

¹Д-р техн. наук, профессор, директор института информатики и радиоэлектроники Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

²Канд. техн. наук, начальник отделения казенного предприятия «НПК «Искра», Запорожье, Украина

³Начальник отдела казенного предприятия «НПК «Искра», Запорожье, Украина

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ КЛАССИФИЦИРОВАННОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ ДЛЯ АВТОКОМПЕНСАТОРА ПОМЕХ ПРИ ВРЕМЯ-ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ

В условиях воздействия комбинированных помех эффективность работы радиолокационных средств существенно ухудшается. Это обусловлено декорреляцией точечного источника активной помехи пространственно-распределенным характером пассивной помехи. Рассмотрены ограничения, возникающие при формировании классифицированной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов автокомпенсатора помех при время-пространственной обработке сигналов. Разработан новый метод формирования классифицированной обучающей выборки, использующий как спектральные, так и корреляционные отличия в структуре комбинированных помех. Предложенный метод позволяет уменьшить влияние пассивной составляющей комбинированной помехи на процесс компенсации активной составляющей.

Ключевые слова: обработка радиолокационных сигналов, адаптивная пространственная фильтрация, комбинированная помеха, классифицированная обучающая выборка, нормированный коэффициент межканальной корреляции.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее сложным и наиболее вероятным режимом работы в современных условиях является функционирование радиолокационных средств при одновременном воздействии активных маскирующих и пассивных (комбинированных) помех [1]. Возможным методом повышения их помехозащищенности является использование известных последовательных двухэтапных процедур время-пространственной или время-поляризационной фильтрации сигналов [2]. Временная (межпериодная) фильтрация сигналов на фоне пассивных помех в современных радиолокационных станциях (РЛС) выполняется путем использования дискретного преобразования Фурье [3, 4]. Пространственную фильтрацию сигналов преимущественно используют при воздействии активных маскирующих (АМП) помех по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны (ДНА) [5]. Поляризационную фильтрацию используют при защите радиолокационных средств от помех, действующих в направлении главного луча ДНА [6].

Пространственную или поляризационную фильтрацию сигналов на фоне АМП реализуют путем использования дополнительных компенсационных каналов приема и различных видов автокомпенсаторов помех или адаптивных антенных решеток. В условиях одновременного воздействия пассивной составляющей комбинированной помехи АМП, генерируемая точечным источником, декоррелируется [7], что приводит к существенному ухудшению ее компенсации. Поэтому проблема формирования классифицированной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов автокомпенсатора, порожденной только АМП, в современных условиях достаточно актуальна.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При время-пространственной фильтрации пространственной обработке предшествует временная межпериодная пачечная обработка принимаемых радиолокационных сигналов. В этом случае пространственная обработка сигналов реализуется в каждом из каналов многоканального доплеровского фильтра. При этом формирование весовых коэффициентов адаптивного пространственного фильтра осуществляется в границах текущей частотной пачки по информации фазовых фильтров основного и компенсационного каналов с номерами $N/2$, где N – общее количество фазовых фильтров [2]. Последнее обусловлено относительно малой вероятностью нахождения пассивной помехи в фильтрах с номером $N/2$, где накапливаются сигналы с межпериодным фазовым сдвигом, равным 180° . Однако в реальных условиях работы РЛС при время-пространственной фильтрации фазовые сдвиги пассивной помехи могут достигать и даже превышать значения, равные 180° . Еще одним ограничивающим фактором при формировании классифицированной обучающей выборки в этом случае является межфильтровое «просачивание» пассивной помехи через боковые лепестки смежных фазовых фильтров. Поэтому целью данной работы является разработка метода формирования классифицированной обучающей выборки путем совместного использования спектральных и корреляционных отличий в структуре комбинированных помех.

2 АНАЛИЗ ИЗВЕСТНОГО МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ АКТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ПОМЕХИ

Временная межпериодная фильтрация в известном методе компенсации активной составляющей комбини-

рованной помехи [2], выполняемая на первом этапе время-пространственной обработки, является пачечной и реализуется использованием дискретного преобразования Фурье, которое выполняется в каждом дискрете дальности частотной пачки:

$$\dot{X}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \dot{X}_i(n) \exp\left\{j \frac{2n\pi}{N} k\right\}, \quad (1)$$

где $\dot{X}(k)$ – комплексное значение сигналов на выходе k -го фазового фильтра, N – количество точек преобразования Фурье; $\dot{X}_i(n)$ – комплексное значение амплитуды сигнала в i -тый момент времени в n -ном периоде повторения; a_n – коэффициенты весового окна; $k \in [0, N-1]$.

Комплексное значение сигнала \dot{U}_Σ на выходе пространственного фильтра можно записать в следующем виде:

$$\dot{U}_\Sigma = \dot{U}_0 - \dot{W} \dot{U}_k \quad (2)$$

при этом текущее комплексное значение весового коэффициента \dot{W}_{i+1} в схеме с использованием классического алгоритма Уидроу [8] определяется как

$$\dot{W}_{i+1} = \dot{W}_i - 2\mu \dot{U}_k^* \dot{U}_\Sigma. \quad (3)$$

В выражениях (2), (3) \dot{U}_0 и \dot{U}_k – комплексные значения сигналов на основном и на компенсационном входе автокомпенсатора, соответственно, \dot{W}_i – комплексное значение весового коэффициента на предыдущей итерации; μ – скалярная величина, определяющая глубину обратной связи; * – знак комплексного сопряжения.

Для пояснения сущности анализируемого метода на рис. 1 приведена структурная схема время-пространственной обработки с использованием спектральных отличий пассивной составляющей комбинированной помехи [2]. Схема работает следующим образом. С приемников основного и компенсационного каналов РЛС

на входы устройств временной фильтрации основного 1 и компенсационного 2 каналов поступают сигналы, отраженные от лоцируемых целей, мешающих объектов (пассивные помехи) и шумовые помехи, которые могут излучаться специальными устройствами. С помощью устройств временной фильтрации 1 и 2 происходит когерентное накопление полезных сигналов и распределение по фазовым фильтрам смеси принимаемых сигналов и помех.

Распределенные по фазовым фильтрам сигналы основного и компенсационного каналов, поступают к устройствам памяти основного 3 и компенсационного 4 каналов, где задерживаются на время расчета весового коэффициента в формирователе 6, чтобы рассчитанный весовой коэффициент был использован для компенсации помехи в той частотной пачке, на основании которой производился его расчет.

В качестве обучающей классифицированной выборки в формирователе весовых коэффициентов 6 автокомпенсатора 5 используются выходные сигналы фазовых каналов с номером $N/2$ компенсационного канала приема и выходного сигнала сумматора 9. Использование фильтровых каналов с номерами $N/2$ в качестве обучающей классифицированной выборки основано на предположении, что вероятность нахождения пассивной помехи в фазовом канале с номером $N/2$ с соответствующими доплеровскими сдвигами частоты наименьшая.

На время расчета весового коэффициента в формирователе 6, устройство синхронизации 11 переводит запоминающие устройства 3, 4 и 7 в режим линейной передачи информации. При этом сигналы с фазовых фильтров с номерами $N/2$ поступают на соответствующие входы автокомпенсатора 5. В формирователе весового коэффициента 6 использован алгоритм вычисления весовых коэффициентов с корреляционной обратной связью (3). После вычисления весового коэффициента устройство синхронизации 11 переводит запоминающее устройство 7 в режим запоминания весового коэффициента

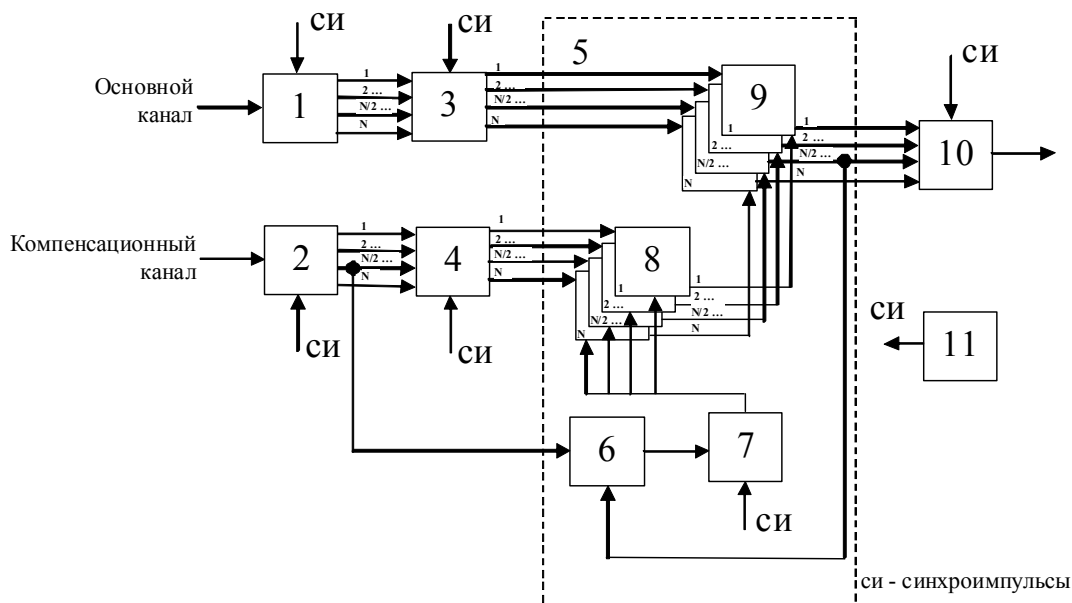


Рисунок 1 – Структурная схема время-пространственной обработки с использованием спектральных отличий

до последующей процедуры адаптации, а запоминающие устройства 3 и 4 – в режим передачи по всем N каналам. При этом сигналы с выходов запоминающего устройства 4 компенсационного канала в N умножителях 8 перемножаются на сохраненное в запоминающем устройстве 7 значение весового коэффициента. Результат умножения по каждому из фазовых фильтров поступает ко вторым входам соответствующего сумматора 9, где складывается с информацией с выходов соответствующих фильтров основного канала. Такие вычисления проводят для каждого дискрета дальности текущей частотной пачки. Таким образом проводится процедура пространственной фильтрации и получают распределенные по фазовым фильтрам сигналы, в которых скомпенсирована активная составляющая комбинированной помехи.

Информация с выходов сумматора 9 поступает на устройство некогерентной обработки 10, в котором происходит подавление пассивных помех и обнаружение сигналов, отраженных от целей.

Существенным недостатком используемого в [2] метода формирования классифицированной выборки является низкая эффективность подавления АМП вследствие ее межканальной декорреляции пассивной помехой [7]. Это обусловлено относительно высокой вероятностью наличия пассивной помехи в фильтрах основного и компенсационного канала с номерами $N/2$. Действительно, учитывая функциональную связь между частотой Доплера F_D и радиальной составляющей скорости пассивной помехи V_r

$$F_D = \frac{2V_r}{\lambda}, \quad (4)$$

где λ – длина волны, и, например, при $\lambda=0,1$ м и $V_r=20$ м/с, частота Доплера равняется 400 Гц, что может равняться или даже превышать половину частоты повторения импульсов РЛС. При этом пассивная помеха может концентрироваться в фазовом фильтре с номером $N/2$. Это подтверждается также результатами регистрации пассивных помех в полигонных условиях.

Кроме того, ограничивающим фактором подавления АМП есть межфильтровое «просачивание» пассивной помехи через боковые лепестки смежных фазовых фильтров. Так, например, при согласованной фильтрации уровень первого бокового лепестка фильтра составляет минус 13 дБ.

3 МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ КЛАССИФИЦИРОВАННОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ВРЕМЕННЫХ ОТЛИЧИЙ В СТРУКТУРЕ ПОМЕХ

Известно, что отражения от преднамеренных пассивных помех имеют локальный характер [9]. Например, размеры облака из одной пачки дипольных отражателей могут составлять 0,5...1 км через 5 минут после сброса и 1,6...2 км через 10 минут после сброса. Наиболее мощные облачные системы с большой удельной площадью рассеяния в разрешаемом объеме (облака вертикального развития типа Cumulus) также имеют локальный характер [10]. Анализ структуры других облачных систем, которые могут находиться на разных ярусах и имеют различную толщину, дает основание считать, что распределение облачных систем по дальности относительно РЛС имеет вероятностный характер.

Таким образом, можно считать, что отраженные от гидрометеоров сигналы (пассивные помехи) имеют нестационарный по дальности (времени) характер. Это может быть использовано для повышения качества формирования классифицированной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов автокомпенсатора.

Учитывая упомянутое ранее явление декорреляции АМП пассивной помехой, предложен новый метод формирования классифицированной обучающей выборки, в котором для повышения ее качества используются не только спектральные отличия в структуре составляющих комбинированной помехи, но и межканальные корреляционные отличия.

Для пояснения сущности метода формирования классифицированной обучающей выборки на рис. 2 приведена структурная схема время-пространственной обработки с использованием спектральных и корреляционных отличий в структуре комбинированной помехи.

Повышение качества формирования классифицированной обучающей выборки в структурной схеме время-пространственной обработки достигается текущим анализом распределения уровня пассивной составляющей комбинированной помехи, которая является нестационарным по дальности процессом. Такой анализ реализуется путем текущего оценивания модуля межканального нормированного коэффициента корреляции $|\rho|$ комбинированной помехи на выходах фильтров с номером $N/2$ основного и компенсационного каналов приема:

$$|\rho| = \frac{|\dot{U}_0 \dot{U}_k^*|}{\sqrt{|\dot{U}_0|^2 |\dot{U}_k|^2}}. \quad (5)$$

В приведенной на рис. 2 структурной схеме устройства с номерами от 1 по 11 аналогичны устройствам рис. 1 с теми же номерами. Анализ распределения пассивной помехи по дальности и выбор интервала, на котором пассивная помеха отсутствует или имеет наименьший уровень осуществляется вычислителем модуля коэффициента межканальной корреляции 12, линией задержки 13 и устройством выбора максимума 14. Вычисление модуля коэффициента межканальной корреляции $|\rho|$ реализуется методом «скользящего окна» на интервалах, равных m дискретам дальности. При этом величина m определяется необходимой длительностью классифицированной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов автокомпенсатора, а количество интервалов оценивания распределения уровня пассивной помехи по дальности p равняется количеству отводов линий задержки 13 и зависит от количества дискретов разрешения по дальности РЛС.

Синхронно с вычислением модуля межканального коэффициента корреляции на тех же интервалах выполняется прямое вычисление весовых коэффициентов в формирователе 6 по формуле:

$$\dot{W}_i = \frac{\dot{U}_0 \dot{U}_k^*}{|\dot{U}_k|^2}. \quad (6)$$

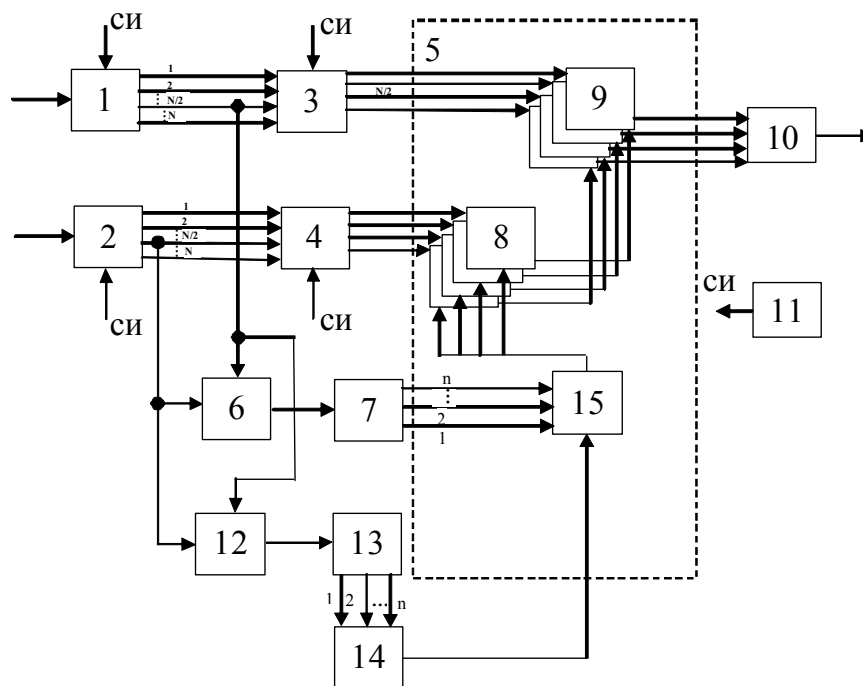


Рисунок 2 – Структурная схема время-пространственной обработки с использованием спектральных и корреляционных отличий

После соответствующих вычислений по формулам (5) и (6) и выбора интервала, на котором пассивная помеха отсутствует, что определяется устройством выбора максимума 14, коммутатор 15 подключает соответствующий отвод линии задержки весовых коэффициентов 7 ко вторым входам умножителей 8. Дальнейшая обработка сигналов в устройствах 9 и 10 схемы, представленной на рис. 2, аналогична схеме рис. 1.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Предложен новый метод формирования классифицированной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов пространственного фильтра при время-пространственной обработке сигналов в когерентно-импульсных РЛС.

2. Впервые при время-пространственной обработке сигналов предложено формировать классифицированную обучающую выборку с учетом не только спектральных отличий между составляющими комбинированной помехи, но и межканальных корреляционных отличий.

3. Повышение качества классифицированной обучающей выборки позволяет уменьшить влияние пассивной помехи на процесс компенсации АМП, что обеспечивает повышение помехозащищенности когерентно-импульсных РЛС в условиях воздействия комбинированных помех.

5 ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что выбор интервала дальности с наименьшим уровнем пассивной составляющей комбинированной помехи в фазовых каналах с номером $N/2$ обеспечивает использование как спектральных, так и корреляционных отличий при формировании классифицированной обучающей выборки. Даже если пассивная помеха концентрируется в фазовых каналах с номером $N/2$, то с учетом ее нестационарности по дальности оказывается возмож-

ным сформировать классифицированную выборку, порожденную только АМП. Это позволяет при время-пространственной обработке сигналов существенно уменьшить декоррелирующее влияние пассивной помехи на процесс компенсации АМП.

ВЫВОДЫ

В статье предложен новый метод формирования классифицированной обучающей выборки, в котором за счет использования межканального корреляционного анализа составляющих комбинированной помехи повышается качество их классификации, что позволяет уменьшить влияние пассивной помехи на процесс адаптации пространственных фильтров при время-пространственной обработке сигналов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по научно-исследовательской теме Запорожского национального технического университета «Разработка и усовершенствование алгоритмов комбинированной обработки сигналов в радиотехнических и телекоммуникационных системах» (№ гос. регистрации – 0115U002241). Авторы выражают благодарность МОН Украины и казенному предприятию «Научно-производственный комплекс «Искра» за финансовую поддержку проводимых исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка интервала фиксации пространственного весового вектора при последовательной пространственно-временной обработке сигналов на фоне комбинированных помех / [В. П. Рябуха, Д. С. Рачков, А. В. Семеняка, Е. А. Катошин] // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2012. – № 10. – С. 13–25.
2. Пат. 48705 Україна, МПК G01 S 7/36 H04B 15/00. Спосіб компенсації активної складової комбінованої завади / Кононович В. Я., Кукольницький А. П., Залевський О. П., Каспирович О. Г.; Майстер Ю. Л., Денека А. А.; заявник і патентовласник Казенне підприємство «Науково-виробничий комплекс «Іскра». –

- № u200911296; Заявл. 2009.11.06; Опубл. 2010.03.25, Бюл. № 6, 2010 р. – 4 с.
- Тейлор Дж. У. Новая диспетчерская РЛС ASR-9 / Дж. У. Тейлор, Г. Бруникс // ТИИЭР. – 1985. – № 2. – С. 284–289.
 - Радиолокационная станция 36Д6 : учебн. пособие / И. Д. Май [и др.]. – КП «НПК «Искра» – Кн.1, 2006. – 135 с.
 - Теоретические основы радиолокации : учеб. пособие для вузов / Я. Д. Ширман, В. Н. Голиков, И. Н. Бусыгин и др. ; под общ. ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Сов. радио, 1970. – 560 с.
 - Пат. 91114 Україна МПК2014 G01S 7/36. Спосіб захисту радіолокаторів від комбінованих завад, діючих на головному променю діаграми спрямованості антени / Піза Д. М. (UA), Сіренко А. С. (UA), Звягинцев Е. А. (UA); заявник і патентовласник: Запорізький національний технічний університет – заявл. 20.12.2013; опубл. 25.06.2014, бюл. № 12, 2014 р.
 - Журавльов А. К. Адаптивные радиотехнические системы с антенными решетками / А. К. Журавльов, В. А. Хлебников и др. – Л. : Изд. Ленинградского университета, 1991. – 544 с.
 - Уидроу Б. Адаптивная обработка сигналов / Б. Уидроу, С. Стирнз ; пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1989. – 440 с.
 - Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Радиотехника, 2007. – 512 с.
 - Атлас облаков / Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), Гл. геофиз. обсерватория им. А. И. Воейкова; [Д. П. Беспалов и др.; ред. Л. К. Сурыгина]. – Санкт-Петербург : Д'АРТ, 2011. – 248 с.

Статья поступила в редакцию 29.06.2016.
После доработки 21.09.2016.

Піза Д. М.¹, Лаврент'єв В. М.², Семенов Д. С.³

¹Д-р техн. наук, професор, директор інституту інформатики та радіоелектроніки Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

²Канд. техн. наук, начальник відділення казенного підприємства «НБК «Іскра», Запоріжжя, Україна

³Начальник відділу казенного підприємства «НБК «Іскра», Запоріжжя, Україна

МЕТОД ФОРМУВАННЯ КЛАСИФІКАЦІЙНОЇ НАВЧАЛЬНОЇ ВИБІРКИ ДЛЯ АВТОКОМПЕНСАТОРА ЗАВАД ПРИ ЧАСОВО-ПРОСТОРОВІЙ ФІЛЬТРАЦІЇ СИГНАЛІВ

В умовах впливу комбінованих завад ефективність роботи радіолокаційних засобів суттєво погіршується. Це обумовлено декорреляцією точкового джерела активної завади просторово-розподіленним характером пасивної завади. Розглянуті обмеження, що виникають при формуванні класифікаційної навчальної вибірки для адаптації вагових коефіцієнтів автокомпенсатора завад при часово-просторовій обробці сигналів. Розроблено новий метод формування класифікаційної навчальної вибірки, що використовує як спектральні, так і кореляційні відмінності в структурі комбінованих завад. Запропонований метод дозволяє зменшити вплив пасивної складової комбінованої завади на процес компенсації активної складової.

Ключові слова: обробка радіолокаційних сигналів, адаптивна просторова фільтрація, комбінована завада, класифікована навчальна вибірка, нормований коефіцієнт міжканального кореляції.

Piza D.¹, Lavrentiev V.², Semenov D.³

¹PhD, professor, Director of the Institute of Informatics and Radioelectronics, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

²PhD, Department Director, State Enterprise «Scientific and Production complex «Iskra», Zaporizhzhya, Ukraine

³Chief of department, State Enterprise «Scientific and Production complex «Iskra», Zaporizhzhya, Ukraine

METHOD OF FORMING OF THE CLASSIFIED TRAINING SAMPLE FOR AUTOMATIC CANCELLER OF THE INTERFERENCES WHEN USING TIME-SPACE FILTERING OF SIGNALS

Radar effectiveness is dramatically decreasing in the case of combined interference. This is due to decorrelation of a point source jammer by spatially distributed structure of passive interference. There have been considered limitations arising from the formation of the classified training sample for adaptation of the weighting factors of the automatic jamming canceller in the time-spatial signal processing. A new method has been developed to form the classified training sample, using both the spectral and correlation differences in the structure of combined jamming. The proposed method allows to decrease the effect of the passive component in the combined jamming to the process the active component cancellation.

Keywords: Radar signals processing, adaptive space filtering, combined clutter and jamming, ranked training sample, inter-channel correlation coefficient.

REFERENCES

- Rjabuha V. P., Rachkov D. S., Semenjaka A. V., Katjushin E. A. Ocenka intervala fiksacii prostranstvennogo vesovogo vektora pri posledovatel'noj prostranstvenno-vremennoj obrabotke signalov na fone kombinirovannyh pomeh, *Izvestija vysshih uczebnyh zavedenij. Radioelektronika*, 2012, No. 10, pp. 13–25.
- Kononovich V. Ja., Kukul'nic'kij A. P., Zalevs'kij O. P., Kaspirovich O. G.; Majster Ju. L., Deneka A. A.; заявник і патентовласник Казенне підприємство «Науково-виробничий комплекс «Іскра» Пат. 48705 Україна, МПК G01 S 7/36 H04B 15/00. Спосіб компенсації активної складової комбінованої завади. № u200911296; Заявл. 2009.11.06; Опубл. 2010.03.25, Бюл. №6, 2010, 4 р.
- Tejlor Dzh. U., Bruniks G. Novaja dispetcherskaja RLS ASR-9, 1985, ТИИЭР, No. 2, pp. 284–289.
- Maj I. D. [i dr.] Radiolokacionnaja stancija 36D6, ucbebn. Posobie. KP «NPK «Iskra», 2006, Kn. 1, 135 p.
- Shirman Ja. D., Golikov V. N., Busygin I. N. i dr. ; pod obshh. red. Ja. D. Shirmana Teoreticheskie osnovy radiolokacii, ucbebn. posobie dlja vuzov. Moscow, Sov. Radio, 1970, 560 p.
- Piza D. M. (UA), Sirenko A. S. (UA), Zvjahintsev E. A. (UA); заявник і патентовласник. Пат. 91114 Україна МПК2014 G01S 7/36. Спосіб захисту радіолокаторів від комбінованих завад, діючих на головному променю діаграми спрямованості антени. [Текст]. Запорізький національний технічний університет, заявл. 20.12.2013; опубл. 25.06.2014, бюл. № 12, 2014.
- Zhuravl'ov A. K., Hlebnikov V. A. i dr. Adaptivnyje radiotekhnicheskie sistemy s antennymi reshetkami. Leningrad, Izd. Leningradskogo universiteta, 1991, 544 p.
- Uidrou B., Stirnz S. per. s angl. Adaptivnaja obrabotka signalov. Moscow, Radio i svjaz', 1989, 440 p.
- Radioelektronnyje sistemy: Osnovy postroenija i teorija. Spravochnik. Izd. 2-e, pererab. i dop. [Tekst], Pod red. Ja. D. Shirmana. Moscow, Radiotekhnika, 2007, 512 p.
- Bespalov D. P. i dr.; red. Surygina L. K. Atlas oblakov. Feder. sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhajushhej sredy (Rosgidromet), Gl. geofiz. observatorija im. A. I. Vojkova. Sankt-Peterburg, D'ART, 2011, 248 p.