



УДК 621.396.67
ГРНТИ 78.25.41

К ВОПРОСУ О СВЕРХРАЗРЕШЕНИИ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

*А.В. ФИЛОНОВИЧ, доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Юго-западный государственный университет» (г. Курск)
В.А. МИРОНОВ, доктор технических наук, профессор
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)*

Выполнен анализ эффективности разрешения-обнаружения-измерения стохастических сигналов в условиях априорной неопределенности сигналов и помех. На основе адаптивного байесовского подхода синтезированы достаточные статистики, учитывающие окрашенные внутренние шумы приемных каналов. Показано, что построенные алгоритмы обладают более эффективными статистическими характеристиками при разрешении-обнаружении-измерении параметров постановщиков активных шумовых помех.

Ключевые слова: обнаружение-измерение, сверхрэлеевское разрешение, байесовский подход, пеленгационная характеристика, смещенность оценок, угловое разрешение.

ON THE ISSUE OF STOCHASTIC SIGNALS SUPERRESOLUTION IN RADAR SYSTEMS

*A.V. FILONOVICH, Doctor of Technical sciences, Professor
South-Western state University (Kursk)
V.A. MIRONOV, Doctor of Technical sciences, Professor
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

The analysis of the efficiency of resolution-detection-measurement of stochastic signals under conditions of a priori uncertainty of signals and interference is performed. Based on the adaptive Bayesian approach, sufficient statistics are synthesized that take into account the colored internal noise of the receiving channels. It is shown that the constructed algorithms have more effective statistical characteristics for resolution-detection-measurement of parameters of active noise interference producers.

Keywords: detection-measurement, super-Rayleigh resolution, Bayesian approach, direction finding characteristic, estimation bias, angular resolution.

Введение. Современные способы радиоэлектронной борьбы со средствами (системами) радиолокации базируются на их подавлении прицельными помехами со следящей или программной погоней за параметрами зондирующих сигналов и воздействию заградительными помехами на объекты с поимпульсной перестройкой параметров излучений [1].

В интересах обеспечения устойчивости функционирования радиолокационных станций (РЛС) реализуются алгоритмы пространственной селекции источников излучений и режекции внешних помех за счет управления характеристиками пространственной избирательности приемных устройств [1, 2]. Решение указанных задач определяет необходимость высокоточной оценки угловых координат или местоположения постановщиков помех в реальном масштабе времени, что, в свою очередь, предполагает наличие высокой разрешающей способности РЛС, превышающей показатели, установленные рэлеевским пределом [2, 3].

Принципиальные возможности повышения разрешающей способности при обработке информационных сигналов в средствах (системах) радиолокации относительно рэлеевского предела продемонстрированы в работах Ширмана Я.Д. [2, 3], а также зарубежных



исследователей Нилссона Н. [4], Хелстром К. [5]. Эффективные способы и технические решения по созданию аппаратуры определения угловых координат объектов в сложной сигнально-помеховой обстановке представлены в трудах Бакулева П.А., Бондарева Л.А., Денисова В.П., Караваева В.В., Кошелева В.И., Куприянова А.И., Мельникова Ю.П., Пономарева Л.И., Рембовского А.М.

За счет использования алгоритмов сверхразрешения [2–5], при высоких отношениях сигнал-шум в приемных каналах и малых флюктуациях амплитудно-фазового распределения обрабатываемых сигналов [6, 7] повышается точность определения координат постановщиков активных шумовых помех (ПАШП), разнесенных на сколь угодно малое угловое расстояние.

Актуальность. Современные РЛС, как правило, построены по принципу многофункциональности и решают задачу совместного разрешения-обнаружения-измерения полезных сигналов и помех. В разных сочетаниях задачи разрешения-обнаружения, разрешения-измерения решались в работах [2–5, 8–13]. В наиболее общей постановке задача обнаружения-разрешения-измерения решена в работах [14–16]. В [17] проведен анализ общих закономерностей измерения параметров радиосигналов многоканальными системами в условиях априорной неопределенности; представлены алгоритмы адаптивного многоканального измерения энергетических параметров радиолокационных сигналов с детерминированной временной структурой и некогерентных во времени сигналов РЛС.

Методы сверхрэлеевского разрешения можно разделить на два класса:

- спектральные методы;
- методы байесовского оценивания.

В настоящее время наиболее подробно в отечественной и зарубежной литературе представлены спектральные методы разрешения, обзор которых выполнен в [18].

Суть спектральных методов заключается в формировании оценок максимального правдоподобия [14] числа и угловых координат источников излучений в пространственных каналах для определения направлений на постановщики и выполнения пространственной компенсации помех [18, 19].

Активно развиваемые спектральные методы сверхразрешения сигналов, в свою очередь, подразделяются на две группы.

Первую группу составляют методы последовательного обзора пространства, к числу которых относятся методы максимального правдоподобия Кейпона, максимальной энтропии Берга, минимальной нормы [18, 19], а также классификации множественных сигналов MUSIC [18]. Они строятся при отсутствии априорной информации о числе разрешаемых и пеленгуемых источников; направления прихода сигналов определяются положениями локальных экстремумов выходной функции пространственной избирательности приемного устройства. Отсутствие адаптации приема к изменяющимся условиям сигнально-помеховой обстановки приводит к тому, что точность пеленгования источников излучения и разрешающая способность определяются показателями эффективности алгоритмов поиска локальных экстремумов выходной функции.

Ко второй группе спектральных методов относятся методы, базирующиеся на параллельном обзоре пространства: методы Прони, Писаренко, ESPRIT, ROOT-MUSIC и их модификации [18, 19]. В основу этих методов положено предположение об ограниченном числе сигналов, не превышающем количество формируемых пространственно-избирательных каналов приема. Оценка числа пеленгуемых объектов выполняется путем анализа собственных векторов корреляционной матрицы входных сигналов пеленгационной системы [18].

Эффективность решения задачи сверхрэлеевского разрешения сигналов зависит не только от взаимного пространственного расположения их источников, конфигурации и размеров антенной системы РЛС, принципов построения вычислительных алгоритмов, определяющих временные затраты на обработку сигналов [7], но и множества других факторов [2, 5, 6, 9, 10].

В предлагаемой работе представлены разновидности методов сверхрэлеевского разрешения сигналов на основе байесовского оценивания угловых координат их источников.



Методы байесовского оценивания, в отличие от спектральных методов сверхразрешения, не ориентированы на предварительное оценивание и обращение корреляционных матриц [18, 19]. Это позволяет достичь существенной экономии вычислительных затрат, а также решать задачи пеленгования и разрешения объектов с малым угловым разносом в реальном масштабе времени при ограничениях на быстродействие цифровых процессоров.

В [20] показано, что метод разрешения Ширмана Я.Д. на основе байесовского подхода при прочих равных условиях эффективней метода разрешения Хелстрема К., в основу которого положены оценки максимального правдоподобия (наименьших квадратов), а при прочих равных условиях спектральные методы проигрывают по показателям качества разрешения двух сигналов.

Недостатками выше изложенных методов является то, что в большинстве случаев такие методы сравниваются не по совокупности, а по наиболее выигрышным показателям эффективности (качества). Не оговариваются четко ограничения, при которых были получены те или иные результаты. Используемые методы имитационного моделирования не всегда достаточно корректно оценивают эффективность моделей [6, 7, 17, 20, 21].

В [21] предложен метод обработки эхо-сигналов одиночных и групповых сосредоточенных целей при воздействии ПАШП с близких к угловым положениям целей направлений, основанный на методе максимального правдоподобия [16]. Он обеспечивает формирование несмещенных оценок пеленгов объектов.

Однако в указанной работе приведены результаты пеленгации двух целей, находящихся на угловых расстояниях 0,5 ширины диаграммы направленности антенны (ДНА) РЛС и удалении пеленга ПАШП от пеленга ближайшей цели 0,25 ширины ДНА РЛС. А что будет, если сократить угловое расстояние до 0,25 ДНА РЛС? А если будут другие соотношения сигнал/шум, помеха/шум и т.д.? Таким образом, вопросы сверхразрешения в задаче разрешения-обнаружения-измерения стохастических сигналов в условиях априорной неопределенности о сигнальной и помеховой обстановке по-прежнему актуальны. Особенно актуальны они для РЛС обзора пространства и целеуказания, т.к. они должны обнаруживать и измерять координаты всех целей, в том числе и ПАШП.

Синтез адаптивных алгоритмов обнаружения-разрешения стохастических сигналов в многоканальных радиолокационных системах.

В настоящей статье исследованы возможности и особенности различных алгоритмов сверхразрешения стохастических сигналов при воздействии ПАШП, направления на которые, как и в [21], близки по значениям к угловым координатам целей.

Синтез алгоритмов адаптивного многоканального обнаружения-разрешения стохастических сигналов в условиях параметрической априорной неопределенности [16, 20–23], проведенный в соответствии с принципами, обоснованными в [20, 21], дает решающую функцию в виде

$$\frac{X_C^*(\alpha)\hat{\Phi}_0^{-1}X_C(\alpha)}{X_C^*(\alpha)\hat{\Phi}_0^{-1}\hat{\Phi}_0^{-1}X_C(\alpha)} \geq \frac{H_1}{H_0} \sigma_{in}^2 \xi_0(F, n), \quad (1)$$

где $\hat{\Phi}_0$ – оценка максимального правдоподобия корреляционной матрицы помех, $X_C(\alpha)$ – вектор-столбец, характеризующий амплитудно-фазовое распределение сигнала на антенной системе, σ_{in}^2 – дисперсия внутренних шумов в каналах приема, $\xi_0(F, n)$ – величина порога, являющаяся однозначной функцией вероятности ложной тревоги F и объема выборки n , * – знак комплексного сопряжения.



При переходе в (1) к весовым векторам по аналогии с [21] получим два решающих правила:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i^* R_H|}{R_H R_H} \geq \frac{H_1}{H_0} \sigma_{uu}^2 \xi_0(F, n), \quad (2)$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i^* R_H| \geq \frac{H_1}{H_0} \sigma_{uu}^2 \hat{R}_H \hat{R}_H \xi_0(F, n). \quad (3)$$

Для сравнения статистических характеристик разрешения-обнаружения-измерения были выбраны алгоритмы, приведенные в таблице 1 [21].

В общем виде обработка принимаемой реализации по различным алгоритмам, приведенным в таблице 1, сводится к весовому суммированию, квадратичному детектированию, накоплению и сравнению результата обработки с порогом.

Таблица 1 – Алгоритмы оценки весового вектора

Номер алгоритма	1	2	3	4	5
Весовой вектор	$R = \Phi^{-1} X$	$R_H^3 = \frac{\Phi^{-1} X}{\sqrt{X^4 \Phi^{-1} X}}$	$R_H^3 = \frac{\Phi^{-1} X}{X^4 \Phi^{-1} X}$	$R_H = \frac{R_H}{\sqrt{R_H^6 R_H}}$	$R_H^3 = \frac{\Phi^{-1} X}{X^4 \Phi^{-1} X}$
Остаточная мощность шумов и помех на выходе	$P_\Sigma = X^6 \Phi^{-1} X$	$P_\Sigma = 1$	$P_\Sigma = \frac{1}{X^6 \Phi^{-1} X}$	$P_\Sigma = \frac{X^6 \Phi^{-1} X}{X^6 \Phi^{-1}}$	$P_\Sigma = \frac{1}{X^6 \Phi^{-1} X}$
Мощность шумов на выходе	$P_{uu} = \sigma_{uu}^2 R' R$	$P_{uu} = \sigma_{uu}^2 R_H^3 R_H^3$	$P_{uu} = \sigma_{uu}^2 R_H^3 R_H^3$	$P_{uu} = \sigma_{uu}^2$	$P_{uu} = \sigma_{uu}^2 R$
Требуемый уровень порога	$\xi_0 = \sqrt{P_\Sigma} \xi_{0H}$	$\xi_0 = f(F)$	$\xi_0 = \sqrt{P_\Sigma} \xi_{0H}$	$\xi_0 = \sqrt{P_\Sigma} \xi_{0H}$	$\xi_0 = \sqrt{P_\Sigma} \xi_{0H}$
Реальный уровень порога	–	–	$\xi_0 = \hat{\sigma}_{uu}^2 \xi_{0H}$	$\xi_0 = \hat{\sigma}_{uu}^2 \xi_{0H}$	$\xi_0 = \hat{\sigma}_{uu}^2 R_H^3 R_H^3 \xi_{0H}$

Отличия алгоритмов связаны, в основном, с величиной весового вектора и порогового уровня, что зафиксировано в таблице 1. Из нее видно, что в первом алгоритме результат обработки требуется сравнить с переменным порогом, величина которого зависит от параметров сигналов и помех. Чтобы исключить эту зависимость, осуществляется оценка нормированного весового вектора R_H (второй алгоритм), а результат обработки сравнивается с постоянным порогом, определяемым заданной вероятностью ложных тревог [2, 5]. Однако реализация такого алгоритма требует наличия классифицированной обучающей выборки, в качестве которой в активной радиолокации используются, например, направления или участки дальности, на которых цели отсутствуют [4, 14].

Получение классифицированной выборки при обнаружении источников активных шумовых помех не представляется возможным из-за отсутствия различий в структуре сигнала и помех. Вместе с тем наличие угловых различий между источниками активных шумовых помех позволяет получить целый ряд практически реализуемых алгоритмов. Несмотря на различие в



структурах, оценка нормированного весового вектора в вышеперечисленных алгоритмах производится одинаково, как показано в таблице 1 (третий алгоритм). Достоинством этих алгоритмов является инвариантность весового вектора к виду корреляционной матрицы $\Phi_{ст}$ или $\Phi_{п}$ [3, 22], поскольку влияние полезного сигнала на цепи корреляционной обратной связи исключено. Представленные алгоритмы могут считаться эффективными с позиций варибельности, поскольку сектора углов, которым могут принадлежать возможные значения оценок направлений прихода сигналов, существенно не изменяются при воздействии шумов [18].

Однако, как видно из таблицы 1 (третий алгоритм), эти методы не обеспечивают нормировку остаточной мощности помех и шумов на выходе обнаружителя, что, в свою очередь, требует установки следящего порога обнаружения. Реально же в этих алгоритмах используется постоянный порог обнаружения, зависящий от уровня внутренних шумов приемного тракта и заданной вероятности ложной тревоги, при этом не обеспечивается стабилизация вероятности ложной тревоги.

Данный факт объясняется, в частности, тем, что в указанном случае уровень собственных шумов на выходе обнаружителя не является постоянным вследствие «окраски» последних по направлению. Влияние «окрашенных» собственных шумов адаптивного обнаружителя на вероятность ложной тревоги можно исключить, вычисляя нормированный весовой вектор R_H (четвертый алгоритм). Нормированный весовой вектор R_H может быть получен непосредственно в устройстве адаптации введением дополнительных цепей регулирования или изменением скалярного нормирующего множителя на выходе устройства адаптации (пятый алгоритм). Как видно из таблицы 1, оба эти алгоритма обеспечивают или стабилизацию внутренних шумов на выходе обнаружителя, или учет их изменения в пороге обнаружения. Последнему алгоритму можно отдать предпочтение, т.к. он не требует вмешательства в цепи автокомпенсатора помех.

Таким образом, важным свойством полученных алгоритмов является стабилизация вероятности ложного обнаружения [22]. Это достигается за счет нормировки мощности шумов на выходе устройства адаптации или использованием следящего порогового уровня. Следящий порог формируется путем вычисления при адаптации суммарной мощности сигналов пропорциональных весовым коэффициентам [3].

Один из вариантов радиолокатора, реализующего алгоритмы 4, 5, приведен на рисунке 1.

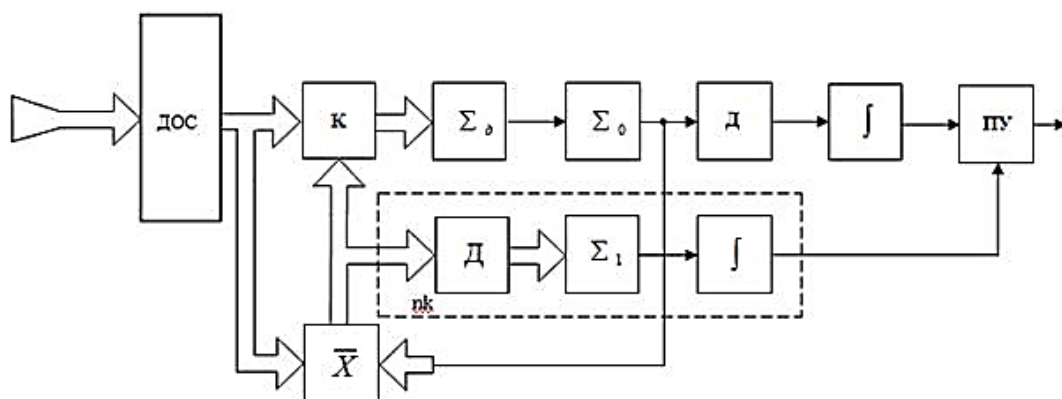


Рисунок 1 – Адаптивная РЛС с многоканальным автокомпенсатором

Оценки предельных показателей эффективности адаптивных обнаружителей для радиолокационных систем. Оценим теперь предельные возможности адаптивных обнаружителей, построенных по алгоритмам 3, 4 и 5 (таблица 1) по следующим показателям:



разрешающая способность, характеризующая возможности выполнять обнаружение сигналов с близкими значениями мощности, поступающих от источников, расположенных с малым разносом по угловым координатам [8, 18];

степень смещения оценки, характеризующая отличия найденных по результатам оценивания направлений прихода сигналов относительно реальных угловых положений их источников [16, 18].

Количественной мерой разрешающей способности является величина, определяемая по критерию Рэлея [16]. Она устанавливает минимальный угловой разнос между одинаковыми по мощности источниками излучения, начиная с которого суммарный отклик устройства, рассматриваемый как функция угловой координаты, имеет два максимума [3, 16]. Прирост эффективности разрешения может достигаться за счет смещения оценок угловых координат объектов [18].

С целью подтверждения полученных теоретических результатов были проведены экспериментальные исследования макетов адаптивных пеленгаторов [22], реализующих алгоритмы функционирования 3, 4 и 5 (таблица 1).

При разрешении-обнаружении-измерении ПАШП формируются достаточные статистики:

$$\alpha = \max \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i^* R_H|^2}{R_H R_H} \right) \geq \frac{H_1}{H_0} \sigma_{ш}^2 \xi_0(F, n), \quad (4)$$

$$\alpha = \max \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i^* R_H|^2 \right) \geq \frac{H_1}{H_0} \sigma_{ш}^2 \hat{R}_H \hat{R}_H \xi_0(F, n). \quad (5)$$

На рисунке 2 приведена структурная схема устройства, реализующего алгоритм адаптивного многоканального разрешения-обнаружения-измерения с нормировкой, а на рисунке 3 – устройства, в основу построения которого положен алгоритм адаптивного многоканального разрешения-обнаружения-измерения с использованием следящего порога.

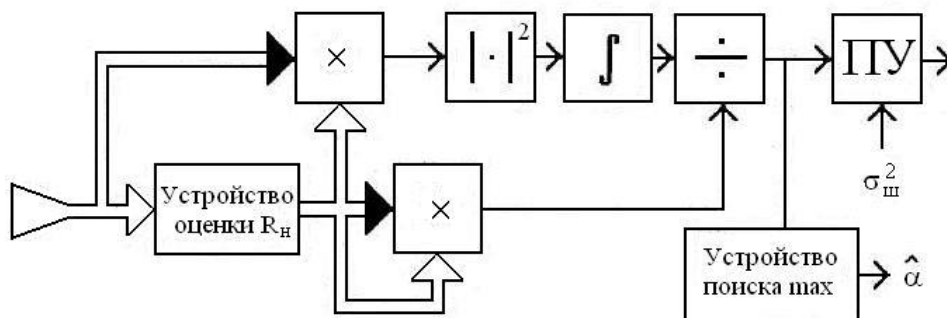


Рисунок 2 – Структурная схема устройства, реализующего алгоритм адаптивного многоканального разрешения-обнаружения-измерения с нормировкой

Оценена смещенность оценок угловой координаты для алгоритмов 3, 4 и 5 (таблица 1); исследованы зависимости смещения оценок при пеленгации двух постановщиков помех с относительной мощностью 10 и 30 дБ в зависимости от их углового разнеса.

Установлено, что предложенные пеленгаторы имеют меньшую смещенность оценки угловой координаты по сравнению с известными измерителями, использующими при измерении координат адаптивный байесовский подход [21, 22], приближаются к оптимальным оценкам [14].

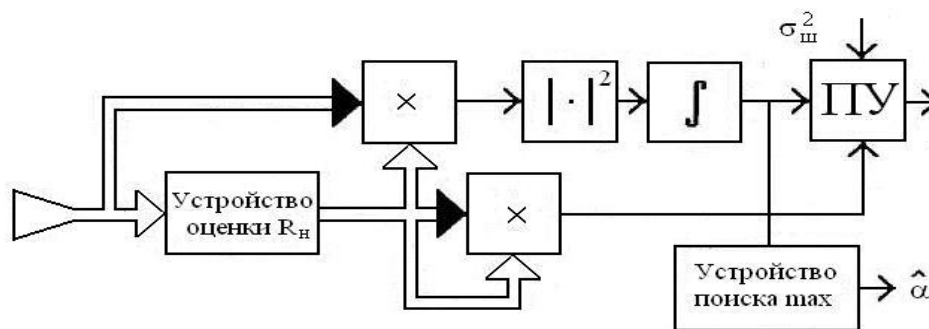


Рисунок 3 – Структурная схема устройства, реализующего алгоритм адаптивного многоканального разрешения-обнаружения-измерения с использованием следящего порога

Выводы. Исследованы пути построения устройств, реализующих алгоритмы адаптивного многоканального разрешения-обнаружения-измерения параметров сигналов со сверхрелеевским разрешением на основе методов байесовского оценивания, являющихся эффективной альтернативой спектральным методам.

Выполнен обзор спектральных методов последовательного обзора пространства (методы максимального правдоподобия Кейпона, максимальной энтропии Берга, минимальной нормы и классификации множественных сигналов MUSIC) и параллельного пространственного поиска (методы Прони, Писаренко, ESPRIT, ROOT-MUSIC и их модификации), реализуемых при отсутствии и наличии априорной информации о числе пеленгуемых сигналов.

По результатам сравнительного анализа метода разрешения Ширмана Я.Д., построенного в рамках байесовского подхода с методом разрешения Хелстрема К., в основу которого положены оценки максимального правдоподобия (наименьших квадратов), установлено, что при равных условиях меньшей эффективностью по показателям качества разрешения двух сигналов обладают спектральные методы.

Построены решающие правила и исследованы возможности сверхразрешения стохастических сигналов РЛС при воздействии ПАШП, направления на которые близки по значениям к угловым координатам целей.

На основе метода максимального правдоподобия получены оценки эффективности разрешения-обнаружения-измерения стохастических сигналов в радиолокационных системах при априорной неопределенности сигналов и помех. На основе адаптивного байесовского подхода синтезированы достаточные статистики при наличии «окрашенных» внутренних шумов приемных каналов РЛС. Установлен количественный прирост статистических характеристик синтезированных алгоритмов при разрешении-обнаружении-измерении параметров постановщиков активных шумовых помех.

В результате построения алгоритмов разрешения-обнаружения-измерения стохастических сигналов достигнуто повышение разрешающей способности РЛС по сравнению с уровнем, устанавливаемым в соответствии с критерием Рэля [2, 3]. Это, в свою очередь, открывает новые возможности пространственной селекции информационных сигналов и излучений ПАШП и способствует повышению помехоустойчивости функционирования радиолокационных средств (систем) в условиях подавления как прицельными, так и заградительными помехами [1].

Построенные в работе алгоритмы сверхразрешения сигналов являются достойной альтернативой спектральным алгоритмам оценивания угловых координат объектов при наличии преднамеренных помех, в том числе создаваемых из различных точек пространства [18]. Их реализация, в отличие от алгоритмов сверхразрешения, базирующихся на спектральном подходе, не предполагает предварительное оценивание корреляционных матриц и не требует значительных вычислительных затрат [6, 18, 22]. В результате пространственной селекции источников излучений и режекции внешних помех обеспечивается повышение устойчивости функционирования РЛС при применении пространственно распределенных ПАШП.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / под ред. В.Г. Радзиевского. М.: Радиотехника, 2004. 424 с.
2. Ширман Я.Д. Теория обнаружения полезного сигнала на фоне гауссовых шумов и произвольного числа мешающих сигналов со случайными амплитудами и начальными фазами // Радиотехника и электроника, 1959. Т. 4. № 12. С. 1176–1192.
3. Ширман Я.Д. Статистический анализ оптимального разрешения // Радиотехника и электроника, 1961. Т. 6. № 8. С. 1237–1246.
4. Nilsson N.J. On the optimum range resolution of radar signals in noise // IRE Trans. Information Theory, 1961. P. 245–253.
5. Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов. М.: Издательство иностранной литературы, 1963. 432 с.
6. Макаров Е.С. Анализ сверхразрешения источников электромагнитного поля в многоканальных системах с малой апертурой: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01. Воронеж: ВГУ, 2009. 164 с.
7. Сафонова А.В. Эффективные алгоритмы оценивания угловых координат источников излучения: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04, 05.12.14. Рязань: РГТУ, 2016. 113 с.
8. Ширман Я.Д. Разрешение и сжатие сигналов. М.: Советское радио, 1974. 315 с.
9. Сверлинг Р. Максимальная точность определения угловых координат импульсной радиолокационной станцией // Вопросы радиолокационной техники, 1957. Т. 2 (88). С. 55–62.
10. Царьков Н.М. Многоканальные радиолокационные измерители. М.: Советское радио, 1980. 192 с.
11. Слюсар В.И. Предельное разрешение дальномерных процедур максимального правдоподобия // Радиоэлектроника. 1998. № 11. С. 39–45.
12. Проскурин В.И. Потенциальная разрешающая способность радиолокационной станции // Радиотехника. 2001. № 5. С. 67–70.
13. Монаков А.А., Мишура Т.П. Потенциальная разрешающая способность РЛС по дальности // Успехи современной радиоэлектроники. 2008. № 12. С. 31–34.
14. Трифонов А.П., Шинаков Ю.С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
15. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 256 с.
16. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
17. Вяхирев В.А. Адаптивное многоканальное измерение угловых параметров радиолокационных сигналов в РЛС с ФАР на фоне активных маскирующих помех: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04. Красноярск: КрГУ, 2002. 140 с.
18. Алгоритмы оценивания угловых координат источников радиоизлучения, основанные на методах спектрального анализа / В.В. Дрогалин, В.И. Меркулов, В.А. Родзивилов и др. // Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 2. С. 3–17.
19. Джонсон Д.Х. Применение методов спектрального оценивания к задачам определения угловых координат источников излучения // ТИИЭР, 1982. Т. 70. № 9. С. 126–139.
20. Климов С.А. Потенциальный предел и показатели качества сверхрэлеевского разрешения сигналов // Цифровая обработка сигналов, 2013. № 4. С. 57–62.
21. Чижов А.А. Сверхразрешение радиолокационных целей при воздействии активных шумовых помех по основному и ближним боковым лепесткам диаграммы направленности антенны РЛС // Информационно-управляющие системы. 2016. № 1 (80). С. 88–92.
22. Методы и устройства адаптивного многоканального обнаружения-разрешения-измерения стохастических сигналов / А.В. Филонович, А.Н. Горлов, И.В. Ворначева, Н.М. Гайдаш. Курск: Университетская книга, 2018. 117 с.



23. Репин В.Г., Тартаковский Г.П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: Советское радио, 1977. 432 с.

REFERENCES

1. Sovremennaya radio`elektronnaya bor'ba. Voprosy metodologii / pod red. V.G. Radzievskogo. M.: Radiotekhnika, 2004. 424 p.
2. Shirman Ya.D. Teoriya obnaruzheniya poleznogo signala na fone gaussovykh shumov i proizvol'nogo chisla meshayuschih signalov so sluchajnymi amplitudami i nachal'nymi fazami // Radiotekhnika i `elektronika, 1959. T. 4. № 12. pp. 1176–1192.
3. Shirman Ya.D. Statisticheskij analiz optimal'nogo razresheniya // Radiotekhnika i `elektronika, 1961. T. 6. № 8. pp. 1237–1246.
4. Nilsson N.J. On the optimum range resolution of radar signals in noise // IRE Trans. Information Theory, 1961. pp. 245–253.
5. Helstrom K. Statisticheskaya teoriya obnaruzheniya signalov. M.: Izdatel'stvo inostrannoj literatury, 1963. 432 p.
6. Makarov E.S. Analiz sverhrazresheniya istochnikov `elektromagnitnogo polya v mnogokanal'nyh sistemah s maloj aperturoj: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.04.01. Voronezh: VGU, 2009. 164 p.
7. Safonova A.V. `Effektivnye algoritmy ocenivaniya uglovykh koordinat istochnikov izlucheniya: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.12.04, 05.12.14. Ryazan': RGTU, 2016. 113 p.
8. Shirman Ya.D. Razreshenie i szhatie signalov. M.: Sovetskoe radio, 1974. 315 p.
9. Sverling R. Maksimal'naya tochnost' opredeleniya uglovykh koordinat impul'snoj radiolokacionnoj stanciej // Voprosy radiolokacionnoj tehniki, 1957. T. 2 (88). pp. 55–62.
10. Car'kov N.M. Mnogokanal'nye radiolokacionnye izmeriteli. M.: Sovetskoe radio, 1980. 192 p.
11. Slyusar V.I. Predel'noe razreshenie dal'nomernyh procedur maksimal'nogo pravdopodobiya // Radio`elektronika. 1998. № 11. pp. 39–45.
12. Proskurin V.I. Potencial'naya razreshayuschaya sposobnost' radiolokacionnoj stancii // Radiotekhnika. 2001. № 5. pp. 67–70.
13. Monakov A.A., Mishura T.P. Potencial'naya razreshayuschaya sposobnost' RLS po dal'nosti // Uspehi sovremennoj radio`elektroniki. 2008. № 12. pp. 31–34.
14. Trifonov A.P., Shinakov Yu.S. Sovmestnoe razlichenie signalov i ocenka ih parametrov na fone pomeh. M.: Radio i svyaz', 1986. 264 p.
15. Marpl S.L. Cifrovoy spektral'nyj analiz i ego prilozheniya. M.: Mir, 1990. 256 p.
16. Radio`elektronnye sistemy: osnovy postroeniya i teoriya. Spravochnik / pod red. Ya.D. Shirmana. M.: Radiotekhnika, 2007. 512 p.
17. Vyahirev V.A. Adaptivnoe mnogokanal'noe izmerenie uglovykh parametrov radiolokacionnykh signalov v RLS s FAR na fone aktivnykh maskiruyuschih pomeh: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.12.04. Krasnoyarsk: KrGU, 2002. 140 p.
18. Algoritmy ocenivaniya uglovykh koordinat istochnikov radioizlucheniya, osnovannye na metodah spektral'nogo analiza / V.V. Drogalin, V.I. Merkulov, V.A. Rodzivilov i dr. // Uspehi sovremennoj radio`elektroniki. 1998. № 2. pp. 3–17.
19. Dzhonson D.H. Primenenie metodov spektral'nogo ocenivaniya k zadacham opredeleniya uglovykh koordinat istochnikov izlucheniya // TII'ER, 1982. T. 70. № 9. pp. 126–139.
20. Klimov S.A. Potencial'nyj predel i pokazateli kachestva sverhr`eleevskogo razresheniya signalov // Cifrovaya obrabotka signalov, 2013. № 4. pp. 57–62.
21. Chizhov A.A. Sverhrazreshenie radiolokacionnykh celej pri vozdejstvii aktivnykh shumovykh pomeh po osnovnomu i blizhnim bokovym lepestkam diagrammy napravlenosti anteny RLS // Informacionno-upravlyayuschie sistemy. 2016. № 1 (80). pp. 88–92.



22. Metody i ustrojstva adaptivnogo mnogokanal'nogo obnaruzheniya-razresheniya-izmereniya stohasticheskikh signalov / A.V. Filonovich, A.N. Gorlov, I.V. Vornacheva, N.M. Gajdash. Kursk: Universitetskaya kniga, 2018. 117 p.

23. Repin V.G., Tartakovskij G.P. Statisticheskij sintez pri apriornoj neopredelennosti i adaptaciya informacionnyh sistem. M.: Sovetskoe radio, 1977. 432 p.

© Филонович А.В., Миронов В.А., 2020

Филонович Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроснабжения, ФГБОУ ВО «Юго-западный государственный университет», Россия, 305040, г. Курск, ул. Челюскинцев, 19, корп. 2, filon8@mail.ru.

Миронов Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский испытательный институт (радиоэлектронной борьбы), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, mirvam@live.ru.