

В. Н. Тяпкин, И. А. Лубкин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕКУРРЕНТНЫХ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПОДАВЛЕНИЯ АКТИВНО-ШУМОВЫХ ПОМЕХ В СИСТЕМАХ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

Рассматривается применение программно-аппаратного комплекса подавления активно-шумовых помех для повышения качества принимаемого спутникового сигнала. Комплекс предназначен для подавления помех от стационарных источников.

Ключевые слова: адаптивный алгоритм, шумоподавление, спутниковая связь, цифровая обработка сигналов.

По мере увеличения использования частотного ресурса всё чаще возникают конфликты вследствие влияния мощных сигналов наземных источников помех на высокочувствительные системы спутниковой связи. В качестве источника помехи может выступать сигнал телепередающего центра, базовой станции сотовой связи или иного источника, излучающего в частотном диапазоне, перекрывающем частотный диапазон полезного сигнала. По причине этого появляется необходимость в решении, улучшающем качество приема. Полезный сигнал (телеметрическая информация) поступает от геостационарного спутника и имеет близкий к сигналу помехи частотный диапазон. Из-за отсутствия возможности решить проблему организационными или правовыми мерами, а также вследствие неэффективности примененных методов экранирования и фильтрации, возникла необходимость в устройстве, предназначенном для подавления активно-шумовых помех (АШП). В дальнейшем планируется использовать разработанный программно-аппаратный комплекс подавления АШП (ПАКП АШП) для решения класса подобных задач. В первичном определении задачи подразумевается защита от одного постановщика помех, хотя применяемые методы позволяют создать защиту от большего их числа. В настоящее время нет возможности указать максимальное число постановщиков помех, защита от которых может быть обеспечена при применении описанных технических решений, так как параметры комплекса напрямую зависят от аппаратной составляющей.

Цель работы: повышение качества принимаемого спутникового сигнала, содержащего телеметрическую информацию.

В рамках достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выбор метода решения задачи.
2. Разработка методики решения задачи.
3. Создание и математическое моделирование работы алгоритма подавления АШП.
4. Реализация алгоритма в качестве программы для отладочной платы.
5. Создание программно-аппаратного комплекса подавления АШП.

В рамках статьи описывается первый, второй и третий этапы решения проблемы.

Описание предметной области. Как источник полезного сигнала, так и источник помехи стационарны. Для приёма полезного сигнала используется антенна с высо-

ким коэффициентом направленного действия. Приёмная антенна сориентирована на источник полезного сигнала. Сигнал помехи принимается боковым лепестком диаграммы направленности. По причине того, что источник помехи расположен вблизи антенной системы и имеет на несколько порядков большую мощность, чем у полезного сигнала, приём не обеспечивается. Отношение сигнал/шум (ОСШ) в худших случаях составляет порядка 15 дБ.

Существующий в настоящее время наземный контур управления (НКУ) включает в себя принимающую систему, состоит из следующих компонентов:

1. Антенно-фидерные устройства – узконаправленная параболическая спутниковая антенна и малошумящий усилитель.
2. Приемник, выполняющий роль демодулятора принимаемого сигнала. С выхода приемника поступает сигнал на промежуточной частоте.
3. Демодулятор сигнала на промежуточной частоте.
4. ПЭВМ с платой сбора данных, обеспечивающая приём и сохранение телеметрической информации, передаваемой на видеочастоте.

ПАКП АШП предлагается включить в состав НКУ для защиты от помех, создаваемых посторонними радиотехническими средствами (телевизионными ретрансляторами, базовыми станциями сотовой связи и другими источниками АШП).

Целесообразно проводить шумоподавление на промежуточной частоте (ПЧ), так как:

– АШП на несущей частоте (десятки ГГц) потребует создания сложного и дорогого устройства обработки СВЧ сигнала. Сигнал в таком устройстве может обрабатываться только в аналоговой форме;

– после детектирования сигнала будет отсутствовать необходимая корреляция между сигналами, принятыми антеннами основного и дополнительных каналов – в рассматриваемой системе осуществляется детектирование сигнала на промежуточной частоте.

Для выполнения функции защиты от АШП в качестве метода подавления АШП предлагается использовать метод адаптации [1, с. 690]. Метод адаптации можно применить для селекции полезного сигнала на фоне сигналов помех, принятых с направлений, отличных от направления на источник полезного сигнала (пространственная селекция). Если направление прихода полезного сигнала известно (или может быть установлено), то, теоретически, любые сигналы, поступающие с других направлений, могут быть подавлены с помощью формирования нулей

диаграммы направленности (ДН) в этих направлениях (рис. 1).

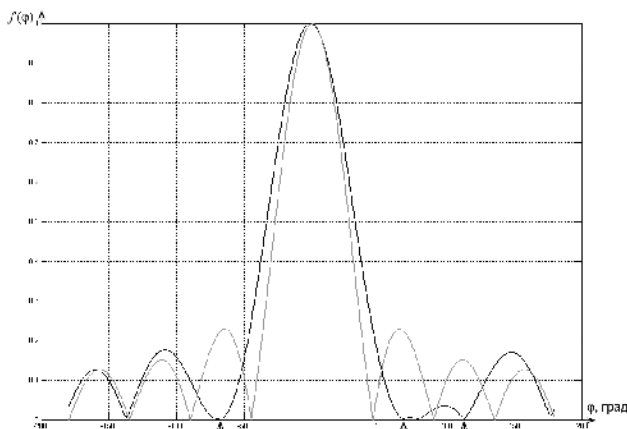


Рис. 1. Пример диаграммы направленности восьмиэлементной ФАР (серый график) и той же ФАР с тремя сформированными нулями диаграммы направленности (черный график)

Для реализации метода адаптации к исходной системе добавляется всенаправленная антенна, еще один приёмник и ПАКП АШП.

Общий принцип формирования нулей ДН следующий. Основной антенной принимаются сигналы и помеховые колебания, действующие с направления боковых лепестков ДН. Сигналы помех принимаются антеннами дополнительных каналов, так как они имеют слабую направленность и не могут принять маломощный информативный сигнал. Процессор ЦОС на основе вычисления корреляционной связи между основным и дополнительными каналами выработывает весовые коэффициенты дополнительных каналов, которые обеспечивают компенсацию помех.

Оценки весовых коэффициентов при использовании адаптивных антенных систем могут вычисляться с помо-

щью одного из адаптивных алгоритмов. Предпочтительной является реализация блоков подавителя АШП с использованием цифровой обработки сигналов. ЦОС позволяет упростить его технологическую реализацию и повысить стабильность системы.

Вследствие решения использования ЦОС к алгоритму вычисления весовых коэффициентов предъявляется требование простоты и высокой скорости работы.

Из набора алгоритмов вычисления весовых коэффициентов наиболее предпочтительным, по результатам анализа в [2, с. 344], является рекуррентный алгоритм, так как он обеспечивает наибольшую скорость вычисления оценок весовых коэффициентов, формирующих ноль ДН при невысоких вычислительных затратах.

Данный алгоритм позволяет избежать трудностей, связанных с прямым вычислением совокупности весовых коэффициентов. По сравнению с прямым вычислением весовых коэффициентов, данный класс алгоритмов обычно характеризуется более простыми вычислениями, оказывается менее чувствительным к погрешностям аппаратуры и обеспечивает непрерывную подстройку весовых коэффициентов в соответствии с изменяющимися условиями приёма сигнала.

Для решения задачи будем использовать метод адаптивной системы защиты от АШП с выделенным каналом обработки.

Рассмотрим общую схему устройства компенсации помех (с одним дополнительным каналом), принятых боковыми лепестками ДН антенны (рис. 2), где r_1 – комплексный весовой коэффициент дополнительного канала.

В этом устройстве используется основной (выделенный) канал, подключённый к главной антенне с большим коэффициентом усиления и узкой ДН, и дополнительные каналы, подключённые к антенне с широкой ДН. Диаграммы направленности дополнительных каналов должны перекрывать боковые лепестки основной ДН.

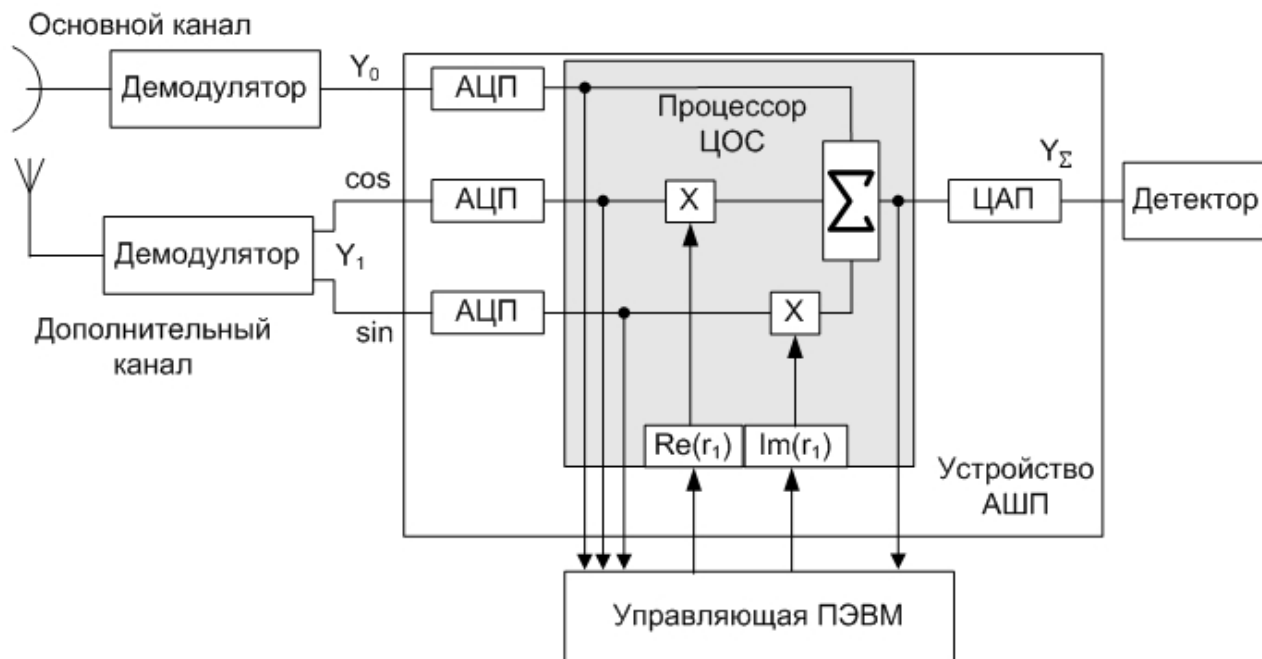


Рис. 2. Функциональная схема ПАКП АШП:

$Re(r_1)$, $Im(r_1)$ – регистры процессоров ЦОС, содержащие компоненты весового коэффициента

В этой модели диаграммообразующая система (ДОС) формирует сигналы с выходов основного и дополнительных каналов. Весовой обработке подвергаются сигналы только дополнительных каналов. Для такой модели можно записать выражение для весового вектора:

$$R = \begin{pmatrix} 1 \\ r_{1n} \\ \vdots \\ r_{Mn} \end{pmatrix}; R_n = \begin{pmatrix} r_{1n} \\ \vdots \\ r_{Mn} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где n – номер шага адаптации; M – количество дополнительных каналов; R_n – вектор комплексных весовых коэффициентов дополнительных каналов на n -м шаге адаптации размерностью M . Запишем вектор сигналов на выходе обработчика как

$$Y = \begin{pmatrix} Y_0 \\ Y_{1n} \\ \vdots \\ Y_{Mn} \end{pmatrix}; Y_n = \begin{pmatrix} Y_{1n} \\ \vdots \\ Y_{Mn} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где Y_0 – выходной сигнал основного канала; Y_n – вектор размерностью M сигналов дополнительных каналов.

Тогда сигнал Y_Σ на выходе адаптивной системы в случае дискретной оценки будет определяться по следующему алгоритму [3, с. 484, 485]:

$$\begin{cases} \hat{\Phi}_{n+1}^{-1} = \frac{n+1}{n} \left(\hat{\Phi}_n^{-1} - \frac{\hat{\Phi}_n^{-1} \cdot Y_{n+1} \times Y_{n+1}^{*T} \cdot \hat{\Phi}_n^{-1}}{2n + Y_{n+1}^{*T} \cdot \hat{\Phi}_n^{-1} \cdot Y_{n+1}} \right), \\ Y_\Sigma = Y_0 + Y_n^{*T} R_n, \\ \hat{R}_{n+1} = \frac{n+1}{n} \left(\hat{R}_n - \frac{\hat{\Phi}_n^{-1} \cdot Y_{n+1} \cdot Y_{n+1}^{*T} \cdot \hat{R}_n}{2n + Y_{n+1}^{*T} \cdot \hat{\Phi}_n^{-1} \cdot Y_{n+1}} \right), \end{cases} \quad (3)$$

где индекс n означает номер шага адаптации, $\hat{\Phi}_n^{-1}$ – оценка корреляционной матрицы помех дополнительных каналов на n -м шаге адаптации размерностью $M \cdot M$, \hat{R}_n – оценка весового вектора дополнительных каналов на n шаге адаптации размерностью $M \cdot 1$.

Для данного алгоритма не имеет значения тип применяемых антенн.

Оценим эффективность рекуррентного алгоритма при различных помеховых ситуациях и конструктивных исполнениях устройства подавления АПП.

Для исследования свойств выбранного рекуррентного алгоритма использовалась математическая модель (3). Вектор спектральных коэффициентов R определялся рекуррентным методом. Кроме того, для сравнения эффективности выбранного алгоритма использовалась градиентная модель оценки весового вектора.

Адаптация в соответствии с данными алгоритма осуществлялась на фоне полезного сигнала, приходящего с

направления главного максимума исходной ДН, уровень мощности которого равен 10 дБ относительно уровня собственных шумов системы. ОСШ вычислялось согласно выражению (4) [2, с. 83]:

$$q = 10 \log \frac{R^{*T} Y_0}{R^{*T} \Phi R}, \quad (4)$$

где R – значение вектора весовых коэффициентов; Y_0 – вектор сигнала; Φ – корреляционная матрица помех.

В данной модели источник полезного сигнала – искусственный спутник Земли. Расстояние от антенной системы до источника сигнала порядка 35 000 км. Главный максимум ДН основного канала ориентирован на источник сигнала.

Расстояние от антенной системы до источника помехи порядка 10 км. Вследствие этого амплитуда сигнала помехи будет многократно превышать амплитуду полезного сигнала вблизи антенной системы и будет приниматься боковыми лепестками ДН дополнительной антенны. Моделирование проводилось для различных ситуаций, в которых изменялось количество дополнительных каналов и источников помех. Мощность источников помех во всех случаях составляла 20 дБ относительно собственного шума системы. Также для сравнения проводилось моделирование вычисления весовых коэффициентов градиентным алгоритмом. В результате работы алгоритмами формировались узкие провалы в направлении источников помех. Результаты моделирования приведены в таблице.

Анализ данных таблицы показывает, что рекуррентный алгоритм даёт статистически лучшие показатели за меньшее число шагов. При этом вычислительные затраты меньше, чем в случае градиентного алгоритма.

Так как в рассматриваемой практической задаче необходима защита только от одного источника помех, то все матрицы в формуле (4) вырождаются в скаляры, что позволяет оптимизировать алгоритм для применения в устройстве ЦОС. Также в случае одного постановщика помех все операции будут проводиться не над комплексными, а над вещественными числами вследствие возможности получения с выхода демодулятора сигнала в квадратуре.

В соответствии с принятыми принципами построения комплекса, в состав ПАК входят следующие приборы и системы:

- антенно-фидерные устройства основного и дополнительных каналов (антенны дополнительных каналов слабонаправленные, перекрывающие уровень боковых лепестков антенны основного канала). АФУ основного канала обеспечивает приём электромагнитных волн круговой поляризации;

- приёмники основных и дополнительных каналов, обеспечивающие приём и основное усиление сигнального и помеховых колебаний;

Результаты моделирования

Количество дополнительных каналов	Количество помеховых источников	Мощность помеховых источников, дБ	Рекуррентный алгоритм		Градиентный алгоритм	
			Выигрыш ОСШ, дБ	Кол-во шагов	Выигрыш ОСШ, дБ	Кол-во шагов
3	2	20	21	3	19,5	18
3	3	20	20	6	18	60
7	2	20	21	3	18	18
7	4	20	19	5	18,5	80
7	5	20	20	5	19	400

– аналого-цифровые преобразователи (АЦП), позволяющие производить оцифровку аналогового сигнала.

– процессор ЦОС, осуществляющий реализацию алгоритма подавления АШП;

– управляющая ПЭВМ, обеспечивающая управление режимами работы ПАКПА АШП, отображение и контроль сигналов на входе и выходе;

– контрольно-измерительная аппаратура, предназначенная для контроля и настройки работы основных узлов ПАК.

Требования, предъявляемые к оборудованию. Рассчитаем производительность аппаратуры, необходимую для вычисления весовых коэффициентов. Для этого оценим вычислительные затраты на одну итерацию алгоритма (4). Для вычисления оценки весового вектора дополнительных каналов \hat{R}_n необходимо произвести $3M^2 + M$ комплексных умножений, $3M^2 + 2M + 1$ комплексных сложений и $2M$ действительных сложений. Для вычисления оценки корреляционной матрицы помех дополнительных каналов, с учетом эрмитивности матрицы $\hat{\Phi}_n^{-1}$, необходимо произвести $0,5 \cdot 1M^2$ комплексных умножений, $2M^2$ комплексных сложений и $2M$ действительных сложений. Переходя к действительным вычислениям получаем, что на одну итерацию алгоритма нужно затратить $15M^2 + 6M$ действительных умножений и $17M^2 + 6M + 2$ действительных сложений. Близкие к оптимальным, оценки весовых коэффициентов достигаются за $2m$ итераций, где m – число источников помех [3, с. 485]. Таким образом, вычислительная мощность, затрачиваемая на адаптацию, равна $2 \cdot m \cdot T_a \cdot (M^2(15K_* + 17) + 6M(1 + K_*)) + 2$, где T_a – время адаптации, с; m – число источников помех; M – количество элементов линейной ФАР, K_* – количество тактов, затрачиваемых на выполнение умножения процессором ЦОС.

Рассчитаем производительность аппаратуры, необходимую для обработки входного сигнала на промежуточной частоте. Обозначим ширину спектра сигнала как f_b . Согласно [3, с. 388], необходимо, чтобы частота дискретизации сигнала была не менее $2,2f_b$ для предотвращения потери информации. В процессе обработки одного отсчёта выполняются M операций комплексного умножения и

сложения, а также одно действительное сложение. В операциях действительной арифметики нужно затратить более $4M(1 + K_*) + 1$ тактов на обработку одного отсчёта, где K_* – количество тактов, затрачиваемых процессором ЦОС на выполнение умножения. Для обеспечения обработки сигнала в реальном масштабе времени тактовая частота ЦОС должна быть не менее $8,8 \cdot f_b \cdot (M \cdot (1 + K_*) + 1)$ Гц.

Для ввода сигнала через дополнительные каналы должен использоваться приёмник типа, идентичного типу приёмника, используемого в основном канале.

Таким образом, получены следующие результаты:

– разработана методика решения задачи на основе рекуррентного вычисления матриц весовых коэффициентов;

– сформирован алгоритм, пригодный для использования в устройствах на базе процессора ЦОС;

– произведено моделирование работы алгоритмов подавления АШП;

– произведён расчёт требований к аппаратной составляющей комплекса.

В дальнейшем планируется усовершенствовать алгоритм для решения задачи подавления помехи от нескольких источников.

В рамках рассмотренных материалов авторам не удалось найти описания устройств, позволяющих осуществлять подавление АШП на промежуточной частоте.

Библиографические ссылки

1. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория : справочник / Я. Д. Ширман, Ю. И. Лосев, Н. Н. Минервин и др. ; под ред. Я. Д. Ширмана. М. : МАКВИС, 1998.

2. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решётки: Введение в теорию : пер. с англ. М. : Радио и связь, 1986.

3. Локационная системотехника / В. Б. Алмазов, Г. С. Богословский, П. А. Брандис и др. ; под общ. ред. В. Б. Алмазова. Харьков ; ВИРТА ПВО, 1993.

V. N. Tyapkin, I. A. Lubkin

THE USE OF RECURRENT ADAPTIVE ALGORITHMS FOR SOLVING THE PROBLEM OF NOISE REDUCTION IN THE SYSTEM OF SATELLITE COMMUNICATION

In the article application of software- and hardware-based complex of suppression of active noise hindrances for improvement of the quality of the received satellite signal is considered.

The complex is destined for suppression of jamming signals from stationary sources.

Keywords: adaptive algorithm, noise reduction, satellite communication, DSP (digital signal processing).

© Тяпкин В. Н., Лубкин И. А., 2010