

УДК 621.396

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СПОСОБОВ СЛЕПОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В СРЕДСТВАХ ЦИФРОВОЙ РАДИОСВЯЗИ С МНОГОКАНАЛЬНЫМИ ПРИЕМНЫМИ СИСТЕМАМИ

Сай Тун Тун, магистрант

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Приведено краткое описание математической модели для исследования эффективности методов «слепой» обработки для средства цифровой радиосвязи с BPSK-сигналом. Методом математического моделирования исследована эффективность слепой обработки в средствах радиосвязи с многоканальными приемными системами.

Ключевые слова. Компьютерная модель, цифровая радиосвязь, многоканальная приемная система, алгоритмы слепой обработки, постоянный модуль огибающей, эффективность, вероятность битовой ошибки.

Введение

В цифровой радиосвязи широко используются сигналы с постоянным модулем огибающей (*Constant module* – CM-сигналы). К ним относятся BPSK, QPSK, M-PSK и FSK-сигналы [2]. Основные преимущества этих сигналов заключаются в низких требованиях к линейности усилительного тракта передатчика [2].

Помехоустойчивость линий цифровой радиосвязи в сложных ситуациях функционирования, например, за счет нарушения условий электромагнитной совместимости, может быть достигнута за счет использования многоканальных приемных систем [3,4]. Многоканальные приемные системы обеспечивают компенсацию мешающих источников сигналов и помех за счет формирования «нулей» диаграммы направленности адаптированного приемного канала в требуемых направлениях [4]. Оптимальный алгоритм обработки требует наличие опорного сигнала или априорных данных о параметрах диаграмм направленности приемных каналов и угловых координатах передатчика радиолинии. Это возможно только в редких случаях, что определяет интерес к алгоритмам обработки, для которых такая информация не нужна, в частности, к алгоритмам «слепой» обработки или CM-алгоритмам. Эти алгоритмы используют только факт того, что модуль огибающей полезного сигнала является постоянной величиной [1,4]. Необходимость знания угловых координат передатчика радиолинии и параметров антенной системы отсутствует.

Цель статьи – исследование эффективности алгоритмов слепой обработки методом математического моделирования.

Краткое описание компьютерной модели для исследования эффективности методов «слепой» обработки для средства цифровой радиосвязи с BPSK-сигналом

Структура разработанной компьютерной модели приведена на рисунке 1. Основные шаги по формированию принимаемой реализации: генерация передаваемого BPSK-сигнала с учетом формирующего фильтра «корень из приподнятого косинуса» (RRC) с заданным коэффициентом скругления и доплеровского сдвига частоты; моделирование принимаемой реализации на выходе многоканальной приемной системы с учетом внешних помех и внутренних шумов. Далее моделируется работа адаптивных алгоритмов пространственной обработки, которые настраивают веса элементов антенной решетки для максимизации отношения сигнал/шум (SNR) и минимизации помех. После весовой обработки сигнал декодируется с использованием схемы Костаса для восстановления несущей и формирования опорного сигнала, затем воспроизводится работа демодулятора и оценивается вероятность битовой ошибки.

Фильтр «корень из приподнятого косинуса» (RRC) – это фильтр Найквиста, используемый для устранения межсимвольных помех (ISI) в цифровых системах связи [2]. Частотная характеристика квадратного корня используется для разделения спектра фильтра «приподнятый косинус» между передатчиком и приемником (согласованная фильтрация). Благодаря объединению формирования импульса с адаптивным формированием луча достигается надежная работа в условиях помех и эффектов Доплера. Настройка коэффициента скругления β , числа отсчетов на символ (бит) sps и длины импульсной характеристики фильтра Len_l в символах (битах) позволяет настраиваться под конкретные требования к полосе пропускания и уровню межсимвольной интерференции. Кроме того, при формировании сигнала с учетом ограниченной полосы канала нарушаются требования к постоянству амплитудной огибающей принимаемого сигнала, что требует отдельного исследования в рамках реализации слепой обработки.



Рисунок 1 – Структура компьютерной модели приемника цифровой радиосвязи с многоканальной системой приема и «слепой» обработкой

Для моделирования обработки сигнала на передачу и прием использована встроенная функция пакета *Signal Processing and Communication* в *MatLab* со следующим синтаксисом:

$$\text{rcosdesign}(\text{beta}, \text{Lenl}, \text{sps}, \text{'sqrt'}),$$

где beta – коэффициент скругления (спада) ($0 \leq \beta \leq 1$), причем при $\beta=0$ ширина спектра минимальна, но амплитудная огибающая сигнала максимально искажена по сравнению с постоянным уровнем, при $\beta=1$ ширина спектра минимальна, но отклонения амплитудной огибающей от постоянного уровня минимально (типичным значением является при $\beta=0,3$, когда использует 30% дополнительной полосы пропускания); Lenl – длина импульсной характеристики в битах, при этом длина импульсной характеристики в отсчетах составит $\text{Lenl} \times \text{sps}$; sps – число отсчетов на символ (частота передискретизации входного потока символов); 'sqrt' – указывает на *RRC*-фильтр [2].

Назначение функции – создает импульсную характеристику фильтра *RRC*, которая гарантирует, что комбинированная характеристика канала является приподнятым косинусом.

На выходе фильтрации передатчика, ограниченный по полосе сигнал с контролируемой *ISI* и спектральной эффективностью [2].

На входе приемника выполняется согласованная фильтрация с использованием того же фильтра *RRC*, и комбинированная характеристика *Tx/Rx* становится приподнятым косинусом, то есть фильтром Найквиста с заданными параметрами межсимвольных искажений.

В компьютерной модели реализованы следующие способы слепой обработки:

A1 - рекурсивный стохастический слепой LMS-алгоритм [1,4];

A2 - стохастический слепой LMS-алгоритм на заданном времени адаптации (реализуется алгоритм A1 с последующим применением конечных результатов адаптации ко всей выборке);

A3 – прямой слепой алгоритм по выборке заданного объема [1,4];

A4 –слепой алгоритм на основе собственных векторов оценки корреляционной матрицы с дополнительной операцией обнаружения несущей.

В качестве основного показателя эффективности обработки выбрана вероятность битовой ошибки (*BER*).

Компьютерная модель реализована в виде набора скриптов в *MatLab*, объединяемых через экранное приложение с развитым интерфейсом, выполненное с использованием *App Designer*. Вид главной вкладки «Параметры» показан на рисунке 2. На главной вкладке задаются параметры кольцевой антенной решетки средства цифровой радиосвязи, источников полезного сигнала и помех, тип и параметры обработки. Дополнительные вкладки «Геометрия AP», «Передаваемый PSK-сигнал» и «Принимаемый PSK-сигнал» используются для визуализации и проверки правильности моделирования. Вид вкладок с результатами моделирования и иллюстрация состава выводимой информации показаны на рисунках 3 и 4.

На вкладку, приведенную на рисунке 3, последовательно выводятся: результат возведения сигнала в квадрат, сигнал на выходе фильтра нижних частот, спектр сигнала и сформированный опорный сигнал – гармоническое колебания. По этим сигналам (и, особенно, по форме опорного сигнала) можно судить о качестве функционирования приемника. На вкладку, изображенную на рисунке

4, выводится спектр входного сигнала приемника после весовой обработки и фильтра Найквиста, огибающая, квадратурные составляющие и фаза принимаемого сигнала.

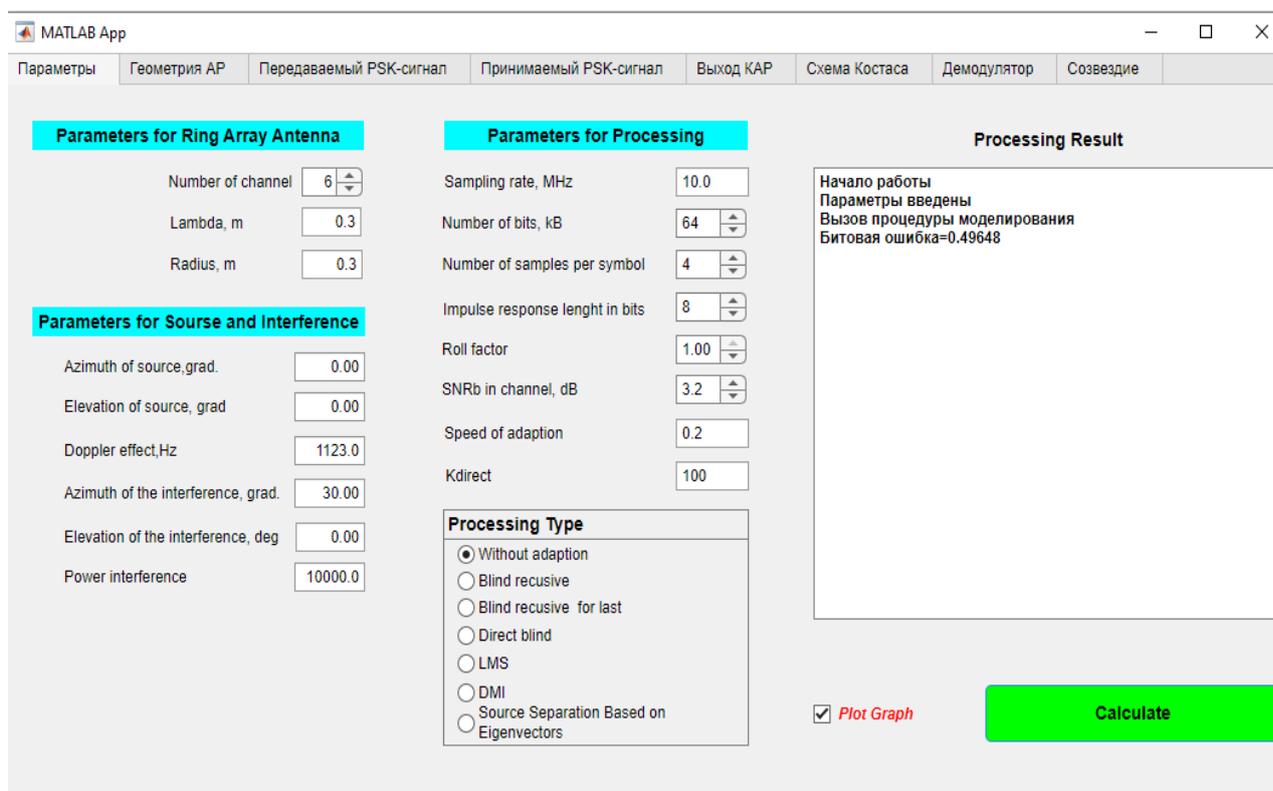


Рисунок 2 – Вид главной вкладки интерфейса компьютерной модели

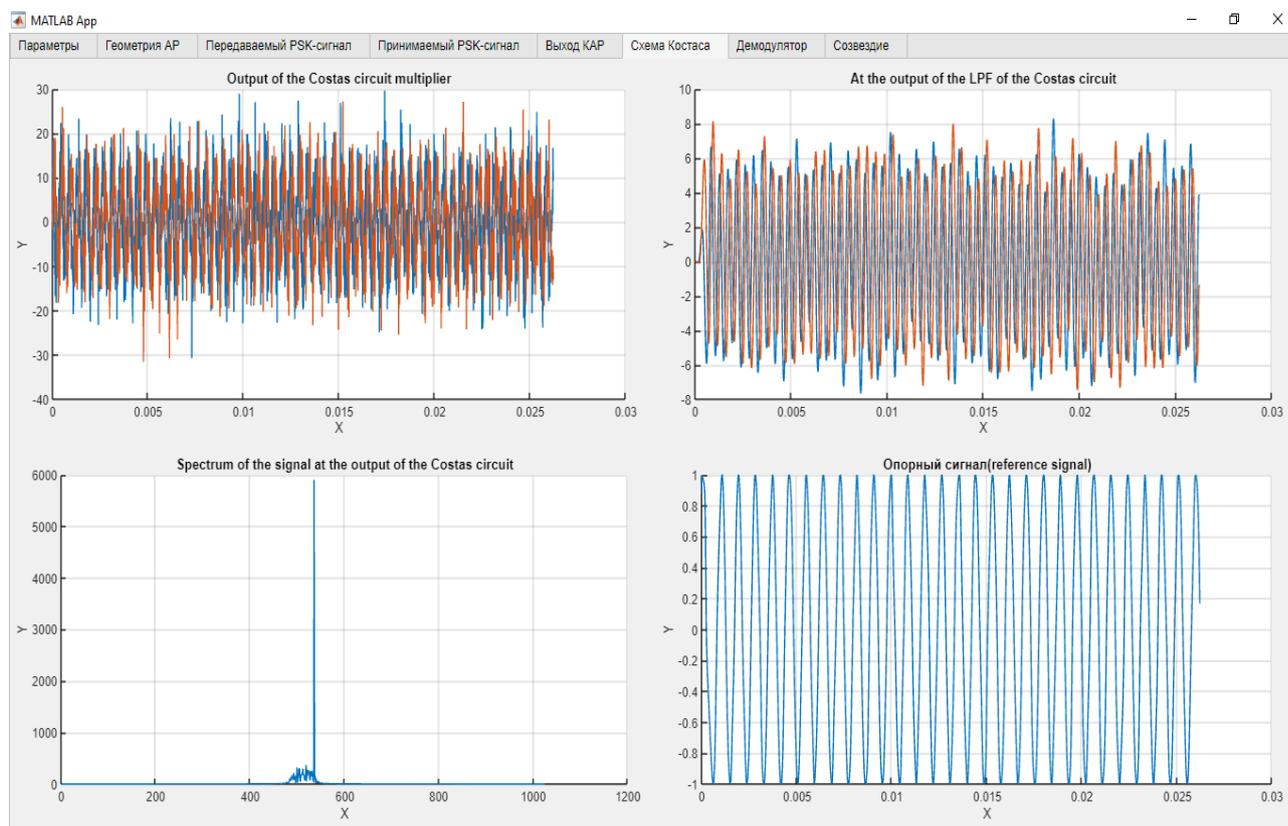


Рисунок 3 -Вид вкладки «Схема Костаса»

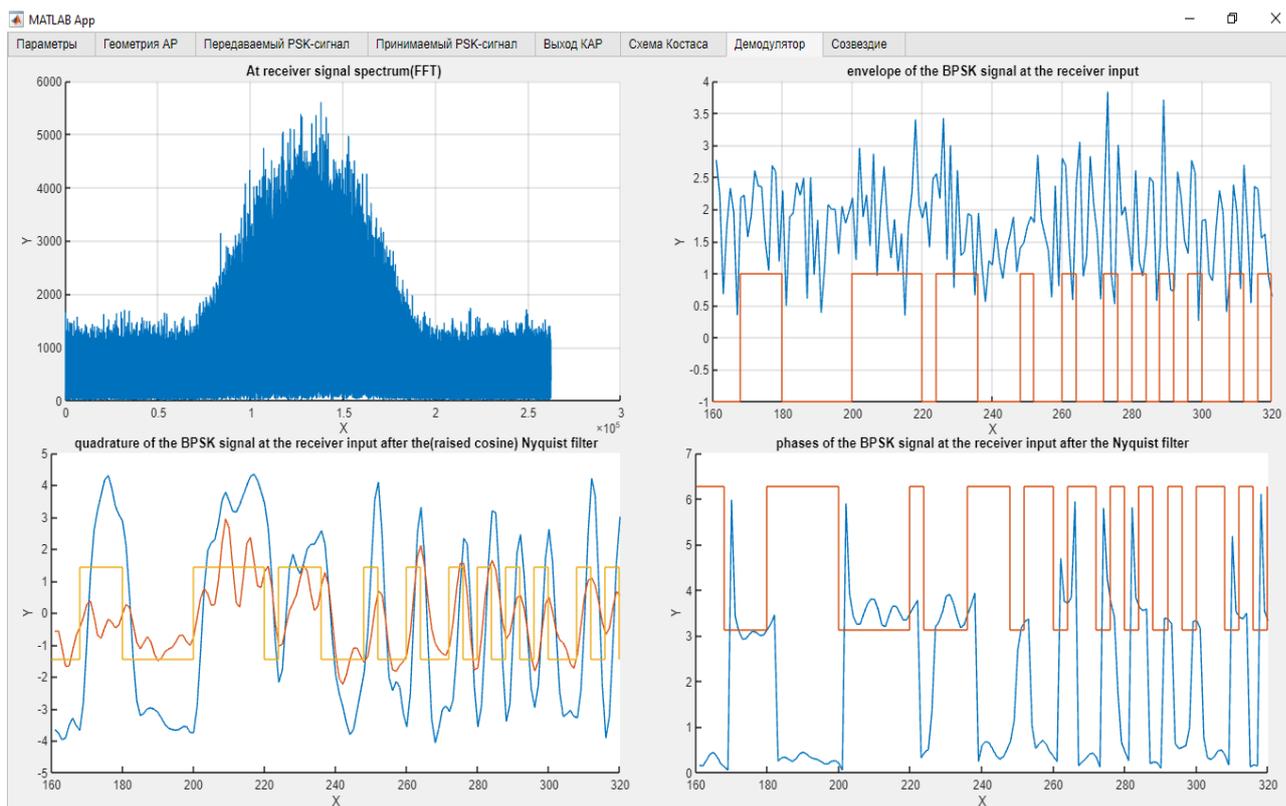


Рисунок 4 -Вид вкладки «Демодулятор»

Результаты исследования эффективности слепой обработки сигналом методом компьютерного моделирования

При исследовании эффективности принимались следующие исходные данные:

- радиус круговой антенной решетки 0,3 м при числе приемных вибраторов 6;
- длина волны 0,3 м;
- объем выборки BPSK-сигнала 256 кБит; число отсчетов на бит 4; длина импульсной характеристики *RRC*-фильтра 8 бит; фактор скругления 1,0; частота дискретизации 10 МГц; длительность выборки (максимальное время адаптации) 105 мс;
- отношение сигнал/внутренний шум на выходе приемного канала составляет 5,7 дБ (отношение сигнал/шум при фазировании решетки в направлении полезного сигнала составит 13,5 дБ);
- отношение помех/внутренний шум на выходе приемного канала составляет 20 дБ (демодуляция и прием сигнала без адаптации невозможны);
- параметр скорости адаптации [1] для алгоритмов А1 и А2 выбирался равным 0,01...0,05;
- число отсчетов при адаптации и при формировании выборочной корреляционной матрицы для алгоритмов А3, А4 составляет 1024 (длина выборки для адаптации 256 бит).

Результаты исследования в виде созвездий сигналов на выходе демодулятора для одной из принимаемых реализаций (угловое отклонение сигнала от помехи 30°) приведены на рисунке 5.

Из рисунка 5 видно, что принимаемые символы практически полностью разделены для алгоритмов А2, А3 и А4, и частично разделены для алгоритма А1.

В таблице приведены результаты расчетов *BER* для алгоритмов слепой адаптации по 10 реализациям, каждая их которых имела длину 256 кБит.

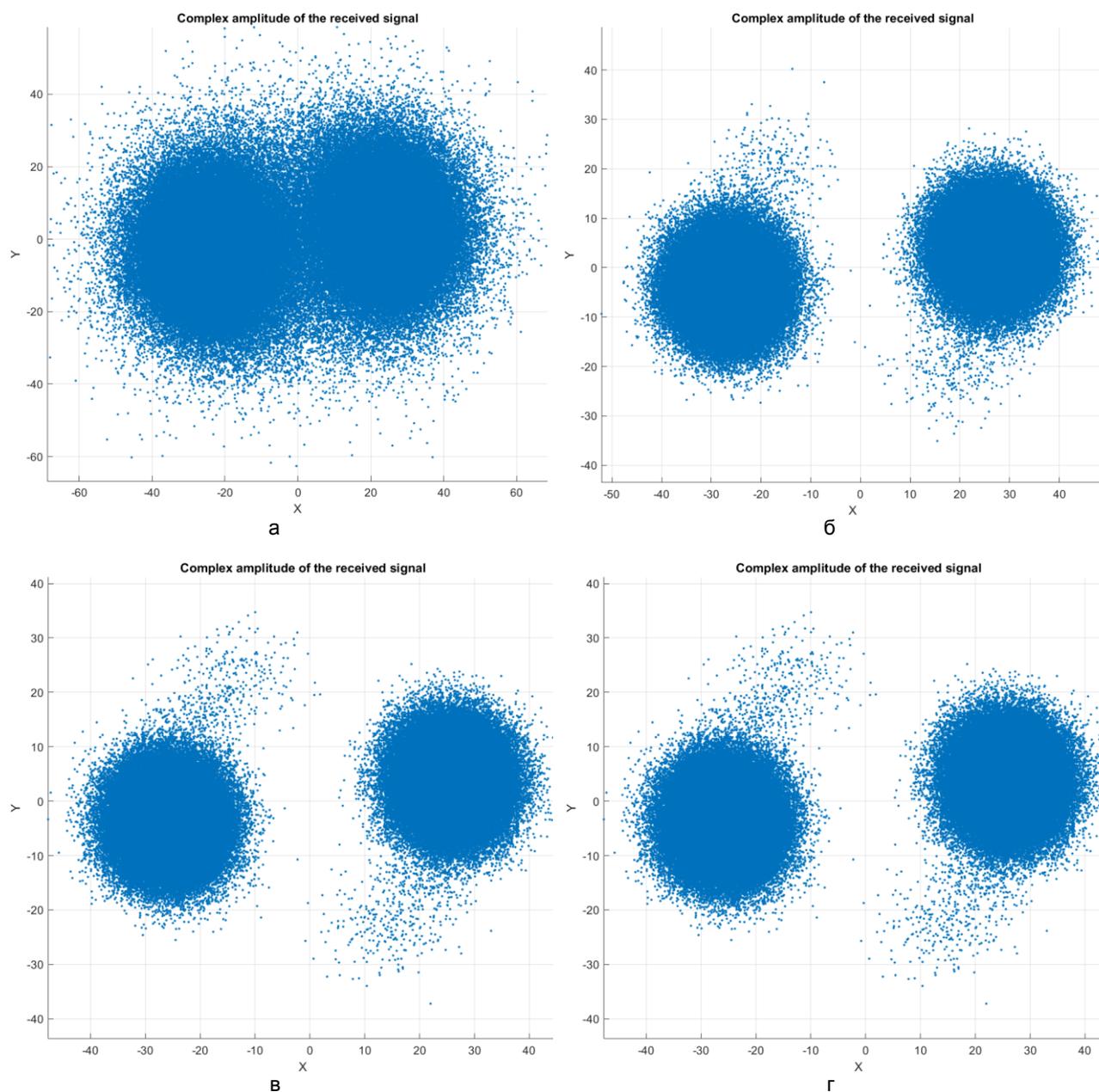


Рисунок 5 – Сигнальные созвездия на выходе демодулятора в одной из реализаций:
 а – алгоритм А1; б - алгоритм А2; в - алгоритм А3; г - алгоритм А4

Таблица 1 – Результаты оценки вероятности суммарной ошибки

№	Вид алгоритма слепой адаптации	Вероятность ошибки (BER)
1	Без адаптации (фокусировка приемной системы в направлении полезного сигнала)	0,496
2	А1 - рекурсивный стохастический слепой LMS-алгоритм	0,224
3	А2 - стохастический слепой LMS-алгоритм на заданном времени адаптации	0,0006
4	А3 – прямой слепой алгоритм по выборке заданного объема	0,0010
5	А4 – слепой алгоритм на основе собственных векторов оценки корреляционной матрицы с обнаружением несущей	0,0003

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- для алгоритмов слепой адаптации А1-А3, которые непосредственно используют факт постоянства амплитудной огибающей, минимальное отношение сигнал/шум на выходе пространственной обработки составляет 13...14 дБ, что примерно на 3 дБ больше отношения сигнал/шум 10,5 дБ, необходимого для приема BPSK-сигнала при $BER=10^{-6}$; для алгоритма на основе собственных векторов требуемое отношение сигнал/шум не изменяется;

- устойчивое функционирование рекурсивного стохастического слепого LMS-алгоритма А1 наблюдалось при параметре скорости сходимости 0,01...0,05; алгоритм обеспечивает стабильную сходимость за долю времени 0,2...0,3 от объема выборки; алгоритм характеризуется более медленной адаптацией по сравнению с прямыми методами, но его простота (по числу операций за один такт) делает его подходящим для систем реального времени при ограниченной производительности средств обработки; однако алгоритм А1 недостаточно эффективен в сценариях с высоким уровнем помех;

- рекурсивный стохастический слепой LMS-алгоритм А2 с выбором весового вектора по последнему отсчету имеет, очевидно, те же свойства, что и алгоритм ФА1, но обеспечивает более высокую эффективность за использование конечных результатов адаптации; но, так как результат адаптации формируется с задержкой, этот алгоритм может быть использован только в случаях, когда такая задержка допустима;

- прямой слепой алгоритм по выборке заданного объема А3 обеспечивает работоспособность при малой выборке из порядка 128...256 бит, но его вычислительная сложность существенно выше, чем для алгоритмов А1 и А2;

- слепой алгоритм на основе собственных векторов оценки корреляционной матрицы с обнаружением несущей А4 имеет наибольшую эффективность, но и наиболее высокие вычислительные затраты, связанные с оценением корреляционной матрицы процессов на выходе приемных каналов, вычислении собственных значений и собственных векторов, а также весовых векторов системы обработки, циклической адаптации на каждый из возможных источников (в порядке убывания собственных значений) и обнаружении несущей; ввиду высоких вычислительных затрат этот алгоритм может быть рекомендован для первоначальной адаптации в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки.

Список использованных источников

1. Саи Тун Тун. Модель и результаты исследования эффективности слепой обработки сигналов в адаптивных антенных системах средств цифровой радиосвязи / Саи Тун Тун // Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2024: материалы открытой республиканской науч.-практ. интернет-конф. (Респ. Беларусь, Минск, 21–22 нояб. 2024 г.) / редкол.: В. А. Бозуш [и др.]. – Минск : БГУИР, 2024. – С 216-220.

2. John R. Barry, Edward A. Lee, David G. Messerschmitt. *Digital Communication: Third Edition*, Springer, 2003. – 855 p.

3. Уидроу, Б. Адаптивная Обработка Сигналов / Б. Уидроу, С. Стирнз ; пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.

4. Джиган, В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. – М.: Техносфера, 2013. – 528 с.

UDC 621.396

EFFICIENCY OF BLIND SIGNAL PROCESSING METHODS IN DIGITAL RADIO COMMUNICATION WITH MULTICHANNEL RECEIVING SYSTEMS

Sai Tun Tun, Master's student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Annotation. A brief description of the mathematical model for studying the efficiency of "blind" processing methods for digital radio communication with BPSK signal is given. The efficiency of blind processing in radio communication facilities with multichannel receiving systems is studied by the method of mathematical modeling.

Keywords. Computer model, digital radio communication, multichannel receiving system, blind processing algorithms, constant envelope modulus, efficiency, bit error probability.