохастичних поліномів.

E-mail: v.filipov@chdtu.edu.ua.

Мартиненко Сергій Станіславович – кандидат фізико-математичних наук, доцент Черкаського державного технологічного університету.

<https://orcid.org/0000-0001-8081-2591>.

Наукові інтереси:

– адаптивне виявлення сигналів на тлі негауссівських завад.

E-mail: s.martynenko@chdtu.edu.ua.

Клопотовський Павло Анатолійович – старший викладач Черкаського державного технологічного університету.

<https://orcid.org/0000-0002-4958-2377>.

Наукові інтереси:

– розробка та дослідження математичних моделей безінерційної поліноміальної фільтрації сигналів на фоні негауссівських завад.

E-mail: p.klopotovskiy@chdtu.edu.ua.

Vorobkalo T.V., Gavrish, O.S., Filipov V.V., Martynenko S.S., Klopotovskiy P.A.

Determination of the angular position of the signal source in distributed reception at the background of non-Gaussian noise

Determining the angular position of a signal source is an important task in radar, radio navigation, and communication systems. In this paper, to determine the angular position of the source, it is proposed to use the method of the phase difference of signals arriving at the spaced reception elements. The harmonic oscillation is considered as a model of useful signal, and the non-Gaussian noise is used as the model, which better represent interference conditions in practice. This is a statistical problem, and it is solved as an estimation of the signal phase in each receiving element using the method of polynomial maximization. This method allows finding the most effective estimates of random variables in the case of non-Gaussian noise, thanks to the use of a moment-cumulative description. In this work, we develop computational techniques for estimating the signal phase in a separate receiving element using the method of polynomial maximization. Based on these techniques, a graphical model is constructed for determining the angular position of the signal source under two-channel signal reception. Furthermore, the paper investigates the accuracy of the developed methods by analyzing the variances of the obtained estimates. The results demonstrated that considering the non-Gaussian nature of noise through cumulant coefficients (skewness coefficient and kurtosis coefficient) enables to reduce the estimation variance. This means that the accuracy of the parameters determining the received signal at the background of interference increases. Based on the algorithms developed in this work, it is possible to build devices for determining the angular position of a signal source, which will be characterized by increased efficiency in complex interference situations.

Keywords: angular position of the signal source; spaced reception; non-Gaussian noise; signal parameter estimation; method of polynomial maximization; cumulant coefficients.

Стаття надійшла до редакції 01.04.2025.