

Козлов А.С.

Курсант

4 курс, факультет «Радиотехнические комплексы»

Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны

Россия, г. Ярославль

Научный руководитель: Павлов Ю.Ю. старший преподаватель

*Старший преподаватель кафедры «Радиотехнического
вооружения»*

Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны

Россия, г. Ярославль

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ В АВТОКОМПЕНСАТОРЕ АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ

Аннотация: В данной статье рассмотрена проблема формирования весовых коэффициентов в автокомпенсаторе активных шумовых помех. Предложены различные методы, в которых представлены алгоритмы формирования весовых коэффициентов. На основании рассмотренных методик выбран алгоритм вычисления вектора весовых коэффициентов в радиолокационной станции с фазированными антенными решетками при воздействии активной шумовой помехи.

Ключевые слова: формирование весовых коэффициентов, автокомпенсатор, автоматизирование, РЛС, пространственная обработка сигналов.

Annotation: This article discusses the problem of the formation of weights in the auto-compensator active noise interference. Various methods are proposed in which algorithms for the formation of weights are presented. Based on the considered techniques, an algorithm for calculating the weight coefficient vector in

a radar with phased antenna arrays under the influence of active noise interference was chosen.

***Key words:** formation of weighting coefficients, auto compensator, automation, radar, spatial signal processing.*

Разработка алгоритмов пространственной обработки сигналов в радиолокационных системах (РЛС) с фазированными антенными решетками (ФАР) является важным этапом проектирования РЛС. Одним из наиболее перспективных направлений решения проблемы защиты каналов приема от помех является формирование глубоких провалов (нулей) в диаграмме направленности (ДН) антенны РЛС в направлении на постановщик помех, реализуемое либо при помощи адаптивных фазированных АР, либо широко применяемых автокомпенсаторов (АК) боковых лепестков. Последние являются наиболее привлекательными при синтезе системы подавления активных шумовых помех (АШП) РЛС.

В качестве адаптивных устройств защиты от АШП могут использоваться системы автокомпенсации, построенные либо на базе корреляционных АК с обратными связями, либо с прямым вычислением корреляционной матрицы (КМ) помех и формированием вектор-столбца весового коэффициента путем обращения полученной матрицы (так называемого непосредственного обращения КМ помех (НОМ)).

В адаптивных процессорах с замкнутой петлей обратной связи используются градиентные алгоритмы, основанные на поиске центра поверхности уровня с помощью так называемого «метода спуска». Достоинства градиентных алгоритмов заключаются в относительной простоте их технической реализации, как в аналоговом, так и в цифровом виде, а также в способности к самокоррекции промежуточных ошибок вычислений. Главный недостаток - малая скорость сходимости к оптимальному решению. В условиях стремительного развития и совершенствования средств радиоэлектронного подавления повышение скорости адаптации является

принципиальным требованием к системам помехозащиты. Необходимость этого обусловлена возрастанием требований к пропускной способности РЛС, усложнением по-меховой обстановки и уменьшением временного интервала, в течение которого помеха может считаться стационарной. В системах с обратной связью, построенных на основе использования градиентных алгоритмов адаптации скорость сходимости ограничивается условиями, налагаемыми на коэффициент усиления цепи обратной связи, и значительно зависит от уровня помех, их числа и взаимного расположения воздействующих помехоносителей. Следует также отметить, что для процессоров с замкнутой петлей обратной связи актуальна проблема устойчивости.

Указанные недостатки в определенной степени устраняются при использовании адаптивных приемных устройств без обратной связи. Прямые методы адаптации, связанные с обращением или псевдообращением КМ помех, состоят в определении весового вектора и, следовательно, амплитудно-фазового распределения на основе знания КМ помех и вектора, задающего волновой фронт полезного сигнала. Операция нахождения весового вектора достаточно трудоемкая, требует относительно больших временных затрат и связана с обращением матрицы или решением системы уравнений. В литературе достаточно подробно рассмотрены вопросы реализации численных методов для решения задачи формирования весового вектора и обращения оценочной КМ помех .

Адаптивные устройства с прямым методом формирования весовых коэффициентов стабильны и имеют высокую скорость сходимости, мало зависящую от внешних условий.

К прямым алгоритмам относятся алгоритмы непосредственного обращения оценочной КМ помехи, рекуррентного обращения выборочной КМ помехи (непосредственное итерационное уточнение обратной КМ) и алгоритм последовательной декорреляции помехи, основанный на процедуре

ортогонализации Грама-Шмидта. Процессоры с разомкнутой петлёй обратной связи должны обладать не только высокой точностью, но и большим динамическим диапазоном, они могут быть реализованы преимущественно в цифровом виде. Метод НОМ критичен к точности вычислений (чувствителен к ошибкам вычислений): чем больше порядок обрабатываемой матрицы, тем точнее должны выполняться операции сложения и умножения.

При использовании прямых методов вычислений при числе выборок, используемых для оценки КМ, большем удвоенного числа степеней управления, потери в среднем отношении сигнал-помеха при замене матрицы ее выборочной оценкой не превышают 3 дБ. Это существенно (на несколько порядков) меньше, чем при использовании градиентных методов.

Сравнение градиентных и прямых методов по числу операций комплексного умножения, требуемых для вычисления весовых коэффициентов, показывает, что наиболее экономичными по числу операций на одну выборку являются градиентные алгоритмы, наименее экономичными — алгоритмы, основанные на выборочной оценке и последующем обращении КМ. Однако представляющий наибольший практический интерес объем вычислений, требуемых для получения заданного уровня подавления помех, зависит также от требуемого числа выборок. Последнее же у прямых методов значительно меньше, чем у градиентных. Поэтому в ряде случаев суммарный объем вычислений, требуемых для обеспечения заданного уровня подавления помех при использовании прямых методов, может оказаться меньше, чем для градиентных методов, обладающих медленной сходимостью.

Важным достоинством прямых методов является независимость скорости сходимости алгоритмов от соотношения мощностей и пространственного распределения источников помех.

Описание процедуры компенсации АШП

Компенсация АШП осуществляется в каждом из основных каналов независимо и представляет собой процедуру вычитания M взвешенных

сигналов компенсационных каналов из основного канала. При этом весовая сумма является оценкой значения активной помехи в данном канале, процесс получения которой осуществляется за три этапа.

Алгоритм вычисления весовых коэффициентов

В режиме кругового обзора, при вращении антенны, АШП становится нестационарной, и возникает необходимость в своевременном обновлении весовых коэффициентов. При этом частое применение метода НОМ является нежелательным из-за больших вычислительных затрат, а редкое, как правило, приводит к значительному ухудшению коэффициента компенсации АШП. Кроме того, вне зависимости от частоты применения метода НОМ, ввиду наличия в принимаемом сигнале кроме АШП помех других видов, возможно искажение оценки КМ, что также снижает коэффициент компенсации АШП. С целью устранения упомянутых недостатков разработан алгоритм вычисления весовых коэффициентов, суть которого заключается в следующем. Выбирается средний темп применения метода НОМ, при котором обеспечиваются приемлемое значение коэффициента компенсации АШП и небольшие вычислительные затраты. В интервалах времени между пересчетами коэффициентов производится оценивание помеховой обстановки путем формирования нескольких оценок корректирующих КМ с более быстрым темпом следования, чем метод НОМ, в котором будут учитываться эти оценки. В режиме обзора РЛС излучает последовательность зондирующих импульсов, обычно с переменным периодом следования (вобуляцией). Также в этой последовательности присутствуют защитные временные интервалы, в течение которых РЛС не излучает.

Использование защитных временных интервалов позволяет получать оценки КМ в течении длительного времени обучения L , не искаженных при этом отраженным сигналом. Пусть значение L составляет 128 отсчетов комплексной огибающей принимаемого сигнала, что является реализуемым в большинстве практических случаев. Назовем оценки КМ, полученные на этом

интервале опорными и обозначим как R_{xx}^{128} и $R_{\lambda x}^{128}$. На базе полученных оценок КМ АШП вычисляются весовые коэффициенты $W1$ в соответствии с (2), которые будут использованы в процессе компенсации АШП в течение некоторого времени. На рис. 2 показан пример фрагмента последовательности зондирующих импульсов, схематично отмеченных треугольниками. Жирными прямоугольниками показаны отрезки времени, в течение которых происходит получение оценок КМ (обучение автокомпенсатора). Первый прямоугольник означает процесс оценивания опорных КМ АШП. Тонкими линиями показан сигнал АШП на выходе автокомпенсатора. Пунктиром обозначены сигналы ПП на входе автокомпенсатора. В первом периоде зондирования на ФАР действуют только сигналы АШП, а в последующих периодах также и сигналы ПП. Как видно из рис. 2, сначала коэффициенты $W1$ обеспечивают эффективную компенсацию АШП, затем, вследствие вращения антенны, наблюдается монотонное ухудшение компенсации. На десятом периоде зондирования коэффициенты $W1$ уже не обеспечивают приемлемый уровень подавления АШП и их необходимо пересчитывать.

Получение оценки КМ в моменты, отличные от защитных временных интервалов, имеет ряд особенностей. Во-первых, длительность времени обучения в этом случае оказывается примерно на порядок меньше. Во-вторых, моменты начала интервалов обучения должны соответствовать максимально дальним дистанциям с целью уменьшения общего вклада ПП. В-третьих, эти моменты должны варьироваться от одного импульса зондирования к другому для исключения возможности искажения получаемых оценок удаленными целями. В данном случае оценивание помеховой обстановки в интервалах времени между очередными пересчетами весовых коэффициентов производится с помощью серий обучений автокомпенсатора на коротких интервалах усреднения ($L_{кор} = 16$ отсчетов комплексной огибающей) с получением двух групп оценок корректирующих КМ

Опишем процедуру вычисления $\cos^2\phi_p$. Пусть корректирующая КМ R_{xx} p^{16} является одномерным массивом $r_{кор}$. Поскольку оценка опорной КМ была получена накоплением L отсчетов комплексной огибающей, а оценка корректирующей КМ накоплением $L_{кор}$ отсчетов, то опорная матрица в выражении для коэффициента сходства должна иметь нормировочный множитель, т.е. одномерный массив $r_{кор}$ соответствует матрице $(L_{кор}/L)R_{xx}^{128}$.

По результатам сравнения вычисляется один и тот же для всех групп корректирующих КМ вектор $\beta=[\beta_1,\beta_2,\dots,\beta_p]^T$, который назовем вектором коэффициентов значимости, определяющим порядок выбора нужных оценок корректирующих КМ, включая различные приоритеты для каждой оценки. При вычислении вектора коэффициентов значимости достаточно производить сравнение только одной группы КМ $R_{xx1}^{16}, R_{xx2}^{16}, R_{xxp}^{16}$ и R_{xx}^{128} .

Список литературы

1. Уидроу Б. Адаптивная обработка сигналов: пер. с англ. / Б. Уидроу, С.Стирнз; под. ред. В.В.Шахгильяна. – М.: Радио и связь, 1989. – 440с.
2. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
3. Балакришнан А. Теория фильтрации Калмана: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 168 с.
4. Вержбицкий В.М. Основы численных методов: Учебник для вузов / В.М. Вержбицкий. – М.: Высш. шк., 2002. – 840 с.: ил.
5. Радзиевский, В.Г. Алгоритмы обнаружения и пеленгования совокупности частотно-неразделимых радиосигналов / В.Г.Радзиевский, А.В.Уфаев // Радиотехника. 2005.
6. Мальцев, А. А. Статистические характеристики авто компенсатора с АРУ в цепи управления / А.А.Мальцев, И.Е.Позументов // Изв.,вузов. Радиофизика,- 1979,- Т.22.