

УДК 621.391

В.И. Слюсар<sup>1</sup>, С.В. Волошко<sup>2</sup><sup>1</sup> *Центральный научно-исследовательский институт вооружения и военной техники Вооруженных Сил Украины, Киев*<sup>2</sup> *Военный институт телекоммуникаций и информатизации Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт", Полтава*

## ПОМЕХОЗАЩИЩЕННАЯ ДЕМОДУЛЯЦИЯ СИГНАЛОВ N-OFDM В ПРИЕМНОМ СЕГМЕНТЕ ЦИФРОВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

*В статье предлагается вариант помехозащищенной демодуляции сигналов N-OFDM, связанный с их двухэтапной обработкой. Рассмотрены этапы реализации предлагаемого варианта двухэтапной демодуляции сигналов N-OFDM, приведены соответствующие аналитические выражения. Приведены преимущества предложенного варианта двухэтапной обработки сигналов N-OFDM по сравнению с вариантом одноэтапной обработки, проанализировано его значение в научной и практической областях, приведены направления дальнейших исследований.*

**Ключевые слова:** сигнал N-OFDM, демодуляция, помехозащищенность, двухэтапная обработка.

### Введение

**Постановка проблемы.** Как известно, традиционным методом подавления активных помех в станциях беспроводной связи, использующих цифровые антенные решетки (ЦАР), является формирование в виртуальной диаграмме направленности (ДН) провалов, ориентированных на источники помеховых сигналов. С этой целью может использоваться нелинейная весовая обработка либо вычитание мешающих откликов из совокупности принятых сигналов с помощью весовых коэффициентов, рассчитанных по оценкам угловых координат источников помех. Указанные варианты пространственной режекции приводят к необходимости восстановления ДН вторичных каналов или проведения, с учетом искажения ДН, коррекции оценок амплитуд, например, по результатам оценивания параметров пилот-сигналов.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В качестве одного из перспективных методов модуляции сигналов в каналах связи, как известно, может рассматриваться N-OFDM.

При использовании в станции беспроводной связи технологии цифрового диаграммообразования (ЦДО) оптимальная демодуляция N-OFDM сигналов возможна по отсчетам аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в рамках одноэтапной обработки. В основе ее лежит подстановка значений характеристик направленности (ХН) вторичных пространственных каналов приемной ЦАР в матричную запись откликов частотных фильтров, синтезированных в результате операции быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Альтернативный вариант обработки состоит в переходе к двухэтапной демодуляции N-OFDM сиг-

налов [1, 2]. Суть ее сводится к тому, что на первом этапе определяются амплитуды сигналов по выходам вторичных приемных каналов ЦАР в каждом временном отсчете. При этом могут использоваться оценки угловых координат направлений приема сигналов от передатчиков средств связи, полученные на этапе вхождения в связь, либо рассчитанные по данным средств спутниковой навигации географические координаты объектов.

**Формулирование цели статьи.** Целью статьи является рассмотрение альтернативного варианта помехозащищенной демодуляции сигналов N-OFDM, связанного с их двухэтапной обработкой.

### Изложение основного материала исследования

Суть первого этапа демодуляции сводится к оцениванию амплитуд сигналов по выходам синтезированных в результате ЦДО вторичных пространственных каналов в каждом временном отсчете. Именно данный этап является основным в решении задачи отстройки от активных помех. Специфика решения связанных задач в отличие от радиолокационных измерений позволяет использовать при этом известные угловые координаты направлений приема информационных сигналов, измеренные на этапе вхождения в связь, либо рассчитанные по данным спутниковой навигационной системы, поступившим по служебным каналам от корреспондентов. При этом предполагается, что в режиме вхождения в связь предусмотрена возможность мониторинга электромагнитной обстановки в эфире, что обеспечивает обнаружение помеховых сигналов и определение угловых координат их источников.

Промежуточное оценивание амплитуд сигналов на выходе процедуры цифрового диаграммооб-

разования позволяет в каждом временном отсчете отсепарировать сигналы помех путем использования в дальнейшей обработке лишь той части вектора амплитуд, которая соответствует информационно полезным сигналам.

Наличие полной информации об угловых координатах излучателей N-OFDM сигналов и помех позволяет представить вектор выходных напряжений U процедуры ЦДО при использовании одиночной поляризации излучения в виде матричного выражения

$$U = Q \cdot W + n = [Q_S \mid Q_P] \cdot \begin{bmatrix} W_S \\ W_P \end{bmatrix} + n, \quad (1)$$

где  $Q = [Q_S \mid Q_P]$  – блочная матрица значений ДН вторичных пространственных каналов в направлениях на источники N-OFDM (блок  $Q_S$ ) и мешающих (блок  $Q_P$ ) сигналов;

$W^T = [W_S \mid W_P]$  – блочный вектор амплитуд N-OFDM сигналов  $W_S$  и помех  $W_P$ ;

“T” – символ операции транспонирования;

n – вектор напряжений шумов.

Анализ приведенного матричного соотношения позволяет сделать вывод о возможности разделения на этапе оценивания вектора амплитуд  $W^T = [W_S \mid W_P]$  сигналов N-OFDM и сигналов помех. С этой целью при формировании оптимальной оценки вектора амплитуд  $\hat{W} = (Q^T Q)^{-1} Q^T U$  вычисляются лишь сегменты вектора  $\hat{W}$ , соответствующие информационным каналам связи, то есть блок  $W_S$ . При этом сегмент вектора оценок амплитуд помеховых сигналов (блок  $W_P$ ) не формируется вообще.

Аналогично можно осуществить разделение полезных сигналов двойной поляризации и помех в каждом из поляризационных каналов путем использования в последующей обработке лишь субвектора обобщенных амплитуд, соответствующих информационным сигналам двойной поляризации [3]. Указанный массив субвекторов оценок обобщенных амплитуд сигналов двойной поляризации должен формироваться в каждом временном отсчете. Для их оценивания предлагается воспользоваться все тем же традиционным методом наименьших квадратов.

Главным условием, обеспечивающим возможность применения предлагаемого метода помехозащиты, является ограничение на общее количество одновременно действующих источников сигналов и помех. Дело в том, что разделение мешающих и полезных сигналов основывается на решении системы уравнений, поэтому общее количество неизвестных амплитуд сигналов и помех в ней не должно превы-

шать общего количества уравнений системы. Учитывая комплексный характер напряжений сигналов по выходу процедуры ЦДО и комплексное представление их амплитуд, условие разделения сигналов по выходу R-канальной ЦАР, приходящих от M станций беспроводной связи и P источников помех с известными угловыми координатами, может быть сформулировано в виде:

$$M+P \leq R.$$

Другим ограничением является требование не превышения разрядной сетки АЦП результирующим напряжением смеси сигналов и помех по выходу аналогового приемного тракта. Для его выполнения в случае воздействия помех может применяться цифровое управление аттенуаторами, размещенными предварительно в каждом приемном канале, что позволит удерживать уровень сигнальной смеси в пределах апертуры АЦП. Кроме того, возможно использование режима пониженной мощности излучения полезных сигналов передающей станцией с попутным снижением порядка их модуляции и соответствующим уменьшением скорости передачи данных. При изложении последующих выкладок предполагается, что все указанные ограничения соблюдены.

Приведенные выражения соответствуют случаю линейной ЦАР. Для плоской антенной решетки при факторизуемых диаграммах направленности ее элементов в качестве матрицы Q при монополяризационном приеме следует использовать подстановку блочного транспонированного произведения матриц ХН:

$$U = ([Q_S \mid Q_P] \bullet [V_S \mid V_P]) \cdot \begin{bmatrix} W_S \\ W_P \end{bmatrix} + n, \quad (2)$$

где  $\bullet$  – символ блочного транспонированного торцевого произведения матриц.

При использовании сигналов двойной поляризации в случае плоской ЦАР имеет место более сложная запись вектора напряжений:

$$\begin{bmatrix} U_H \\ U_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{HS} & q_{HV_S} Q_{VS} & Q_{HP} & q_{HV_P} Q_{VP} \\ q_{VH_S} Q_{HS} & Q_{VS} & q_{VH_P} Q_{HP} & Q_{VP} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} V_{HS} & d_{HV_S} V_{VS} & V_{HP} & d_{HV_P} V_{VP} \\ d_{VH_S} V_{HS} & V_{VS} & d_{VH_P} V_{HP} & V_{VP} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} W_{HS} \\ W_{VS} \\ W_{HP} \\ W_{VP} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_H \\ n_V \end{bmatrix}. \quad (3)$$

На втором этапе демодуляции по выборке оценок вектора амплитуд  $N$ -OFDM сигналов  $W_s$  формируют отклики частотных фильтров с помощью БПФ:

$$\hat{W}_{\text{FFT}} = FA + n_{\text{FFT}}, \quad (4)$$

где  $F$  – матрица произведений значений АЧХ БПФ-фильтров и АЧХ ЦФПК на частотах поднесущих;

$A$  – вектор амплитуд  $N$ -OFDM поднесущих;

$n_{\text{FFT}}$  – шумовой вектор.

Выполнение процедуры БПФ позволяет синтезировать частотные фильтры, необходимые для спектральной селекции поднесущих  $N$ -OFDM сигналов, а также окончательной квадратурно-амплитудной демодуляции. При этом существенно, что указанная двухэтапная стратегия обработки не требует формирования частотных фильтров для всех приемных каналов ЦАР. Это кардинально упрощает требования к быстродействию спецвычислителей, снижает требования к объемам оперативной памяти и пропускной способности линий передачи данных.

Искомая оценка вектора амплитуд имеет вид:

$$A = (F^T F)^{-1} F^T \hat{W}_{\text{FFT}}. \quad (5)$$

### Выводы и перспективы дальнейших исследований

Таким образом, благодаря принятой двухэтапной стратегии обработки с промежуточным оцениванием амплитуд сигналов, формирование частотных фильтров для всех приемных каналов цифровой антенной решетки не требуется. Это существенно сокращает объем необходимых вычислительных операций на этапе демодуляции сигналов, позволяет сократить время оценивания амплитуд сигналов по выходам частотных фильтров, а также снижает тре-

бования к размерам оперативной памяти и пропускной способности линий передачи данных в блоке демодуляции. Следует отметить, что помимо уменьшения вычислительных затрат на демодуляцию сигналов  $N$ -OFDM, принятых по каналу связи ЦАР, двухэтапная схема обработки сигналов позволяет эффективно устранять влияние преднамеренных помех. Таким образом, оценивание амплитуд сигналов по выходу процедуры ЦДО позволяет не только снизить порядок матричных операций на этапе их демодуляции, но и отстроиться от активных помех. Учитывая, что точность оценивания амплитуд  $N$ -OFDM сигналов ухудшается с увеличением количества помех, в дальнейшем планируется исследовать ограничения, накладываемые помехами на качество демодуляции данных.

### Список литературы

1. Слюсар В.И. Метод демодуляции  $N$ -OFDM сигналов в цифровой антенной решетке / В.И. Слюсар, С.В. Волошко // Человек и космос: XI-я Международная молодежная науч.-практ. конф., 8-10 апреля 2009 г.: тезисы докл. – Днепропетровск, 2009. – С. 155.
2. Слюсар В.И. Двухэтапная процедура демодуляции  $N$ -OFDM сигналов двойной поляризации по выходам цифровой антенной решетки / В.И. Слюсар, С.В. Волошко // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 13-й Междунар. молодежный форум, 30 марта – 1 апреля 2009 г.: тезисы докл. – Х., 2009. – С. 188.
3. Слюсар В.И. Двухэтапная обработка OFDM ( $N$ -OFDM) сигналов в цифровой антенной решетке / В.И. Слюсар, С.В. Волошко // Проблемы телекоммуникаций – 2009: Третья Международная конференция, 21-24 апреля 2009 г.: тезисы докл. – К., 2009. – С. 167.

Поступила в редколлегию 11.07.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.В. Стасев, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

### ЗАВАДОЗАХИЩЕНА ДЕМОДУЛЯЦІЯ СИГНАЛІВ N-OFDM В ПРИЙМАЛЬНОМУ СЕГМЕНТІ ЦИФРОВОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ

В.І. Слюсар, С.В. Волошко

В статті запропоновано варіант завадозахищеної демодуляції сигналів  $N$ -OFDM, пов'язаний з їх двоетапною обробкою. Розглянуті етапи реалізації запропонованого варіанту двоетапної демодуляції сигналів  $N$ -OFDM, приведені відповідні аналітичні вирази. Приведені переваги запропонованого варіанту двоетапної обробки сигналів  $N$ -OFDM у порівнянні з варіантом одноетапної обробки, проаналізовано його значення в науковій і практичній областях, приведені напрямки подальших досліджень.

**Ключові слова:** сигнал  $N$ -OFDM, демодуляція, завадозахищеність, двоетапна обробка.

### DEMODULATION OF SIGNALS N-OFDM, PROTECTED FROM NOISE IN THE RECEIVING SEGMENT OF THE DIGITAL ANTENNA ARRAY

V.I. Slyusar, S.V. Voloshko

In article is offered the variant to demodulation of signals  $N$ -OFDM, protected from noise, connected to their processing in two stages. Stages of realization of an offered variant of demodulation of signals  $N$ -OFDM are considered, corresponding analytical expressions are resulted. Advantages of the offered variant of signal processing  $N$ -OFDM in two stages in comparison with a processing variant in one stage are resulted, its value in scientific and practical areas is analyzed, directions of the further probings are resulted.

**Key words:** Signal  $N$ -OFDM, demodulation, noise immunity, processing in two stages.