

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛА В ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЕ РАДИОСВЯЗИ

Введение

Локальные ведомственные радиосети стремительно развивались на территории Украины в интересах отдельно взятых государственных структур, служб безопасности, пожарной охраны, скорой помощи и т.д. При этом, существующие сети имеют ограниченный спектр услуг. Однако в последнее время Украина движется в направлении объединения перечисленных сетей в одну общенациональную ведомственную сеть.

В результате этого был издан ряд Законов Украины, указов Президента Украины, распоряжений и постановлений Кабинета Министров Украины о необходимости создания на территории Украины единой национальной сети связи, которая сможет обеспечить эффективное функционирование ведомственных служб. Основной задачей этой сети является обеспечение профессиональной связи в обычных и особенно в чрезвычайных условиях. Такой системой позволяющей наилучшим образом удовлетворить перечисленные условия, является цифровая транкинговая система радиосвязи (ТСР), основанная на стандарте TETRA. Стандарт TETRA разработан Европейским институтом телекоммуникационных стандартов ETSI (European Telecommunications Standards Institute) для цифровых транкинговых ведомственных систем радиосвязи (PMR) и уже получил широкое признание в мире. Стандарт поддерживает работу в двух режимах разделения каналов: TDMA (временное разделение каналов), что позволяет обеспечить работу четырех временных каналов на одной частоте и FDMA (частотное разделение каналов), что обеспечивает работу в сетке частот с шагом 25 КГц и минимальным дуплексным разносом 10 МГц [3].

Для построения ТСР TETRA на территории Украины выделен спектр радиочастот 413-420 МГц и 423-430 МГц, а также планируется выделение спектра радиочастот: для использования подвижной радиослужбой (380,875-393,95 МГц; 394,95-400,05 МГц; 400,15-401 МГц) и для использования подвижной радиослужбой, кроме воздушной подвижной (401-413 МГц; 420-423 МГц; 442,125-442,525 МГц; 447,74-448,14 МГц). В данном диапазоне частот функционирует, а также запланированы к внедрению множество других радиоэлектронных средств (РЭС), которые создают сложную электромагнитную обстановку (ЭМО). К таким технологиям относятся: различные виды транкинговой связи, радиорелейная связь, радиолокация, спутниковая радиосвязь и т.д. В результате этого возникает задача проведения мероприятий по обеспечению нормального уровня помехоустойчивости сигнала. В ТСР TETRA для выполнения этих целей используется помехоустойчивое канальное кодирование сигнала, а также дифференциальная квадратурная фазовая модуляция со сдвигом символов $\pi/4$ [3]. Однако, как показывает практика, этого недостаточно. Поэтому возникает необходимость в применении дополнительных методов, позволяющих повысить помехоустойчивость сигнала в ТСР TETRA. Такими методами являются методы пространственно-временной обработки сигнала (ПВОС).

Повышение помехоустойчивости сигнала методами пространственно-временной обработки сигнала

Поскольку для реализации оптимальных систем ПВОС, обеспечивающих обнаружение и оценку многомерных сигналов, требуется исчерпывающая априорная информация о пространственных и временных характеристиках полей сигнала, шума и помех, а фактически имеются сведения лишь о некоторых из этих характеристик, то недостающая информация должна быть получена в процессе функционирования системы [1, 2]. Исчерпывающая априорная информация о пространственных и временных характеристиках полей сигнала, шума и помех может быть получена в процессе выполнения алгоритмов адаптивных антенных решето (ААР) синтезированных по различным критериям.

Алгоритм ААР, синтезированный по критерию минимума среднеквадратического отклонения (МСКО)

Вектор весовых коэффициентов (ВВК) по критерию МСКО определяется из рекуррентной формулы [1]:

$$\bar{W}(k+1) = \bar{W}(k) + 2\mu [d(k) - \bar{W}(k)^T \bar{X}(k)] \bar{X}(k), \quad (1)$$

где k – дискретное время; μ – шаговый коэффициент; $d(k)$ – опорный сигнал в момент времени k ; $\bar{X}(k)$ – вектор входных воздействий в момент времени k .

Алгоритм ААР, синтезированный по критерию максимума отношения сигнал/помеха (МОСП)

Алгоритмы, использующие априорную информацию о направлении прихода полезного сигнала, синтезируются по критерию максимума выходного отношения мощности полезного сигнала к сумме мощностей помех и шума [1]:

$$\bar{W}(k+1) = \bar{W}(k) - 2\mu [\bar{X}_n^T(k) \bar{W}(k) \bar{X}_n(k) - \bar{V}_c]. \quad (2)$$

где $\bar{V}_c^T = [A_{1c} e^{i\varphi_{1c}}, A_{2c} e^{i\varphi_{2c}}, \dots, A_{Nc} e^{i\varphi_{Nc}}]$ – вектор волнового фронта сигнала, $A_{ic} = \bar{E}_i(\Theta_c, \Phi_c) \bar{e}_c$ – векторная характеристика направленности i -го антенного элемента по напряженности электромагнитного поля, $\bar{E}_i(\Theta_c, \Phi_c)$ – напряженность электромагнитного поля; \bar{e}_c – единичный вектор поляризации приходящей волны.

Алгоритм ААР, синтезированный по критерию минимум выходной мощности (МВМ)

Для данного алгоритма в качестве целевой функции используется значение мощности выходного сигнала ААР

$$E\{y^2(t)\} = \bar{W}^T R_{yy} \bar{W}, \quad (3)$$

где R_{yy} – матрица пространственной корреляции входной смеси сигналов и помех.

Непосредственно минимизация (3) может быть выполнена различными методами безусловной оптимизации [1].

При этом ВВК определяется выражением

$$\bar{W}(k+1) = \bar{W}(k) - 2\mu [\bar{W}^T(k) \bar{X}(k)] [\bar{X}(k) - \bar{W}(k) (\bar{W}^T(k) \bar{X}(k))]. \quad (4)$$

При наличии точной информации о сигнале и при условии стационарности СПО алгоритмы, синтезированные по критериям МСКО, МОСП и МВМ, обеспечивают примерно одинаковую скорость сходимости и эффективность подавления помех [1].

Недостатком приведенных алгоритмов является то, что параметры, устанавливаемые параметру μ , необходимо выбирать до начала настройки ВВК. В случае изменения СПО на входе ААР, система никаким образом не реагирует на этот факт и настройка ВВК производится для предыдущей СПО.

При этом полезный результат можно получить используя при решении задач ПВОС метод Калмановской фильтрации [1, 2]. Этот метод позволяет производить линейную фильтрацию случайных сигналов на основе решения дифференциальных (разностных) уравнений.

Выражение для определения ВВК можно так же записать в рекуррентном виде:

$$\vec{W}(k+1) = \vec{W}(k) - 2\mu [\vec{X}_n^T(k) \vec{W}(k) \vec{X}_n(k) - \vec{V}_c]. \quad (5)$$

где $\vec{V}_c^T = [A_{1c} e^{i\varphi_{1c}}, A_{2c} e^{i\varphi_{2c}}, \dots, A_{Nc} e^{i\varphi_{Nc}}]$ – вектор волнового фронта сигнала.

Данное выражение является модификацией эвристического алгоритма Аппельбаума [2].

Необходимо заметить, что снижение эффективности приема сигнала может происходить вследствие переключения временных каналов одного абонента к другому на одной частотной позиции и соответственно изменения угла прихода полезного сигнала, так как абоненты.

работающие на одной частоте, являются пространственно разнесенными. Результатом этого является необходимость настройки ВВК для каждого изменения временного интервала. Рассмотрим, какое количество времени необходимо ААР для настройки ВВК.

В процессе адаптации ААР необходимо выполнить определенное количество шагов рекурсии. Время на выполнение одного шага рекурсии t_p можно определить из соотношения

$$t_p = K_{ком}(N-1)^2 t_{кц}, \quad (6)$$

где $K_{ком}$ – количество командных циклов, выполняемых на одном шаге ($K_{ком} \approx 25$); N – количество антенных элементов; $t_{кц}$ – время выполнения командного цикла.

Например, время выполнения команд процессором ADSP-2181 равно 25 – 30 нс (до 40 MIPS). Все команды выполняются за один командный цикл.

Как видно из (6), время выполнения шага рекурсии зависит от количества антенных элементов (АЭ) в ААР. При увеличении количества АЭ увеличивается количество параметров, которые необходимо обработать, соответственно это приводит к увеличению длительности шага рекурсии.

Проведем расчет количества шагов рекурсии, которые успеет выполнить система за время одного временного интервала, длительность которого для ТСС TETRA составляет 14,57 мс [3].

Расчет количества шагов рекурсии за время одного временного интервала производится следующим образом:

$$K_p = \frac{t_{ин}}{t_p} = \frac{t_{ин}}{K_{ком}(N-1)^2 t_{кц}}, \quad (7)$$

где $t_{ин}$ – длительность временного интервала 14,57 мс.

Результаты расчета количества шагов рекурсии, выполняемых за время одного временного интервала, а также длительность этих шагов в зависимости от количества АЭ в ААР приведены в таблице.

Количество антенных элементов, N	Время на выполнение одного шага рекурсии, t_p нс.	Количество шагов рекурсии за время одного временного интервала, K_p
4	6750	2158
8	36750	396
16	168750	86

С помощью имитационного моделирования проведены исследования по изменению скорости сходимости алгоритма ПВОС и эффективности подавления помех на выходе ААР этим алгоритмом. Так как эффективность применения ПВОС определяется ОСПШ на выходе ААР, по сравнению со значением на входе, то в основу алгоритма адаптации был положен метод Калмановской фильтрации на основе критерия МОСП (5). Для проведения исследования были использованы три варианта построения ААР, которые представлены в таблице. Как видно из данной таблицы, при увеличении количества АЭ в ААР увеличивается время выполнения одного шага рекурсии. Это объясняется тем, что количество входов в процессор адаптации увеличивается с увеличением количества АЭ. Данный факт, в свою очередь, приводит к увеличению времени обработки параметров снятых с выходов АЭ и подверженных обработке в процессоре адаптации. Так как время, отведенное на настройку ВВК, ограничено длительностью временного интервала ТСП TETRA, то увеличение длительности шага рекурсии приводит к уменьшению количества этих шагов за время одного временного интервала. Необходимо также отметить, что сигналы от абонентов поступают на вход ААР под различными углами относительно нормали АР. Соответственно при изменении каждого из четырех временных интервалов будет изменяться и угол прихода сигнала на вход ААР. Из теории ПВОС известно, что изменение угла прихода сигнала аналогично изменению частоты приема сигнала [1]. Поэтому во время передачи каждого нового временного интервала, должна про-

изводиться повторная настройка ВВК. В качестве исходных данных были взяты следующие значения: угол прихода сигнала от первого абонента $\theta_{c1} = 15^\circ$, от второго абонента $\theta_{c1} = 120^\circ$, от третьего абонента $\theta_{c1} = 45^\circ$, от четвертого абонента $\theta_{c1} = 260^\circ$, угол прихода помехи $\theta_{п} = 30^\circ$, ОСПШ на входе в ААР равно 7 дБ .

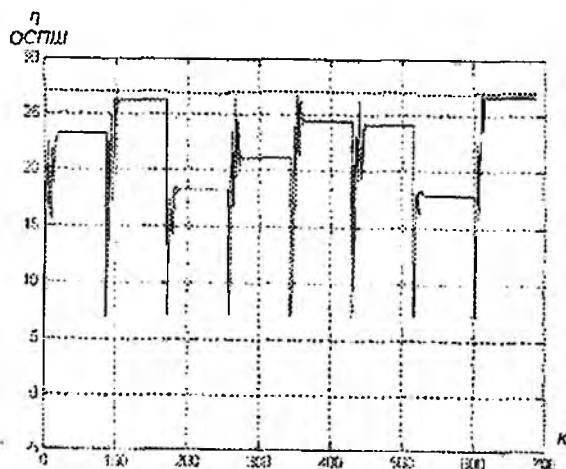


Рис 1

В результате проведенного имитационного моделирования было установлено, что наибольший интерес представляет случай, когда ААР состоит из 16 АЭ. График зависимости ОСПШ на выходе ААР от количества шагов рекурсии для данного случая представлен на рис. 1. Увеличение количества АЭ приводит к росту ОСПШ на выходе ААР и составляет в случае использования 4 АЭ – $10-19 \text{ дБ}$, 8 АЭ – $16-23 \text{ дБ}$ и 16 АЭ – $18-27 \text{ дБ}$. Однако, как видно из графика на рис. 1, значение ОСПШ на выходе ААР изменяется на различных временных интервалах, что объясняется различными углами прихода сигнала и, соответственно, возможностью подавления помех в таких условиях. ОСПШ на выходе ААР изменяется через каждые 86 шагов рекурсии, что соответствует количеству шагов рекурсии выполняемых за время одного временного интервала для 16-тиэлементной ААР и соответствует значению, приведенному в таблице. Из графика на рис. 1 также видно, что ОСПШ на выходе ААР имеет постоянное значение не на всем временном интервале. В пределах каждого из них ОСПШ в начальный промежуток времени возрастает, начиная со значения в 7 дБ , и лишь через некоторый промежуток времени принимает установившееся значение. Такой результат является следствием поведения ВВК. При изменении временного интервала изменяется угол прихода сигнала, следствием чего является динамика СПО на входе в ААР. Соответственно, при изменении СПО на входе в ААР, процессор адаптации не может подавить помехи, поступающие вместе с полезным сигналом. Для этого производится повторная настройка ВВК для текущей СПО, результатом чего является увеличение ОСПШ на входе в ААР. Через некоторый промежуток времени ВВК принимает установившееся значение, что приводит к постоянному ОСПШ на выходе ААР. Соответственно, увеличение числа АЭ позволяет более точно анализировать СПО, результатом чего является увеличение ОСПШ на выходе ААР.

Так же, как видно из таблицы, увеличение количества АЭ приводит к уменьшению количества шагов рекурсии выполняемых за время одного временного интервала. Однако количество шагов рекурсии необходимых для настройки ВВК не изменяется. Результатом этого является снижение эффективности подавления помехи. Как видно из графика на рис. 1, для 16-тиэлементной ААР время настройки ВВК составляет порядка 15 % всей длительности временного интервала. Данная ситуация характерна и для случая использования 4- и 8-миэлементных ААР и соответственно равна 1 и 4 %.

Добиться повышения эффективности обработки сигнала ААР возможно уменьшением времени настройки ВВК. Указанный результат можно получить при использовании допол-

нительных мер по адаптации к текущей СПО. Для этого необходимо объяснить некоторую особенность настройки ВВК, определенную из графика представленного на рис 1. При переходе на новый временной интервал система производит адаптацию ААР к текущей СПО, это вызвано тем, что на каждом из четырех временных интервалов, передается информация от одного из четырех абонентов разнесенных в пространстве. При этом изменяется угол прихода полезного сигнала, что, в свою очередь, приводит к изменению СПО на входе ААР. Однако после окончания передачи одного кадра, который состоит из четырех временных интервалов, производится повторная передача временных интервалов от абонента, для которого уже производилась настройка ВВК. Поэтому оптимальным, позволяющим сократить время настройки ВВК, является способ запоминания ВВК для каждого из четырех временных интервалов. При этом значение ВВК, рассчитанное во время передачи определенного временного канала, записывается в запоминающее устройство и будет считано из него в момент начала повторного использования этого временного канала. Соответственно, настройка ВВК производится со значения, считанного из запоминающего устройства. Результаты использования данного предложения по повышению эффективности представлены на рис 2.

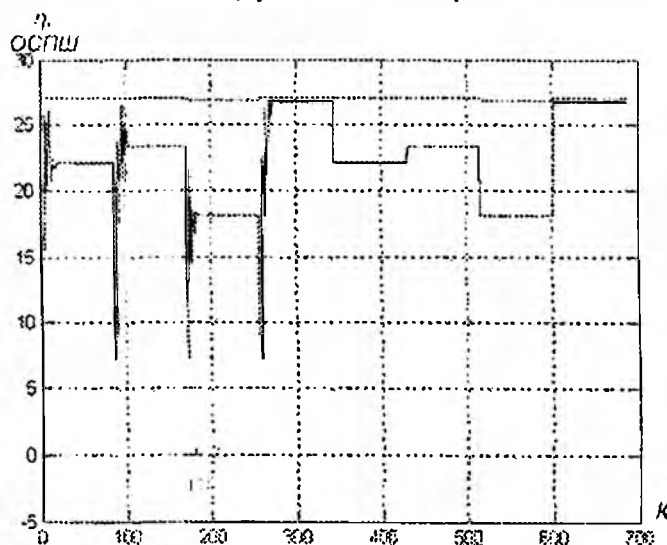


Рис 2

Как видно из графика на рис 2, применение способа запоминания ВВК приводит к повышению ОСПШ на выходе ААР используемой в ТСП TETRA. Повышение эффективности выражено в устранении периода настройки ВВК к текущей СПО, начиная с момента передачи второго кадра. Рассмотрим график на рис 2. В период передачи первого кадра производится прием сигналов от четырех абонентов, разнесенных в пространстве. В результате этого СПО на выходе ААР изменяется во время приема каждого из четырех временных интервалов первого кадра. Это вызвано, как было указано выше, изменением угла прихода сигнала. Однако, начиная с момента передачи второго кадра, начальная настройка ВВК не производится. Передача второго кадра начинается с 345-го шага рекурсии. В начальный момент времени на вход каждого АЭ ААР поступает смесь полезного сигнала, помех и шума. При этом угол прихода полезного сигнала должен быть известен, чего требует критерий МОСП. Далее процессор адаптации выделяет полезный сигнал на фоне помех и шума путем настройки ВВК к текущей СПО. В результате этого ОСПШ на выходе ААР возрастает и в определенный момент времени, когда ВВК переходит в установившееся состояние, достигает максимального значения. Это значение сохраняется до конца приема одного временного интервала. В конце приема первого временного интервала первого кадра 86-й шаг рекурсии, значение ВВК будет сохранено. Это значение будет восстановлено лишь в момент приема первого временного интервала второго кадра, что соответствует 345-му шагу рекурсии. Так как системе устанавливается начальное значение ВВК, уже настроенное для данного значения СПО, то ОСПШ

принимает максимальное значение уже с 345-го шага рекурсии. В момент времени окончания приема первого временного интервала второго кадра, что соответствует 430-му шагу рекурсии, значение ВВК снова будет сохранено. Для остальных временных интервалов процесс запоминания ВВК выполняется аналогичным образом.

Заключение

Применение TSP TETRA на рынке профессиональной радиосвязи Украины не может оставить без внимания вопрос помехоустойчивого функционирования стандарта в условиях сложившейся ЭМО. Методы, применяемые в данном стандарте, не могут достаточным образом решить эту задачу, что приводит к необходимости применения дополнительных методов. В качестве такого метода может быть использована ПВОС. При этом ПВОС позволяет повысить ОСПЦ на выходе ААР на значение порядка 11 – 20 дБ.

Список литературы: 1. *Марчук Л. А.* Пространственно-временная обработка сигналов в линиях радиосвязи. ВАС, 1991. 136 с. 2. *Монзиньо Р. А., Миллер Т. У.* Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 486с. 3. *ETS 300 392-2* Radio Equipment and Systems (RES); Trans-European Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 2: Air Interface (AI). Date: March 1996.

*Харьковский национальный
университет радиозлектроники*

Поступила в редколлегию 17.11.2008