

УДК 621.391.962

Статистичні оцінки точності моноімпульсного пеленгування джерел радіовипромінювання двоканальними фазовими пристроями

Войтко В. В.¹, Ільницький А. І.², Ільяшов О. А.³, Стейскал А. Б.¹, Марченко А. О.⁴

¹Науково-дослідний інститут Міністерства оборони України, м. Київ

²Інститут телекомунікаційних систем КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ

³Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, м. Київ

⁴Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ

E-mail: vitalik_v_ua@i.ua

У статті наведено висвітлення результатів розрахунку та аналізу залежності статистичних оцінок точності пеленгування джерел радіовипромінювання двоканальними фазовими моноімпульсними пеленгаторами в середовищі телекомунікаційних мереж під час ведення радіомоніторингу. Використання моноімпульсного двоканального фазометричного методу пеленгування джерел радіовипромінювання забезпечує отримання незміщених, ефективних і оптимальних оцінок з заданою ймовірністю та мінімальними математичним очікуванням і дисперсією. Отримані оцінки можуть бути використані для розробки нових і удосконалення існуючих методів моноімпульсного пеленгування джерел радіовипромінювання з подальшим синтезом схем та пристроїв їх реалізації.

Ключові слова: статистична оцінка; джерело радіовипромінювання; сигнал; база пеленгування; відношення сигнал/шум; довжина хвилі; пеленг; пристрій

DOI: [10.20535/RADAP.2020.81.30-37](https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.81.30-37)

Постановка проблеми у загальному вигляді

Одним з основних завдань при радіомоніторингу (РМ) телекомунікаційних мереж і систем є розпізнавання і класифікація їх джерел радіовипромінювання, а також визначення їх місцеположення (пеленгування), яке вирішується в умовах часткової або повної невизначеності параметрів вхідних сигналів відомими методами (порівняння з еталоном, дихотомії, структурно-системним та сигнатурно-системним методами тощо) [1–5].

Незалежно від обраного методу, який при цьому використовується, процеси розпізнавання й класифікації засновані на визначенні інформаційних ознак джерел радіовипромінювань (ДРВп) – кількісних і якісних, загальних та індивідуальних, належності і фазового стану тощо [1]. Тобто засобами РМ визначаються параметри сигналів ДРВп, наприклад, несуча частота, тривалість, період або частота повторення, ширина спектра сигналу, девіація частоти, а також пеленг на джерело [4]. При цьому слід звернути особливу увагу, що у результаті РМ отримуються не значення параметрів вхідних сигналів, а їх статистичні оцінки, які повинні задовольняти умовам Крамера-Рао і бути незміщеними,

ефективними та оптимальними [6–12]. При цьому, практика ведення РМ свідчить, що згадані оцінки параметрів прийнятих сигналів повинні отримуватися у масштабі часу, наближеного до реального, тобто з максимальною швидкістю і мінімальними часовими втратами; точність визначення оцінок параметрів сигналів ДРВп та їх пеленгів повинна бути максимальною; ймовірність розпізнавання і класифікації джерел та об'єктів – не менше заданої [1, 4]. Тобто, перелічені вимоги і наведені вище припущення свідчать, що при РМ має місце проблемна ситуація, яка обумовлена існуючою суперечністю між сучасними вимогами до забезпечення високої швидкості, точності і достовірності у процесі отримання відомостей, даних та інформації і технічними можливостями сучасних апаратних засобів спостереження.

1 Аналіз останніх досліджень і публікацій

У відомих наукових джерелах з питань РМ і статистичної обробки результатів вимірювання параметрів сигналів ДРВп [1, 2, 4–18] зазначено, що для отримання незміщених, ефективних і оптимальних оцінок з високою ймовірністю, точністю та

швидкодією доцільно використовувати саме моноімпульсні методи і способи. При цьому, в теперішній час вказані методи і способи розроблені, в основному, для РМ радіолокаційних засобів і визначення їх місцеположення за результатами пеленгування, де враховується, що більшість параметрів ДРВП апріорно відома (наприклад, несуча частота, тривалість, період або частота повторення імпульсів, ширина спектра сигналу, девіація частоти, відношення сигнал/шум тощо) [19–21]. Однак в середовищі телекомунікаційних мереж в умовах часткової або повної невизначеності параметрів вхідних сигналів моноімпульсні радіолокаційні методи РМ втрачають власну ефективність і стають малопридатними [22].

В [23] запропоновано спосіб двоканального фазового моноімпульсного пеленгування ДРВП станціями РМ і пристрій його практичної реалізації [24].

Сутність способу полягає в наступному. Моноімпульсне пеленгування ДРВП реалізується побудовою двобазового пеленгатора з двома каналами пеленгування: основним ("точним") та додатковим ("грубим"). Основний канал забезпечує необхідну точність отримання оцінок відносного пеленгу, а додатковий – усунення неоднозначності відліків пеленгів, що виникає в основному тракті. Груба β_T^* і точна β_T^* оцінки пеленгу отримуються за рахунок сформованих дискримінаційних (пеленгаційних) характеристик (ДХ) нелінійного тангенціального типу в основному і додатковому каналах, відповідно, а усунення неоднозначності визначення точної оцінки пеленгу β_T^* здійснюється за критерієм мінімуму модуля різниці значень пеленгів, отриманих ДХ точного і грубого каналів:

$$\beta^* = \beta_{T_i}^*; \text{ якщо } |\beta_T^* - \beta_{T_i}^*| = \min, \quad (1)$$

де β_T^* , $\beta_{T_i}^*$ – оцінки пеленгів у грубом і точному каналах пеленгатора; $i = 2, \dots, N$ – кількість неоднозначних відліків пеленгу в точному каналі, яка залежить від співвідношення фазометричної бази точного каналу пеленгування d_T та довжини хвилі несучого коливання вхідного сигналу λ_S .

Точність оцінки пеленгу визначається її дисперсією [23, 24]:

$$D(\beta^*) = \frac{\lambda_S^2}{2\pi^2 d_T^2 q^2 \cos^2 \beta_T}, \quad (2)$$

де λ_S – оцінка довжини хвилі вхідного сигналу з миттєвою несучою частотою ω_S , що відома, або вимірюється окремо; d_T – величина фазометричної бази точного каналу пеленгатора; $q^2 = U^2/(2\sigma_{\text{Ш}}^2)$ – відношення сигнал/шум за потужністю на вході пеленгатора.

При цьому, для забезпечення незміщеності, ефективності та оптимальності оцінок пеленгу ця дисперсія (а також і математичне очікування) повинна мати мінімальне значення [7, 8, 10, 12].

Як видно з (2), мінімізація дисперсії оцінки може бути забезпечена раціональним вибором таких параметрів: несучої частоти вхідного сигналу ω_S , величини фазометричної бази d_T , необхідним рівнем відношення сигнал/шум q^2 . Однак питання аналізу залежності точності пеленгування ДРВП від зазначених параметрів при статистичному оцінюванні у відомих літературних джерелах [4–6, 10, 12, 14–16] поки що залишаються відкритими.

На підставі наведеного, метою й основним змістом статті є висвітлення результатів аналізу залежності статистичних оцінок точності пеленгування ДРВП двоканальними фазовими моноімпульсними пеленгаторами в середовищі телекомунікаційних мереж в умовах ведення РМ.

2 Виклад основного матеріалу

Для досягнення мети статті розглянемо характер зміни величини дисперсії оцінки пеленгу $D(\beta^*)$ і проаналізуємо відповідні залежності при фіксованих та змінних значеннях параметрів, якими вона визначається.

Як видно з виразу (2), наведеному вище, величина дисперсії оцінки пеленгу $D(\beta^*)$ суттєво залежить як від відношення сигнал/шум за потужністю q^2 , так і від кута β надходження сигналу, а також від точності визначення несучої частоти вхідного сигналу ω_S та встановленої величини фазометричної бази d_T .

На рис. 1 (тут і далі усі розрахунки і графіки залежностей отримано в середовищі MathCAD) наведено сімейство кривих залежності дисперсії оцінки відносного пеленгу $D(\beta^*)$ від напрямку на ДРВП (кута) β надходження сигналу для фіксованих значень відношення сигнал/шум за потужністю q^2 , розрахованих за виразом (2).

З графічних залежностей видно, що мінімальні значення дисперсії знаходяться у напрямку нормалі до фазометричної бази антенної системи пеленгатора ($\beta = 0$) і зростають при збільшенні кута надходження сигналу.

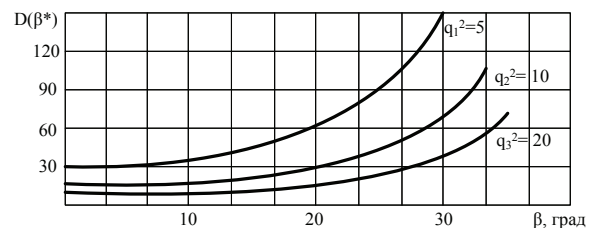


Рис. 1. Залежність дисперсії оцінки відносного пеленгу $D(\beta^*)$ від напрямку на ДРВП β для фіксованих значень відношення сигнал/шум за потужністю q^2

При цьому абсолютна величина дисперсії зворотно пропорційна відношенню сигнал/шум, що більш наочно показано на графіку залежності $D(\beta^*)$ від

q^2 у напрямку нормалі до бази антенної системи (рис. 2).

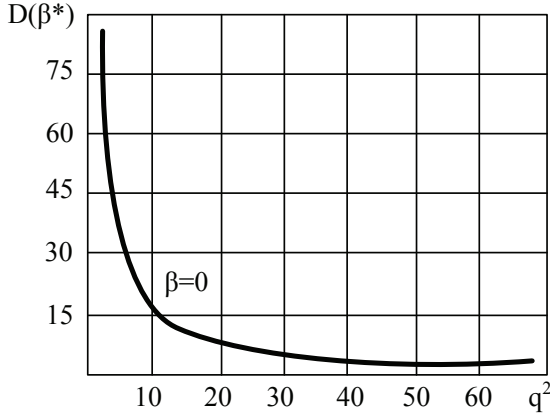


Рис. 2. Залежність дисперсії оцінки відносного пеленгу $D(\beta^*)$ від відношення сигнал/шум q^2

Дисперсія оцінки, а отже – точність визначення відносного пеленгу на ДРВП для фазових пеленгаторів, також залежить від розмірів відносної бази їх антенної системи d/λ . У напрямку нормалі до фазометричної бази ($\beta = 0$) при відношенні сигнал/шум $q^2 = 10$ ця залежність має вигляд, наведений на рис. 3, з якого видно, що для підвищення точності пеленгування розміри відносної фазометричної бази пеленгатора d/λ необхідно збільшувати.

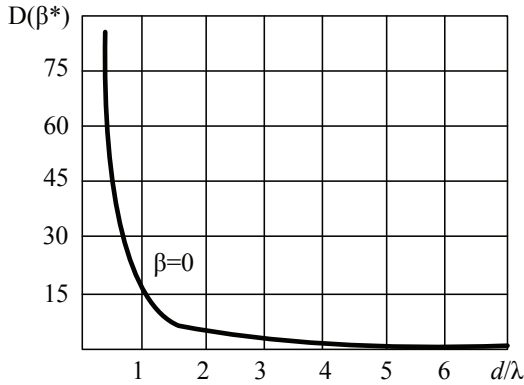


Рис. 3. Залежність дисперсії оцінки відносного пеленгу $D(\beta^*)$ від величини відносної фазометричної бази d/λ при відношенні сигнал/шум $q^2 = 10$

Слід відмітити, що вираз (2) коректний лише для невеликої, достатньо лінійної ділянки функції ДХ, що знаходиться навколо нормалі до бази пеленгатора. Для збільшення розміру цієї ділянки та уточнення результатів, отриманих за їх допомогою, у розкладі функції $\beta = f(x_i)$, $i = 3$ в ряд Тейлора треба враховувати і третій, нелінійний квадратичний член. У цьому випадку математичне очіку-

вання $E(\beta^*)$ та дисперсія $D(\beta^*)$ оцінок пеленгу β^* будуть визначатися точніше і за такими виразами [23, 24]:

$$E(\beta^*) = [f(x_i)]_E + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial^2 \beta^*}{\partial x_i^2} \right)_E \sigma_{\text{КВ}}, \quad (3)$$

де $\sigma_{\text{КВ}}$ – дисперсія шуму у квадратурних каналах пеленгатора;

$$D(\beta^*) = \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial \beta^*}{\partial x_i} \right)_E^2 \sigma_{\text{КВ}}^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial^2 \beta^*}{\partial x_i^2} \right)_E^2 \sigma_{\text{КВ}}^4 + \sum_{i < j} \left(\frac{\partial^2 \beta^*}{\partial x_i \partial x_j} \right)_E^2 \sigma_{\text{КВ}}^4, \quad (4)$$

де другий доданок правої частини виразу (4), що враховує нелінійність ДХ, матиме вигляд:

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial^2 \beta^*}{\partial x_i^2} \right)_E^2 \sigma_{\text{КВ}}^2 = \frac{2\lambda_S}{\pi d \cos \beta^*} \frac{\sigma_{\text{КВ}}^2}{S^2} \times \left[2tg2\varphi \left(1 - \frac{1}{\cos^3 2\varphi} \right) - \frac{\lambda_S}{2\pi d} \frac{tg\beta^*}{\cos \beta^*} \right], \quad (5)$$

де S – амплітуда прийнятого сигналу; d – величина фазометричної бази пеленгатора; φ – різниця фаз у каналах пеленгатора.

Однак ця особливість вже описана в [23, 24] і додаткового пояснення не потребує.

З урахуванням наведеного, максимальний виграш у точності пеленгування можна оцінити шляхом порівняння дисперсій у грубому й точному каналах за загальним виразом (2):

$$K = \frac{D(\beta_{\text{T}}^*)}{D(\beta_{\text{Г}}^*)} = \left(\frac{d_{\text{T}}}{d_{\text{Г}}} \right)^2 = \left(\frac{\sigma_{\text{T}}}{\sigma_{\text{Г}}} \right)^2. \quad (6)$$

Іншими словами, виграш у точності пеленгування від застосування двобазової схеми фазового пеленгатора, виражений через відношення середньоквадратичних похибок (СКП) каналів грубого і точного пеленгування, дорівнює зворотному відношенню величин фазометричних баз цих каналів, що вказує на можливість оцінювання ступеня підвищення точності пеленгування через співвідношення баз та обумовлює вимогу щодо забезпечення максимальної різниці величин фазометричних баз каналів грубого й точного пеленгування.

З іншого боку, для усунення неоднозначності пеленгування при виборі однозначного і точного значення пеленгу за критерієм (1) необхідно, щоб довірчий інтервал, обумовлений СКП $\sigma_{\beta_{\text{T}}^*}$ визначення пеленгу у каналі грубого пеленгування, не перевищував ширину однозначної ділянки ДХ каналу точного пеленгування. Довірчий інтервал оцінки пеленгу у каналі грубого пеленгування обирається за правилом "трьох сигм", при цьому, значення функції $tg\beta^*$ у виразі (5) не повинне перевищувати

величину $\pm\pi/2$, тобто:

$$\frac{2\pi d_T}{\lambda_S} |\sin \beta^*| \leq \frac{\pi}{2}; \quad \frac{2\pi d_T}{\lambda_S} |\sin(3\sigma_{\beta_T}^*)| \leq \frac{\pi}{2};$$

$$\frac{d_T}{\lambda_S} \leq \frac{1}{4 |\sin(3\sigma_{\beta_T}^*)|} . \quad (7)$$

Як видно, отримана нерівність (7) є умовою забезпечення перекриття довірчого інтервалу оцінки пеленгу грубого каналу однозначною ділянкою ДХ точного каналу. Залежність граничних розмірів відносної бази каналу точного пеленгування від заданих значень СКП оцінки пеленга у каналі грубого пеленгування, що розрахована за виразом (7), наведена на рис. 4.

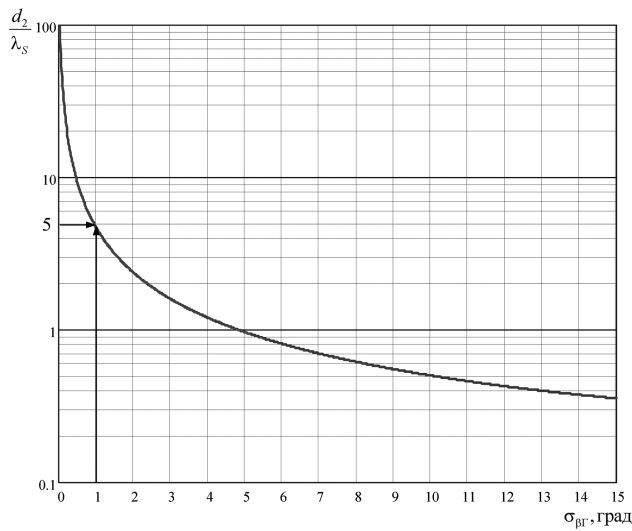


Рис. 4. Залежність відносної бази точного каналу пеленгування від СКП пеленгування у грубом каналі

З аналізу рис. 4 видно, що найбільший вигрaш від застосування каналу точного пеленгування буде спостерігатись в області мінімальних значень СКП пеленгування грубого каналу σ_{β_T} . Але надійна робота пеленгатора при величині бази каналу точного пеленгування, що дорівнює $d_T = 5\lambda_S$, потребує, як видно з рис. 4, забезпечення величини СКП пеленгування у грубом каналі не більше 1° , що не завжди реально реалізувати на практиці.

Для аналізу характеру залежності дисперсії оцінки пеленга в каналі грубого пеленгування, для відношень сигнал/шум за потужністю $q^2 = (4, 10, 100 \text{ та } 1000)$ за виразом (7) проведені розрахунки та побудовані графіки залежності відповідної СКП грубих оцінок пеленгу $\sigma_{\beta_T} = \sqrt{D(\beta^*)}$ (рис. 5), з яких видно, що СКП грубого пеленгування σ_{β_T} має досить широку горизонтальну ділянку в межах сектору $\pm 10^\circ$ і більше, але досягає прийнятних величин ($1 - 3^\circ$) лише при відношенні сигнал/шум $q^2 \approx 100 \dots 1000$, що не завжди забезпечується на практиці. Тому використання у якості каналу точного пеленгування схеми фазового пеленгатора з базою $d_T = 0,5\lambda_{S_{min}}$ доцільно лише у

сприятливих умовах: при прийомі потужних сигналів або на малих відстанях, коли відношення сигнал/шум дуже велика величина, що забезпечує потрібну точність грубих оцінок пеленгу.

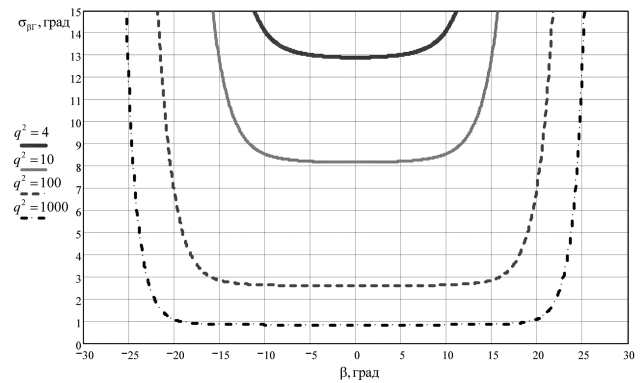


Рис. 5. Залежність СКП оцінок пеленгу каналу грубого пеленгування від величини відносного пеленгу при фіксованому відношенні сигнал/шум

Залежність СКП пеленгування σ_β від q^2 уздовж нормалі до фіксованих фазометричних баз пеленгування $d = (0,5; 1; 2; 3; 5)\lambda_S$, що розрахована за виразом (7), наведена на рис. 6.

Аналіз наведених графічних залежностей свідчить, що в реальних умовах роботи пеленгатора при відношенні сигнал/шум $q^2 \approx 10$ для досягнення прийнятної точності вимірювань у фазовому тракті грубого пеленгування необхідно обирати відносну базу не меншу за величину $d \geq 2\lambda_S$. Очевидно, що на таких базах без суворого обмеження сектору прийому канал грубого пеленгування втрачає здатність до виконання своєї основної функції – усунення неоднозначності вимірювання пеленгу.

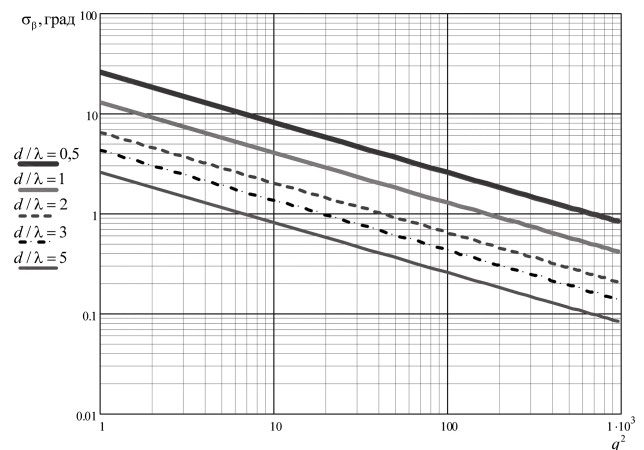


Рис. 6. Залежність СКП оцінок пеленгу від відношення сигнал/шум за потужністю для фіксованих баз пеленгування $d = (0,5; 1; 2; 3; 5)\lambda_S$

Таким чином, вимога щодо однозначності грубих оцінок пеленгу фазовим методом у максимальному можливому секторі суперечить вимозі їх достатньої точності, необхідної для надійного усунення неоднозначності вимірювань у каналі точного пеленгування при малих значеннях відношення сигнал/шум.

Це протиріччя можна вирішувати двома шляхами. Перший – використанням багатобазових (від трьох і більше) фазометричних схем, які відрізняються значною складністю та високими вимогами до ідентичності значної кількості схемних елементів і вузлів у порівнянні із двобазовою. Другий – побудовою каналу грубого пеленгування на базі іншого, більш простого у реалізації моноімпульсного методу, наприклад амплітудного. Необхідність обмеження сектору прийому на базах, що перевищують величину $d \geq \lambda_S/2$, потребує використання направлених антен і забезпечує умови для реалізації амплітудного методу пеленгування, де для створення амплітудної дискримінаційної характеристики осі антен пеленгатора повинні бути розведені приблизно на кут $\theta = 2\beta_0$, де $\beta_0 = 0,5\Delta\beta$ – ширина діаграми направленості антен на рівні 0,5. Однак ці питання виходять за межі даної статті і можуть бути розглянуті окремо.

3 Перспективи подальшого розвитку дослідження

Одним з напрямів подальших досліджень можна вважати вирішення завдання розроблення комбінованого амплітудно-фазового методу (способу) пеленгування з проведенням синтезу структурних схем пристроїв, що проводять моноімпульсне пеленгування ДРВП телекомунікаційних мереж, які забезпечують отримання оптимальної оцінки відносного пеленгу за критерієм максимальної правдоподібності, проведення аналізу та оцінювання їх якісних показників.

Висновки

1. Проблема ситуація, яка обумовлена існуючою суперечністю між сучасними вимогами до забезпечення високої швидкодії, точності та достовірності під час радіомоніторингу джерел радіовипромінювань, і технічними можливостями сучасних апаратних засобів спостереження, може бути вирішена використанням моноімпульсних режимів визначення параметрів вхідних сигналів та їх пеленгування.
2. Використання моноімпульсного двоканального фазометричного методу пеленгування забезпечує отримання незміщених, ефективних і оптимальних оцінок пеленгу на джерела радіовипромінювання з заданою ймовірністю та мінімальними математичним очікуванням і дисперсією.
3. Мінімізація математичного очікування і дисперсії статистичних оцінок пеленгу на джерело радіовипромінювання при застосуванні

двоканального фазометричного методу може бути забезпечена раціональним вибором величини фазометричних баз грубого і точного каналів та залежить від відношення сигнал/шум на вході пеленгатора і точності вимірювання несучої частоти.

4. Виграш у точності пеленгування при застосуванні двобазових фазових пеленгаторів визначатиметься відношенням середньоквадратичних похибок каналів грубого і точного пеленгування та дорівнює зворотному відношенню величин фазометричних баз обох каналів.
5. Мінімальні середньоквадратичні похибки і максимальні величини сектору прийому при використанні двобазових фазових пеленгаторів забезпечуються тільки при великих значеннях відношення сигнал/шум. При малих відношеннях сигнал/шум двобазовий фазовий пеленгатор втрачає здатність до виконання власних функцій, що потребує подальшого вдосконалення моноімпульсних методів пеленгування (наприклад розробки та застосування комбінованого амплітудно-фазового методу або способу та синтезу схем його практичної реалізації).

Перелік посилань

1. Рембовский А. М. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / А. М. Рембовский, А. В. Ашихмин, В. А. Козьмин; под ред. А. М. Рембовского. – М. : Горячая линия – Телеком, 2010. – 624 с.
2. Радзиевский В.Г. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. / В.Г. Радзиевский, П.А.Трифонов. – М.: Радиотехника, 2009. – 288 с.
3. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. – М. : Радио и связь, 1981. – 416 с.
4. Слободянюк П. В. Довідник з радіомоніторингу / П. В. Слободянюк, В. Г. Благодарний, В. С. Ступак; під. заг. ред. П. В. Слободянюка. – Ніжин : ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2008. – 588 с.
5. Tuncer T., Friedlander B. Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation. – Academic Press, 2009, 456 p.
6. Y. Meng, P. Stoica and K. M. Wong (1997) Estimation of the directions of arrival of spatially dispersed signals in array processing, IEE Proc.–Radar, Sonar Navigat., vol. 143, no. 1, pp. 1–9.
7. L. Zhang, Y. Liu, J. Yu and K. Liu (2018) Low-Complexity Spatial Parameter Estimation for Coherently Distributed Linear Chirp Source, in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 75843-75854.
8. Нечаев Ю. Б., Пешков І. В. і Фуртунова Н. А. (2018) Оцінка границі Крамера-Рао випуклих антенних решіток з направленими випромінювачами для радіопеленгації, *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*, 0(75), с. 16-24.

9. Войтко В. В., Ільницький А. І. Математична модель процесу вимірювання миттєвої частоти джерел радіовипромінювання фазометричними пристроями інтерференційного типу. *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*. – 2017. – № 70. – с. 17-22. doi: 10.20535/RADAP.2017.70.17-22.
10. Светозаров В.В. Основы статистической обработки результатов измерений / В.В. Светозаров. – М.: МИФИ, 2005. – 400 с.
11. Логачев С.В. Дослідження методів ідентифікації радіотехнічних вимірів при супроводі близько розташованих об'єктів / С.В. Логачев, Г.В. Худов, Р.В. Дзюбчук / Збірник наукових праць Житомирського військового інституту імені С.П. Корольова. – 2013. – №8. – с. 47–53.
12. Ткалич В.Л. Обработка результатов технических измерений / В.Л. Ткалич, Р.Я. Лобковская. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. – 72 с.
13. Павлюк В. В. Підходи до побудови багатоканальних програмновизначених комплексів радіоконтролю телекомунікаційних мереж / В.В. Павлюк // *Системи обробки інформації*. – 2018. – № 2(153). – С. 144-151. DOI: 10.30748/soi.2018.153.18.
14. Jackson R. Direction of arrival estimation using directive antennas in uniform circular arrays / Jackson Brad R., Sreeraman Rajan, Bruce J. Liao and Sichun Wang // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2015. – Vol. 63, no. 2. – pp. 736-747.
15. Mohammadi S. Direction of Arrival Estimation in Conformal Microstrip Patch Array Antenna / S. Mohammadi, A. Ghani, S. H. Sedighy // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2018. – Vol. 66, Iss.1. – pp. 511–515.
16. Tsyoporenko V. V. Development of direct method of direction finding with two-dimensional correlative processing of spatial signal / V. V. Tsyoporenko, V. G. Tsyoporenko // *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. Information and controlling system*. – 2016. – Vol 6, №9(84). – pp. 63–70.
17. Ципоренко В. В., Ципоренко В. Г., Чухов В. В. і Андреев О. В. (2018) Аналіз точності безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з двовимірною кореляційною обробкою просторового сигналу, *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*, 0(72), с. 23-31.
18. Jian Y. Long baseline direction finding and localization algorithms for noise radiation source / Y. Jian, C. Wangjie, L. Lei, N. Xiaokang // *Proc. of the 12th International Conference Signal Processing (ICSP)*. – 2014. – 19–23 Oct. pp. 52–57.
19. Родс Д.Р. Введение в моноимпульсную радиолокацию / Пер. с англ. В.М.Герасимова, под ред. Л.Д.Бахраха. – М.: Сов.радио, 1960/ – 160 с.
20. Wiesbeck W. Radar 2020: The Future of Radar Systems / W. Wiesbeck, Sit L., M. Younis, T. Rommel, G. Krieger and A. Moreira // *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, At Milano, 2015.
21. Cook B. Real-Time Radar-Based Tracking and State Estimation of Multiple Non-Conformant Aircraft / B. Cook, T. Arnett, O. Macmann, M. Kumar // *SciTech Forum, Grapevine, Texas*, 9 - 13 January 2017.
22. Леонов А.И. Моноимпульсная радиолокация. / А.И.Леонов, К.И.Фомичев. – М.: Сов. радио, 1970. – 392 с.
23. Войтко В.В., Ільницький А.І., Казаров А.А. Спосіб двоканального фазового моноімпульсного пеленгування джерел радіовипромінювання станціями радіомоніторингу. – Деклараційний патент № 107503 на корисну модель U 2015 12210. – Бюл. №11 від 10.06.2016 р.
24. Войтко В.В., Ільницький А.І., Казаров А.А. Пристрій двоканального однобазового моноімпульсного вимірювання пеленгу на джерело радіовипромінювання станціями радіомоніторингу на несучій частоті входних сигналів. – Деклараційний патент № 122275 на корисну модель U 2017 08068. – Бюл. №24, 26.12.2017 р.

References

- [1] Rembovskij A. M. ed., Ashimhin A. V. and Koz'min V. A. (2010) *Radiomonitoring: zadachi, metody, sredstva*, Moscow, Goryachaya liniya - Telekom, 624 p.
- [2] Radzievskij V. G. and P. A. Trifonov (2009) *Obrabotka sverhshirokopolosnyh signalov i pomekh*, Moscow, Radiotekhnika, 288 p.
- [3] Shirman YA. D. and Manzhos V. N. (1981) *Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokatsionnoy informatsii*, Moscow, Radio i svyaz', 416 p.
- [4] Slobodyanyuk P. V. eds., Blagodarnii V. G. and Stupak V. S. (2008) *Dovidnik z radiomonitoringu* [Reference of radio monitoring]. Nizhin, Aspekt-Poligraf, 588 p.
- [5] Tuncer T. and Friedlander B. (2009) *Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation*, Academic Press, 456 p.
- [6] Meng Y., Stoica P. and Wong K. (1996) Estimation of the directions of arrival of spatially dispersed signals in array processing. *IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, Vol. 143, Iss. 1, pp. 1-9. DOI: 10.1049/ip-rsn:19960170.
- [7] Zhang L., Liu Y., Yu J. and Liu K. (2018) Low-Complexity Spatial Parameter Estimation for Coherently Distributed Linear Chirp Source. *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 75843-75854. DOI: 10.1109/access.2018.2883530.
- [8] Nechaev Y. B., Peshkov I. V. and Fortunova N. A. (2018) Evaluating Cramer-Rao Bound for Conformal Antenna Arrays with Directional Emitters for Doa-Estimation. *Visnyk NTUU KPI Seriya - Radiotekhnika Radioaпаратobuduvannia*, Iss. 75, pp. 16-24. DOI: 10.20535/radap.2018.75.16-24.
- [9] Voitko V. V. and Ilnytskyi A. I. (2017) Mathematical model of instantaneous frequency measuring process of radioemission phasemeasuring sources by interference type devices. *Visnyk NTUU KPI Seriya - Radiotekhnika Radioaпаратobuduvannia*, no. 70, pp. 17-22. doi: 10.20535/RADAP.2017.70.17-22.
- [10] Svetozarov V. V. (2005) *Osnovy statisticheskoy obrabotki rezul'tatov izmerenij*, Moscow, MIFI, 400 p.
- [11] Logachov S. V., Hudov G. V. and Dz'ubchuk R. V. (2013) The research of the methods for identification of radiotechnical measurements accompanied by closely located space objects. *Problemy stvorennia, vyprovuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiynykh system*, No 8, pp. 47-53. (in Ukrainian).
- [12] Tklich V. L. and Lobkovskaya R. Ya. (2011) *Obrabotka rezul'tatov tekhnicheskikh izmerenij*, SPb, SPbGU ITMO, 72 p.

- [13] Pavlyuk V. V. (2018) Approaches to the construction of multi-channel software defined radio control system for the telecommunication networks. *Information processing systems*, no. 2(153), pp. 144-151. DOI: 10.30748/soi.2018.153.18.
- [14] Jackson B. R., Rajan S., Liao B. J. and Wang S. (2015) Direction of Arrival Estimation Using Directive Antennas in Uniform Circular Arrays. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 63, Iss. 2, pp. 736-747. DOI: 10.1109/tap.2014.2384044.
- [15] Mohammadi S., Ghani A. and Sedighy S.H. (2018) Direction-of-Arrival Estimation in Conformal Microstrip Patch Array Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 66, Iss. 1, pp. 511-515. DOI: 10.1109/tap.2017.2772085.
- [16] Tsyporenko V. and Tsyporenko V. (2016) Development of direct method of direction finding with two-dimensional correlative processing of spatial signal. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, Iss. 9 (84), pp. 63-70. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85599.
- [17] Tsyporenko V. V., Tsyporenko V. G., Chukhov V. V. and Andreiev O. V. (2018) Analysis of Accuracy of Direct Digital Method of Correlative-Interferometric Direction Finding with Two-Dimensional Correlative Processing of Spatial Signal. *Visnyk NTUU KPI Seriya - Radioelekhnika Radioaparotobuduvannia*, Iss. 72, pp. 23-31. DOI: 10.20535/radap.2018.72.23-31.
- [18] Yang J., Chen W., Li L. and Ni X. (2014) Long baseline direction finding and localization algorithms for noise radiation source. *2014 12th International Conference on Signal Processing (ICSP)*, pp. 52-57. DOI: 10.1109/icosp.2014.7014968.
- [19] Rods D. R. (1960) Vvedeniye v monoimpul'snyuyu radiolokatsiyu Moskow, Sov.radio, 160 p.
- [20] Wiesbeck W., Sit L., Younis M., Rommel T., Krieger G. and Moreira A. (2015) Radar 2020: The future of radar systems. *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. DOI: 10.1109/igarss.2015.7325731.
- [21] Cook B., Arnett T. J., Macmann O. and Kumar M. (2017) Real-Time Radar-Based Tracking and State Estimation of Multiple Non-Conformant Aircraft. *AIAA Information Systems-AIAA Infotech @ Aerospace*. DOI: 10.2514/6.2017-1133.
- [22] Leonov A. I. and Fomichev K. I. (1970) Monoimpul'snaya radiolokatsiya, Moskow, Sov. radio, 392 p.
- [23] Voytko V. V., Il'nyts'kyi A. I. and Kazarov A. A. (2016) Sposib dvokanal'noho fazovoho monoimpul'snoho pelenhuvannya dzherel radiovyprominyuvannya stantsiyamy radiomonitorynhu, Patent UA107503.
- [24] Voytko V. V., Il'nyts'kyi A. I. and Kazarov A. A. (2017) Prystriy dvokanal'noho odnobazovoho monoimpul'snoho vymiryuvannya pelenhu na dzherelo radiovyprominyuvannya stantsiyamy radiomonitorynhu na nesuchiy chastoti vkhidnykh syhnaliv, Patent UA122275.

Статистические оценки точности моноимпульсного пеленгования источников радиоизлучения двухканальными фазовыми устройствами

Войтко В. В., Ильницький А. І., Ільяшов О. А., Стейскал А. Б., Марченко А. А.

В статье приведены результаты расчета и анализа зависимости статистических оценок точности пеленгования источников радиоизлучения двухканальными фазовыми моноимпульсными пеленгаторами в среде телекоммуникационных сетей при ведении радиомониторинга. Использование моноимпульсного двухканального фазометричного метода пеленгования источников радиоизлучений обеспечивает получение несмещенных, эффективных и оптимальных оценок с заданной вероятностью и минимальными математическим ожиданием и дисперсией. Полученные оценки могут быть использованы для разработки новых и совершенствования существующих методов моноимпульсного пеленгования источников радиоизлучения с последующим синтезом схем и устройств их реализации.

Ключевые слова: статистическая оценка, источник радиоизлучения, сигнал, база пеленгования, отношение сигнал / шум, длина волны, пеленг, устройство

Statistical Estimates of the Accuracy of Mono-Pulse Direction Finding of Sources of Radioemission by Dual-Channel Phase Devices

Voytko V. V., Il'nyts'kyi A. I., Ilyashov O. A., Steiskal A. B., Marchenko A. O.

Formulation of the problem in general. The practice of radio monitoring indicates that information should be obtained on a time-to-real scale, with maximum speed and minimum time loss; the accuracy of the estimation of the parameters of the radioemission sources and their bearings should be maximized; the probability of recognizing and classifying sources and objects is no less than a given one. This confirms the existence of a problematic situation, which is caused by the existing contradiction between modern requirements for ensuring high speed, accuracy and reliability in the process of obtaining information, data and information and technical capabilities of modern radio monitoring facilities.

Analysis of recent researches and publications. Currently, mono-pulse routing techniques are mainly designed to monitor radar signals where most of the signal parameters are known (example, carrier frequency, duration, period or frequency of pulse repetition, signal spectrum width, frequency deviation, signal to noise ratio). But in the conditions of partial or complete uncertainty of parameters, mono-pulse radar methods lose their efficiency and become unsuitable.

Presenting the main material. The statistical estimates of the accuracy of the mono-pulse two-channel phasometric direction finding method, which provides unbiased, efficient and optimal estimates with a given probability and minimal mathematical expectation and variance, are calculated. The gain in the accuracy of direction finding when using two-phase phase direction finders will be determined by the

ratio of the mean squared errors of the coarse and precise direction channels and equal to the inverse of the magnitudes of the phasometric bases of both channels.

Conclusion. The use of mono-impulse dual-channel phase-finding method and defining the parameters of radio-emission sources ensure unbiased, efficient and optimal estimates with a given probability and minimal mathematical expectation and variance. The minimization of the mathematical expectation and variance of the statistical estimates of the parameters of radio sources when using the two-channel phasometric method can be assured by rational choice of the magnitude of the phasometric bases of coarse and accurate channels and depends on the signal-to-noise

ratio at the input of the direction finder and the accuracy of the carrier frequency measurement.

The perspectives of future researches. One of the directions of further researches can be considered the solution of the problem of development of the combined amplitude-phase method of bearing with synthesis of structural circuits of devices conducting mono-impulse bearing of sources of radio emission of telecommunication networks, which provide optimal estimation of relative radiation analysis evaluation of their quality indicators.

Key words: statistical estimation, radio emission source, signal, bearing base, signal-to-noise ratio, wavelength, bearing, device