

УДК 621.396.933.4

Б.Б. ПОСПЕЛОВ, Д.Л. ЧЕЧЕТКИН, В.Ж. ЯЩЕНОК*Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Украина*

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТИВНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ ПОМЕХ В АВИАЦИОННЫХ БОРТОВЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА

Рассмотрены методы сокращения времени процесса адаптации и повышения выходного отношения сигнал-помеха плюс шум устройства адаптивной пространственной обработки сигналов в авиационных бортовых радиотехнических системах информационного обмена при не идентичности характеристик направленности бортовых антенн в условиях эволюций летательного аппарата.

адаптивная пространственная обработка сигналов, время процесса адаптации, выходное отношение сигнал-помеха плюс шум, изрезанность диаграммы направленности, неидентичные характеристики направленности бортовых антенн, эволюции летательного аппарата

Введение

Постановка проблемы и анализ литературы.

Функционирование авиационных бортовых радиотехнических систем информационного обмена (БРСИО) военного назначения характеризуется постоянным наличием в канале информационного обмена мощных преднамеренных помех [1, 2]. В существующих БРСИО для повышения помехозащищенности применяются, в основном, методы, основанные на анализе частотно-временных параметров принимаемых радиосигналов [1, 3]. Дальнейшее улучшение качественных показателей помехозащищенности, основанное на данных методах, возможно путем использования новых видов радиосигналов (например, широкополосных сигналов), помехоустойчивого кодирования и других, а, следовательно, влечет за собой сложные и дорогостоящие изменения аппаратной части БРСИО.

Наиболее перспективными, с точки зрения повышения помехозащищенности существующих БРСИО, следует считать подходы, требующие минимальной доработки уже существующей аппаратуры и не вносящие дополнительные изменения в форму фюзеляжа ЛА.

С этой точки зрения, использование методов повышения помехозащищенности, основанных на анализе пространственно-временных параметров радиосигналов, позволяет значительно улучшить отношение сигнал-помеха плюс шум (ОСПШ) на входе БРСИО без изменения ее основных режимов работы [4 – 6], а в качестве антенной системы использовать бортовые антенны (БА), уже установленные на фюзеляже ЛА. Однако, применение методов адаптивной пространственной обработки сигналов (АПОС), осуществляющих анализ пространственно-временной структуры радиосигналов, в составе БРСИО имеет ряд особенностей.

Во-первых, характеристики направленности используемых БА далеки от изотропных, имеют индивидуальную многолепестковую структуру диаграмм направленностей (ДН) и глубокие провалы (до -30 дБ) [7], т.е. направленные характеристики реальных БА являются не изотропными и не идентичными.

Во-вторых, для БРСИО характерно постоянное изменение направления приема радиосигналов, обусловленное высокой динамичностью ЛА (так угловые скорости эволюций ЛА военного назначения достигают $150 - 300$ °/сек [7]).

Исследование традиционных методов АПОС с учетом указанных особенностей показало их неэффективность для применения в БРСИО [8]. В качестве показателей эффективности АПОС в [8] рассматривались длительность процесса адаптации и выходное ОСПШ устройства АПОС, как наиболее всесторонне характеризующие качество функционирования данного устройства [4 – 6].

Цель статьи. Разработка методов АПОС, устойчивых к не идентичностям характеристик направленности БА и не стационарности направлений приема радиосигналов на основе комплексного учета имеющейся дополнительной информации о форме ДН БА и эволюциях ЛА.

Основной материал

Наиболее простыми, с точки зрения их практической реализуемости для БРСИО, можно считать методы АПОС: минимизирующий средний квадрат ошибки (СКО) и максимизирующий выходное отношение сигнал-помеха плюс шум (ОСПШ) [4 – 6, 8]. Запишем рекуррентные выражения, реализующие данные методы:

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + 2\mu \left[s_0(k) - \mathbf{x}^T(k)\mathbf{w}(k) \right] \mathbf{x}^*(k); \quad (1)$$

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \mu \left[\mathbf{V}^*(k) - y(k)\mathbf{x}^*(k) \right], \quad (2)$$

где $\mathbf{w}(k)$, $\mathbf{w}(k+1)$ – вектор весовых коэффициентов на k -м и $k+1$ -м шаге адаптации; μ – коэффициент обратной связи устройства АПОС; $\mathbf{V}(k)$ – вектор амплитудно-фазовых искажений сигналов, обусловленных характеристиками направленности БА и направлениями прихода сигналов на k -м шаге адаптации; $y(k)$ – выходной сигнал устройства АПОС на k -м шаге адаптации; $\mathbf{x}(k)$ – вектор сигналов на выходах БА на k -м шаге адаптации; символы « T » и « $*$ » – операции транспонирования и комплексного сопряжения соответственно.

Возможность их непосредственной реализации в виде (1) и (2) в составе устройства АПОС для

БРСИО с учетом отмеченных особенностей на борту ЛА исследовалась в работе [8]. Неидентичность характеристик направленности БА в сочетании с эволюциями ЛА приводит к значительным колебаниям сигналов на выходе БА, что приводит к снижению выходного ОСПШ, замедлению процесса адаптации устройства АПОС или даже его полной неработоспособности.

Устранить зависимость времени процесса адаптации устройства АПОС от колебаний уровней сигналов (обусловленных включением-выключением источников помех или изрезанностью ДН БА) можно, используя априорную информацию о суммарной входной мощности принимаемых сигналов. Тогда в рекуррентных выражениях, реализующих методы АПОС: минимизирующий СКО (1) и максимизирующий выходное ОСПШ (2), необходимо использовать переменный коэффициент в цепи обратной связи, который обратно пропорционален суммарной входной мощности сигналов:

$$\mu(k) = \frac{1}{(2+4)P_{\Sigma_{ex}}(k)}, \quad (3)$$

где $P_{\Sigma_{ex}}(k)$ – суммарная входная мощность сигналов на k -м шаге.

При этом выражения (1) и (2) трансформируются к виду:

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + 2\mu(k) \times \left[s_0(k) - \mathbf{x}^T(k)\mathbf{w}(k) \right] \mathbf{x}^*(k); \quad (4)$$

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \mu(k) \left[\mathbf{V}^*(k) - y(k)\mathbf{x}^*(k) \right]. \quad (5)$$

На рис. 1 представлены результаты исследования процедур адаптации в соответствии с (4) и (5) при различных ОСПШ (скорости эволюций ЛА $\omega = 0, 57, 115, 230$ °/с) на входе устройства АПОС (вариант 1). Как видно из рис. 1, данный метод позволяет компенсировать зависимость длительности процесса адаптации от колебаний уровней мощностей сигналов на входе устройства АПОС, а также поддерживать выходное ОСПШ не ниже 5 дБ при входном ОСПШ до $-20 \div -25$ дБ и угловой скорости эволюций до 60 °/сек.

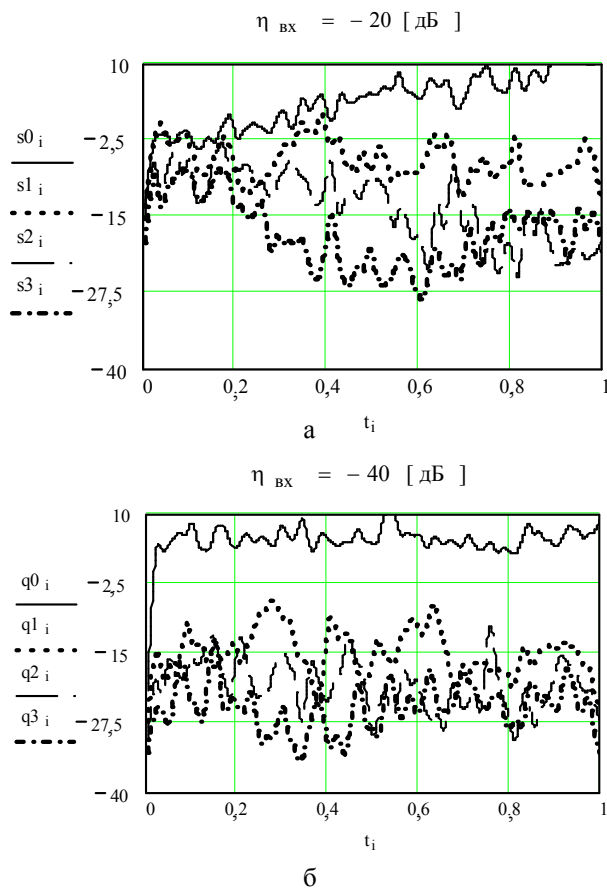


Рис. 1. Выходное ОСПШ устройства АПОС (вариант 1)

Для практической реализации данного метода нужно иметь дополнительную антенну с ДН, близкой к изотропной, и измеритель мощности сигналов, которые принимаются данной антенной. Сложность реализации измерительной антенны с ДН, близкой к изотропной [7], одновременно является и недостатком данного метода.

Устранить зависимость показателей эффективности устройства АПОС от колебаний сигналов на выходах БА, обусловленных не идентичностью и изрезанностью ДН БА при наличии эволюций ЛА, можно, используя априорную информацию о мощности принимаемых сигналов.

Измерения мощности сигналов можно осуществлять при помощи одних и тех же антенн, которые применяются для обработки сигналов, и рассчитывать индивидуальный канальный коэффициент обратной связи в каждом адаптируемом канале обрат-

но пропорциональный суммарной мощности сигналов, которые действуют на выходе соответствующей БА. Тогда в (4) и (5) в качестве коэффициента обратной связи нужно использовать:

$$\boldsymbol{\mu}^T(k) = [\mu_1(k), \dots, \mu_N(k)];$$

$$\mu_i(k) = \frac{1}{(2 \div 4)P_{\text{вых БА } i}(k)}, \quad (6)$$

где $\boldsymbol{\mu}(k)$ – вектор канальных коэффициентов обратной связи на k -м шаге адаптации; $\mu_i(k)$ – коэффициент обратной связи в i -м канале адаптации на k -м шаге; $P_{\text{вых БА } i}(k)$ – суммарная мощность сигналов на выходе i -й БА на k -м шаге.

На рис. 2 представлены результаты исследований процедур адаптации в соответствии с (5) при применении индивидуального канального коэффициента обратной связи (6) при различных ОСПШ (скорости эволюций ЛА $\omega = 0, 57, 115, 230$ °/с) на входе устройства АПОС (вариант 2).

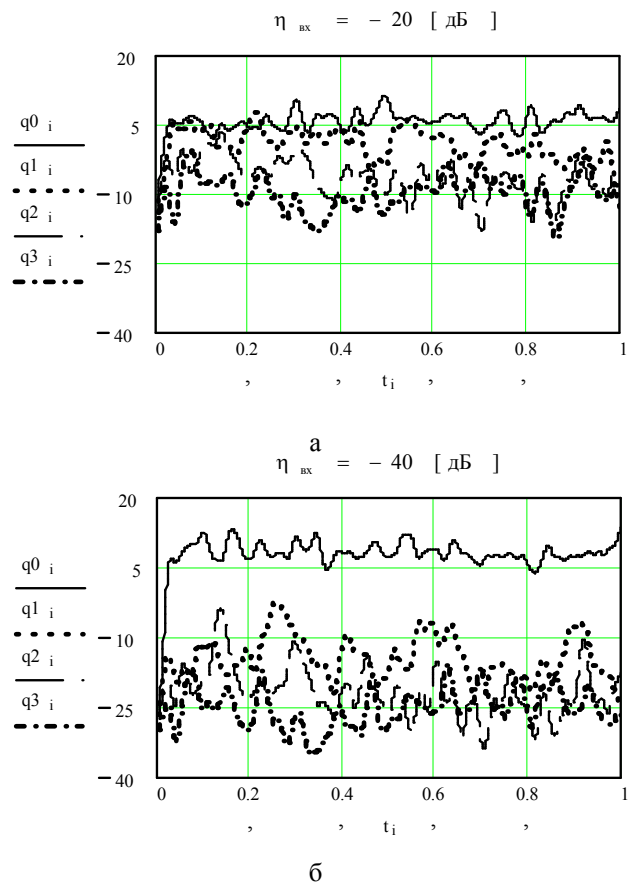


Рис. 2. Выходное ОСПШ устройства АПОС (вариант 2)

По результатам исследований видно, что использование (4) и (5) с коэффициентами обратной связи вида (6) позволяет получить более высокие характеристики, чем при использовании (3), при этом выходное ОСПШ не ниже 5 дБ можно поддерживать при входном ОСПШ до -30 дБ, в некоторых ситуациях до -40 дБ, и скорости эволюций до 100-120 °/сек.

Исследуемые методы адаптации имеют существенные недостатки, которые нельзя не учитывать в условиях приема сигналов в полете. Так, метод АПОС, минимизирующий СКО, предусматривает знание на приемной стороне точной копии полезного сигнала, а метод АПОС, максимизирующий ОСПШ, предусматривает точное знание направления прихода полезного сигнала и его постоянное отслеживание, что не всегда возможно в быстро изменяющихся условиях полета. Для компенсации данных недостатков предлагается модифицированный метод АПОС для БРСИО, который позволяет комплексировать априорную информацию о форме полезного сигнала и направлении его прихода. Структурная схема, которая реализует данный метод, представлена на рис. 3, а рекуррентное уравнение, реализующее данный метод, можно представить в виде

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) + \boldsymbol{\mu}(k) \times \left(\xi_2 \mathbf{V}_s^*(k) - \left(\mathbf{w}^T(k) \mathbf{x}(k) - \xi_1 s_0(k) \right) \mathbf{x}^*(k) \right), \quad (7)$$

где ξ_1 и ξ_2 – весовые коэффициенты комплексирования априорной информации.

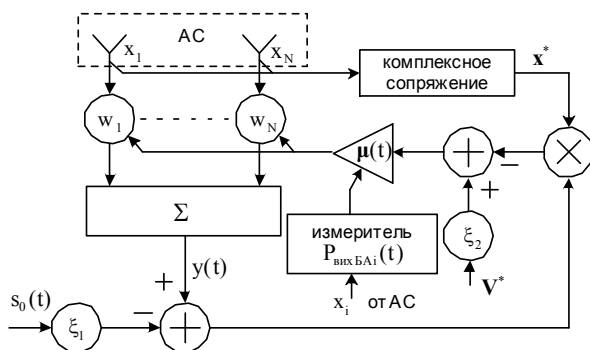


Рис. 3. Структурная схема устройства АПОС, реализующего модифицированный метод
Комплексирование осуществляется методом

взвешенного суммирования измерений с весовыми коэффициентами ξ_1 и ξ_2 . Для того, чтобы схема обратной связи не приводила к возбуждению устройства АПОС, необходимо, чтобы выполнялось равенство $-\xi_1 + \xi_2 = 1$.

Зная дисперсии измерения априорной информации, при помощи данного метода можно получить меньшую погрешность определения управляющего воздействия и, как следствие, выигрыш в выходном ОСПШ:

$$\eta_0 - \eta'_0 = \frac{(2N\sigma_c^4 + N\sigma_c^2\sigma_b^2)(\nu - 1)}{[N(\sigma_c^2 + \sigma_b^2) + \nu\sigma_c^2\sigma_b^2](N + 2b\sigma_c^2)}, \quad (8)$$

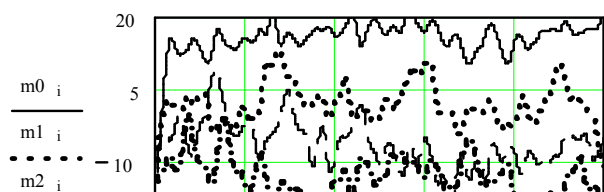
где η_0, η'_0 – нормированное значение выходного отношения сигнал-шум для модифицированного метода АПОС и метода, максимизирующего выходное ОСПШ соответственно; N – число БА; σ_c – дисперсия определения направления приема полезного сигнала с учетом искажений, вносимых изрезанностью БА; σ_b – дисперсия определения взаимокорреляционной матрицы входных сигналов и опорного; b, ν – нормировочные постоянные.

На рис. 4 представлены результаты исследования модифицированного метода АПОС (7) с переменными коэффициентами обратной связи, которые рассчитываются в соответствии с (6) при скорости эволюций ЛА $\omega = 0,57, 115, 230$ °/с (вариант 3).

Как видно из рис. 4, модифицированный метод АПОС позволяет получить более высокое выходное ОСПШ.

Выигрыш в выходном ОСПШ при $\xi_1 = \xi_2 = 0,5$ составляет 3 – 5% в сравнении с методами АПОС, минимизирующим СКО и максимизирующим ОСПШ, но он может быть более значительным при полном отсутствии какого либо вида априорной информации, когда традиционные методы АПОС не функционируют вообще, что в особенности важно в условиях высокоскоростных эволюций.

$$\eta_{\text{вх}} = -20 \text{ [дБ]}$$



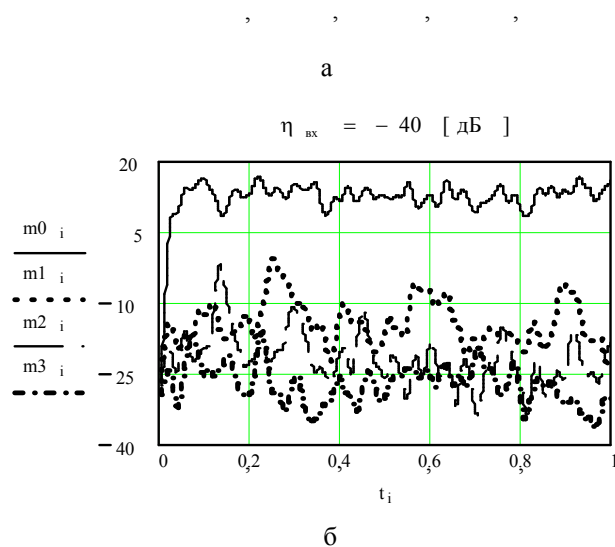


Рис. 4. Выходные ОСПШ устройства АПОС (вариант 3)

Заключение

Предложенные усовершенствованные методы АПОС являются устойчивыми к изрезанности и не идентичности характеристик направленности БА и изменению направлений прихода сигналов, что позволяет поддерживать выходное ОСПШ устройства АПОС не ниже 5 дБ при глубине изрезанности ДН БА до -20 дБ, входном ОСПШ до -40 дБ и угловых скоростях эволюций ЛА до 100-120 °/сек.

Модифицированный метод АПОС является не чувствительным к точности получаемой априорной информации о полезном сигнале и направлении его прихода, а также позволяет устройству АПОС функционировать при полном отсутствии одного какого-либо вида априорной информации, при этом показатели качества функционирования будут соот-

ветствовать тому методу, для которого имеется возможность получать (измерять) априорную информацию.

Литература

1. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба. – М.: Воениздат, 1989. – 350 с.
2. Краснов А., Кобрин К. Роль воздушных средств информационной войны и проблемы борьбы с ними // Зарубежное военное обозрение. – 1998. – № 10. – С. 27-33.
3. Защита от радиопомех / Под ред. М.В. Максимова. – М.: Сов. радио, 1976. – 496 с.
4. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
5. Адаптивная компенсация помех в каналах связи / Под ред. Ю.И. Лосева. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.
6. Пистолькорс А.А., Литвинов О.С. Введение в теорию адаптивных антенн. – М.: Наука, 1991. – 200 с.
7. Резников Г.Б. Самолетные антенны. – М.: Сов. радио, 1962. – 456 с.
8. Поспелов Б.Б., Мисик Ф.Ф., Чечоткин Д.Л. Дослідження впливу еволюцій літального апарату на ефективність бортового пристрою адаптивної просторової обробки сигналів та завад // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – Х.: НАКУ «ХАІ», 2006. – Вип. 30. – С. 151-158.

Поступила в редакцию 25.10.2006

Рецензент: д-р техн. наук, доцент А.В. Лемешко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.