

УДК 621.396.96

В.А. Васильєв

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ПОЛІПШЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕЛЕНГАЦІЇ БАГАТОКАНАЛЬНОЇ РАДІОСИСТЕМИ ПРИ ЧАСТОТНО-БАГАТОПРОМЕНЕВОМУ ЗОНДУВАННІ ПРОСТОРУ

У роботі розглянута можливість поліпшення характеристик багатоканальної радіосистеми пеленгації за рахунок додаткового використання надмірної інформації, яка отримана по вихідним ефектам антенно-приймальних каналів із слабо направленими характеристиками при частотно-багатопрореневому зондуванні простору. Ослаблення впливу зміщення нуля дискримінаційної характеристики досягається на основі використання зміщених оцінок, які отримані на виходах двох дискримінаційних кута. Ефективність методу підтверджується результатами розрахунку та математичного моделювання.

**Ключові слова:** дискримінаційна характеристика, частотно-багатопрореневе зондування, вимірювач.

### Вступ

**Постановка задачі.** Теорія побудови та практична реалізація багатоканальних систем із загальною для всіх каналів приймання несучою частотою, досліджені досить добре. У таких системах сигнали на входах приймальних каналів мають однакові інтенсивності. Відмінність інтенсивностей сигналів каналів виявляється в частотно-багатопрореневих системах. Останні в режимах випромінювання й приймання формують у просторі (у площині пеленгації) віяло променів, які перекриваються та налаштовані на різні несучі частоти. Сигнали, прийняті різними променями (каналами), як правило, відрізняються по інтенсивності і є просторово-некогерентними по амплітуді та фазі. Для такої моделі сигналу методи побудови й аналізу багатоканальних пеленгаторів, які представляють практичний інтерес, вивчені недостатньо й вимагають подальшого розвитку.

**Аналіз літератури.** У відомій літературі [1 – 6], яка присвячена частотно-багатопрореневим радіолокаторам (РЛ), достатньо мало відомостей щодо методів побудови багатоканальних пеленгаторів і розрахунку їх статистичних характеристик. Так, у [4] розглянута можливість визначення висоти цілі в РЛ з частотно-багатопрореневими антенними решітками (АР) за рахунок випромінювання імпульсів різних частот і їх приймання окремими каналами. Але в [4] відсутній опис методу і характеристики точності визначення кута місця. Відповідно відсутні дані щодо операції сумісної обробки сигналів, які прийняті різними каналами. Інший варіант РЛС з частотно-багатопрореневий АР у вертикальній площині описан в [5]. Суміжні промені перетинаються на рівні половинної потужності. Відбиті сигнали обробляються в окремих приймальних каналах, кожен з яких приймає сигнали на відповідній частоті. Кут місця (висота) цілі визначається при обертанні АР по азимуту методом порівняння тривалості пачок сигналів, які прийняті двома суміжними променями. Недоліком даного методу є неможливість вимірювання кутової координати при нерухомій антені і порівняльно велике зна-

чення середньоквадратичної похибки вимірювання кута місця (0,3...0,15 ширини променя на дальності 50...100 км). На основі оцінок, які отримані з умови максимуму відношення правдоподібності, в [6] наведені алгоритми синтезу й статистичні характеристики багатоканальних неслідкуючих вимірювачів (дискримінаційних) кута при частотно-багатопрореневому зондуванні простору. Підвищення точності пеленгації досягається використанням надмірної інформації й переходом до поканальних нормованих статистик. У розвитку [6] у даній роботі вирішується задача підвищення можливостей пеленгації без переходу до нормованих статистик каналів приймання.

**Мета роботи** – розробка методу підвищення ефективності багатоканальної пеленгації при частотно-багатопрореневому зондуванні простору за рахунок використання надмірної інформації і ослаблення впливу зсуву оцінок.

### Основна частина

**Початкові співвідношення.** При частотно-двопрореневому зондуванні простору в режимі випромінювання і приймання антенна решітка формує дві частотно-рознесені в просторі характеристики спрямованості  $f_1(\alpha)$  і  $f_2(\alpha)$  (рис.1).

На рис. 1 характеристики  $f_{1,2}(\alpha)$  побудовані для випадку із спадом розподілу амплітуди по краях решітки – розподілу типу «косинус на п'єдесталі».

На різних частотах приймання амплітудні множники й початкові фази складових сигналу змінюються випадково й незалежно [2, 4]. Тому сигнали, які приймаються різними каналами, відрізняються по інтенсивності і є просторово-некогерентними.

Щільності розподілу амплітудних множників вважаємо релєївськими, а початкових фаз – рівномірними на інтервалі  $(0, 2\pi)$ . Для такої моделі сигналу логарифм відношення правдоподібності  $\ln l = \ln l_1 + \ln l_2$  визначається через аналогічні статистики каналів приймання [2, 6]:

$$\ln l_{1,2} = \frac{1}{2} |Z_{1,2}|^2 \cdot f_{1,2}^2(\alpha) + \text{const}. \quad (1)$$

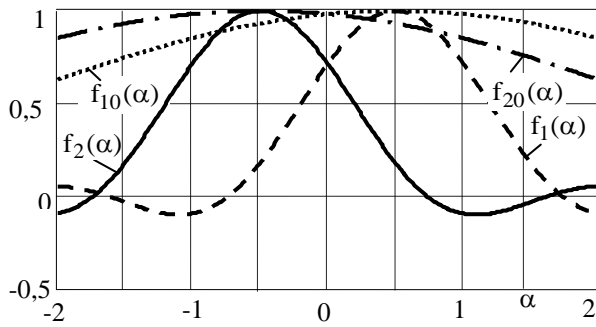


Рис. 1. Характеристики спрямованості антенної решітки при частотно-двопроменевому зондуванні простору

У цьому виразі

$$|Z_{1,2}| = \frac{1}{N_0} \left| \int_{-\infty}^{\infty} Y_{1,2}(t) X^*(t) dt \right| \quad (2)$$

$Z_{1,2}$  – модульні значення вагових (кореляційних) інтегралів часової обробки першого й другого каналів;  $Y_{1,2}(t)$  – комплексні амплітуди прийнятих коливань першим і другим каналами;  $X(t)$  – комплексна амплітуда очікуваного сигналу;  $N_0$  – спектральна щільність потужності внутрішнього шуму.

При великих відношеннях сигнал-шум, коли виконуються умови регулярного вимірювання, оцінка напрямку приходу сигналу  $\hat{\alpha}_y$  визначається з рівняння правдоподібності [2]

$$d \ln l / d\alpha = 0 \text{ при } \alpha = \hat{\alpha}_y. \quad (3)$$

Після підстановки (1) в (3), доповнення суми квадратів до квадрата суми і використання (при малих відхиленнях оцінки  $\hat{\alpha}_y$  від напрямку настроювання суміжних променів  $\alpha = \hat{\alpha}_0 = 0$ ) співвідношень для перших похідних  $f_2'(\hat{\alpha}_y) = -f_1'(\hat{\alpha}_y)$ ,  $f_1'(\hat{\alpha}_y) = f_2'(\hat{\alpha}_y)$  і  $f_2'(\hat{\alpha}_y) = -f_1'(\hat{\alpha}_y)$ , отримаємо [6]

$$d[|Z_1| \cdot f_1(\alpha) + |Z_2| \cdot f_2(\alpha)] / d\alpha = 0 \text{ при } \alpha = \hat{\alpha}_y. \quad (4)$$

Для визначення вихідного ефекту дискримінатора в околиці рівносигнального напрямку  $\alpha = \hat{\alpha}_0 = 0$  характеристики  $f_1(\alpha)$  і  $f_2(\alpha)$  можна розкласти в ряд Тейлора і обмежитися першими трьома членами. З урахуванням цього згідно (4) вихідний ефект дискримінатора кута можна привести до вигляду

$$\alpha - \hat{\alpha}_0 = \gamma (|Z_1| - |Z_2|) / (|Z_1| + |Z_2|),$$

де  $\gamma = |f_1'(\alpha)| / |f_2'(\alpha)|$  – коефіцієнт пропорційності.

Оскільки напрям приходу сигналу  $\alpha = \alpha_c$  і коефіцієнт пропорційності  $\gamma$  заздалегідь не відомі, то визначення кутової координати доцільно провести по вихідному ефекту дискримінатора

$$\Delta_1 = (|Z_1| - |Z_2|) / (|Z_1| + |Z_2|), \quad (5)$$

а потім визначити пеленг, користуючись градуальною кривою або таблицею.

Згідно (5) нерівність інтенсивності сигналів на різних частотах, які входять в  $|Z_{1,2}|$ , приводить до зсуву нуля дискримінаторної характеристики (ДХ), отже, зсуву оцінки  $\hat{\alpha}_y$  і зниженню точності пеленгації (вимірювання). Величина зсуву залежить від відношення інтенсивностей сигналів, прийнятих на різних частотах, і часто виявляється превалюючою похибкою вимірювання. Так, для значень відношення амплітудних множників сигналів другого і першого частотних каналів  $b_2/b_1=4$  і  $b_2/b_1=10$  величина зсуву складає 0,24 та 0,37 ширини променя відповідно (рис. 2).

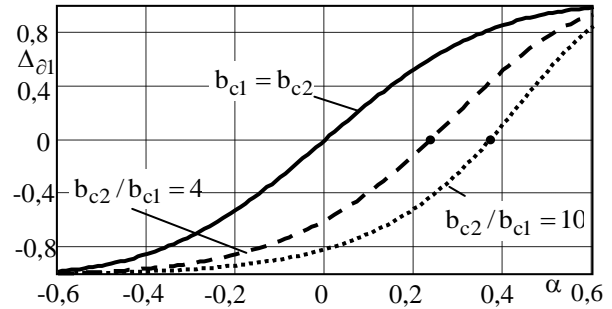


Рис. 2. Дискримінаторні характеристики каналів приймання для різних значень відношення їх інтенсивностей

**Алгоритм визначення незміщеної оцінки.** Покажемо, що разом з оцінкою  $\hat{\alpha}_y$  використання надмірної інформації у вигляді зміщеної, у загальному випадку, оцінки  $\hat{\alpha}_{y0}$  дозволить істотно ослабити вплив зсуву ДХ або оцінки на точність пеленгації. Оцінка, як і раніше, знаходиться згідно (5) по вихідному ефекту дискримінатора кута з гостронаправленими характеристиками  $f_1(\alpha)$  і, а оцінка – згідно

$$\Delta_2 = (|Z_{10}| - |Z_{20}|) / (|Z_{10}| + |Z_{20}|) \quad (6)$$

тобто по вихідному ефекту дискримінатора кута із слабонаправленими характеристиками  $f_{10}(\alpha)$  й  $f_{20}(\alpha)$  (рис. 1). На рис. 3 наведені розраховані згідно (5) та (6) незміщені  $\Delta_1 = \Delta_1(\alpha)$ ,  $\Delta_2 = \Delta_2(\alpha)$  і зміщені  $\Delta_1 = \Delta_1'(\alpha)$ ,  $\Delta_2 = \Delta_2'(\alpha)$  дискримінаторні характеристики. Вони відрізняються по крутості й ширині робочої ділянки. На рис. 3 напрямком приходу сигналу  $\alpha_{c1}$  позначено стрілкою.

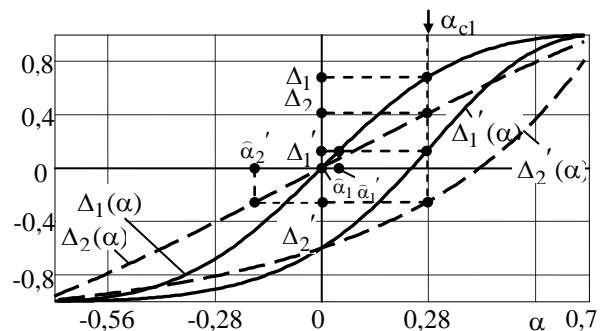


Рис. 3. Незміщені та зміщені дискримінаторні характеристики

У випадку рівності інтенсивностей сигналів різних частот (відношення амплітудних множників сигналів  $b_{c1}/b_{c2}=1$ ) оцінки  $\hat{\alpha}_y$  й  $\hat{\alpha}_{y0}$  визначаються по вихідним ефектам  $\Delta_1$  і  $\Delta_2$  дискримінаторів із незміщеними характеристиками  $\Delta_1(\alpha)$ ,  $\Delta_2(\alpha)$  і збігаються з точністю до середньоквадратичних похибок. Якщо  $b_{c1}/b_{c2} \neq 1$  ( $b_1 = 1$ ,  $b_2 = 4$  на рис. 3, рис. 4), то оцінки  $\hat{\alpha}_y = \hat{\alpha}'_1$  і  $\hat{\alpha}_{y0} = \hat{\alpha}'_2$  визначаються по вихідним ефектам  $\Delta'_1$  і  $\Delta'_2$  дискримінаторів із зміщеними характеристиками (рис. 3). Оцінки  $\hat{\alpha}'_1$  й  $\hat{\alpha}'_2$  не співпадають та істотно відрізняються від напрямку приходу сигналу  $\alpha_{c1}$ . Однак, використовуючи ці зміщені та неточні оцінки  $\hat{\alpha}'_1$  й  $\hat{\alpha}'_2$ , а також еталонні незміщені характеристики  $\Delta_1(\alpha)$  й  $\Delta_2(\alpha)$ , можна знайти незміщену та точну оцінку  $\hat{\alpha}_p$ .

Дійсно, із точки  $\hat{\alpha}'_1$  опустимо перпендикуляр  $\hat{\alpha}'_1 A$  на відрізок ЕД. При лінійності робочих ділянок ДХ лінія, яка проведена із крапки А паралельно ДХ  $\Delta_2(\alpha)$ , перетне ДХ  $\Delta'_1(\alpha)$  у точці В, що і визначає величину зсуву оцінки  $\hat{\alpha}'_1$ . З рівності трикутників  $\triangle OEA\hat{\alpha}'_2$  і  $\triangle ABP$ ,  $\triangle OQ\hat{\alpha}'_1$  і  $\triangle BC\hat{\alpha}'_1$  (рис. 4) слідує  $|\hat{\alpha}'_1 B| = |\hat{\alpha}'_2|$ ,  $|B\hat{\alpha}'_1| = \hat{\alpha}'_1$ . Відповідно значення зсуву оцінки  $\hat{\alpha}'_1$  дорівнює  $\alpha_{см} = \hat{\alpha}'_1 - \hat{\alpha}'_2$ , а незміщена оцінка

$$\hat{\alpha}_p = \hat{\alpha}'_1 + (\hat{\alpha}'_1 - \hat{\alpha}'_2), \quad (7)$$

що й було потрібно довести.

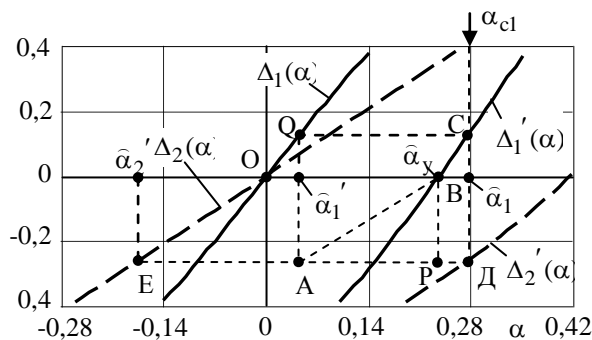


Рис. 4. Пояснення до отримання результуючої незміщеної оцінки

**Особливості використання алгоритму (7) і статистичний аналіз точності оцінювання.** Розглянутий алгоритм є ефективним у випадку збігу знаків напрямів приходу сигналу й зсуву оцінок. Крім того, оцінка  $\hat{\alpha}_p$  отримана для умови, коли вона відповідає лінійним ділянкам незміщених й зміщених ДХ. При більших зсувах ДХ остання умова може порушуватися, що призводить до збільшення похибок вимірювання. Це підтверджується результатами математич-

ного моделювання, які ілюструються на рис. 5. Тут показана залежність похибки  $\varepsilon(\alpha)$  результуючої оцінки (7) від напрямку приходу сигналу: крива 1 для  $b_{c2}/b_{c1}=4$ , а крива 2 для  $b_{c2}/b_{c1}=1$ . Крива 2 близька до аналогічної кривої у випадку отримання оцінки згідно (5). Для значень  $\alpha > 0$ , коли зсув невеликий, збігаються знаки напрямку приходу сигналу та зсуву оцінки (або зсуву нуля ДХ, див. рис. 3) крива 1 практично збігається із кривою 2. При відносно великому зсуві ( $\alpha_{см} > 0,24$ ) похибка оцінювання збільшується.

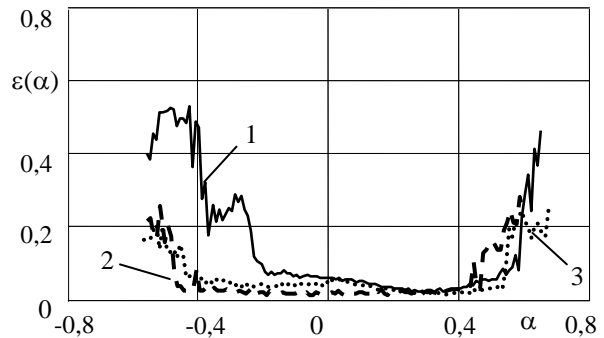


Рис. 5. Залежність похибки результуючої оцінки від напрямку приходу сигналу

Для  $\alpha < 0$ , коли знаки зсуву оцінки і напрямку приходу сигналу не співпадають, має місце помітне збільшення помилки оцінювання (рис. 5). Збільшення особливо проявляється, коли напрям приходу відповідає нелінійним ділянкам зміщених ДХ.

Цей недолік можна усунути, використовуючи апіорну інформацію у вигляді зсуву нуля ДХ  $\Delta_1(\alpha)$  залежно від відомого відношення інтенсивностей сигналів, що входять в  $|Z_{1,2}|$  (рис. 6).

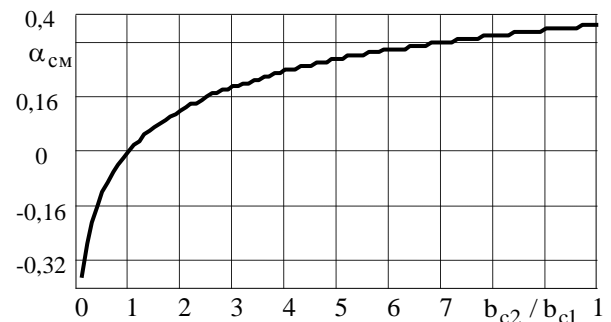


Рис. 6. Залежність зсуву оцінки від відношення інтенсивностей сигналів у суміжних каналах

Мала відмінність вихідних ефектів дискримінаторів  $\Delta'_1(\alpha)$  і  $\Delta'_2(\alpha)$  ( $\alpha < 0$ , рис. 3) і перевищення їх абсолютними значеннями заданого порога вказує на наявність зсуву й розбіжність його знака з напрямом приходу сигналу (для розглянутої на рис. 3 ситуації – зсув вправо і  $b_2 > b_1$ ).

Для підвищення точності оцінювання в даному випадку змінимо інтенсивність сигналу другого каналу приймання у відоме число  $k$  раз.

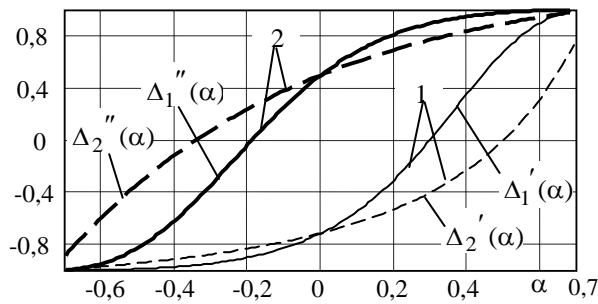


Рис. 7. Дискримінаційні характеристики для різних значень коефіцієнта  $k$

З урахуванням цього вихідні ефекти дискримінацій кута з гостронаправленими й слабонаправленими характеристиками мають вигляд (рис. 7):

$$\Delta_1'' = (|Z_1| - |Z_2|/k) / (|Z_1| + |Z_2|/k); \quad (8)$$

$$\Delta_2'' = (|Z_{10}| - |Z_{20}|/k) / (|Z_{10}| + |Z_{20}|/k). \quad (9)$$

На рис. 7 наведені зміщені характеристики  $\Delta_1'(\alpha)$  і  $\Delta_2'(\alpha)$  (криві 1), а також ДХ розраховані відповідно до виразів (8) і (9) (криві 2). Видно, що для  $-0.6 < \alpha < 0$  залежності  $\Delta_1'(\alpha)$  і  $\Delta_2'(\alpha)$  є нелінійними, у той же час для тих же значень  $\alpha$  характеристики  $\Delta_1''(\alpha)$  і  $\Delta_2''(\alpha)$  (криві 1) є лінійними.

По вихідним ефектам  $\Delta_1''$  і  $\Delta_2''$  дискримінацій відповідно до викладеної вище методики знайдемо оцінки  $\hat{\alpha}_1''$  й  $\hat{\alpha}_2''$  і визначимо зсув оцінки  $\alpha_{см}'' = \hat{\alpha}_1'' - \hat{\alpha}_2''$ . Користуючись наведеною на рис. 6 характеристикою, по величині  $\alpha_{см}''$  визначимо величину відношення інтенсивностей сигналів  $\eta$  і знайдемо результуючу оцінку напрямку приходу сигналу, використовуючи дискримінаційну характеристику

$$\Delta_1''' = (|Z_1| - |Z_2|/(\eta \cdot k)) / (|Z_1| + |Z_2|/(\eta \cdot k)). \quad (10)$$

Використанням ДХ (10) дозволяє значно зменшити похибку результуючої оцінки, що підтверд-

жується результатами математичного моделювання на рис. 5 – крива 3. При співпаданні знаків зсуву оцінки і напрямку приходу сигналу похибка оцінювання обумовлені великими значеннями зсуву також можна знизити, користуючись кривою наведеною на рис. 6.

## Висновки

1. Отримані алгоритми багатоканального неслідувального вимірювання напрямку приходу сигналу при частотно-багатопробному зондуванні простору й використанні надмірної інформації, що отримується по вихідним ефектам приймальних каналів із слабонаправленими характеристиками.

2. Запропоновано метод отримання незміщеної оцінки напрямку приходу сигналу на основі використання зміщених у загальному випадку оцінок, які отримані по виходам двох дискримінацій кута. Ефективність методу підтверджується результатами розрахунку й математичного моделювання.

## Список літератури

1. Проблемы антенной техники / Под ред. Л.Д. Бахраха, Д.И. Воскресенского. – М.: Радио и связь, 1989. – 123 с.
2. Ширман Я.Д., Багдасарян С.Т., Маляренко А.С. и др. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. – М.: Радиотехника, 2007. – 234 с.
3. Справочник по радиолокации: т. 2, т. 4 / Под ред. М. Скольника. – М.: Сов. радио, 1977-1978. – 365 с.
4. Леонов А.И., Фомичев К.И. Моноимпульсная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1984. – 174 с.
5. Гриб Д.А., Голованов В.П., Климченко В.И. та ін. Озброєння та військова техніка РТВ. Побудова РЛС 19Ж6: Навч. посібн. Частина 1. – Х: ХУ ПС, 2007. – 300 с.
6. Багдасарян С.Т., Хачатуров В.Р., Васильев В.А. Многоканальное измерение направления прихода сигнала при частотно-многолучевом зондировании пространства // Прикладная радиоэлектроника. – 2008. – Т. 7, №1. – С. 17-22.

Надійшла до редколегії 28.02.2008

**Рецензент:** д-р техн. нук, проф. В.І. Карпенко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕЛЕНГАЦИИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ РАДИОСИСТЕМЫ ПРИ ЧАСТОТНО-МНОГОЛУЧЕВОМ ЗОНДИРОВАНИИ ПРОСТРАНСТВА

В.А. Васильев

В работе рассмотрена возможность улучшения характеристик многоканальной радиосистемы пеленгации за счет дополнительного использования избыточной информации, полученной по выходным эффектам антенно-приемных каналов со слабонаправленными характеристиками при частотно-многолучевом зондировании пространства. Ослабление влияния смещения нуля дискриминационной характеристики достигается на основе использования смещенных оценок, полученных по выходам двух дискриминаторов угла. Эффективность метода подтверждается результатами расчета и математического моделирования.

**Ключевые слова:** дискриминационная характеристика, частотно-многолучевое зондирование, измеритель.

## IMPROVING OF CHARACTERISTICS OF DIRECTION FINDING OF MULTICHANNEL RADIO SYSTEM WITH FREQUENCY-MULTI-BEAM SOUNDING THE SPACE

V.A. Vasilyev

The capability of improving of direction finding multichannel radio system characteristics at the expense of additional usage of a redundant information which is obtained on output effects of antenna - receiving channels with near-omnidirectional characteristics in the case of frequency-multi-beam sounding was considered. Discriminator characteristic zero drift effect decreasing is reached on the basis of biased estimator using which are obtained on exits of two angle discriminators. Effectiveness of a method confirms results of calculation and mathematical simulation.

**Keywords:** discriminator characteristic, frequency-multi-beam, measure.