

**МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЛЕПОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В АДАПТИВНЫХ АНТЕННЫХ СИСТЕМАХ СРЕДСТВ ЦИФРОВОЙ РАДИОСВЯЗИ**

САИ ТУН ТУН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Беларусь)*

*E-mail: saihtun53785@gmail.com*

**Аннотация.** Выполнен анализ алгоритмов «слепой» обработки сигналов в многоканальных адаптивных приемных системах средств цифровой радиосвязи при приеме сигналов с постоянной амплитудой и показано, что для стохастического нормализованного алгоритма наименьшего квадрата ошибки (SNLMS) нормировка сигнала ошибки должна проводиться к квадрату нормы вектора отсчетов сигналов на выходах приемных каналов. Приведена структура математической модели для исследования эффективности этих алгоритмов. С использованием модели получены результаты исследования эффективности алгоритмов «слепой» обработки. Показано, что для стохастического NLMS-алгоритма требуемое значение отношения мощности сигнала на выходе приемного канала -6-ти элементной антенной системы к мощности внутреннего шума должно составлять величину порядка 17 дБ при длительности процесса адаптации 1000...1500 отсчетов. Для алгоритма наименьших квадратов ошибок (LMS) минимальное отношение сигнал/шум составит порядка 10...13 дБ при числе отсчетов для адаптации около 50.

**Abstract.** The analysis of algorithms of "blind" signal processing in multichannel adaptive receiving systems of digital radio communication facilities when receiving signals with constant amplitude is performed and it is shown that for the stochastic normalized algorithm of the least error square (SNLMS) the error signal normalization should be carried out to the square of the norm of the vector of signal samples at the outputs of the receiving channels. The structure of the mathematical model for studying the efficiency of these algorithms is given. Using the model, the results of the study of the efficiency of the algorithms of "blind" processing are obtained. It is shown that for the stochastic NLMS algorithm the required value of the ratio of the signal power at the output of the receiving channel of a 6-element antenna system to the internal noise power should be about 17 dB with an adaptation process duration of 1000 ... 1500 samples. For the algorithm of least error squares (LMS) the minimum signal-to-noise ratio will be about 10 ... 13 dB with the number of samples for adaptation of about 50.

**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. Основные преимущества этих сигналов заключаются в низких требованиях к линейности усилительного тракта передатчика.

Помехоустойчивость линий цифровой радиосвязи в условиях внешних помех, например, за при нарушении требований электромагнитной совместимости, может быть достигнута за счет использования многоканальных приемных систем. Такие приемные системы обеспечивают компенсацию внешних помех за счет формирования «нулей» диаграммы направленности адаптированного приемного канала в направлении на источник или источники помехи. Для этого требуется наличие опорного сигнала или априорная информация о параметрах диаграмм направленности приемных каналов и угловых координатах передатчика радиолинии. Получение такой информации представляет проблему. Это определяет интерес к алгоритмам обработки, для которых объем априорной информации минимальный, в частности, к CM-алгоритмам.

Цель статьи – обобщение алгоритмов слепой обработки и их исследование методом математического моделирования.

**Алгоритмы «слепой» обработки сигналов в адаптивных антенных системах**

Рассматривается многоканальная приемная система из  $\ell = \overline{1, L}$  приемных каналов (рисунок 1).

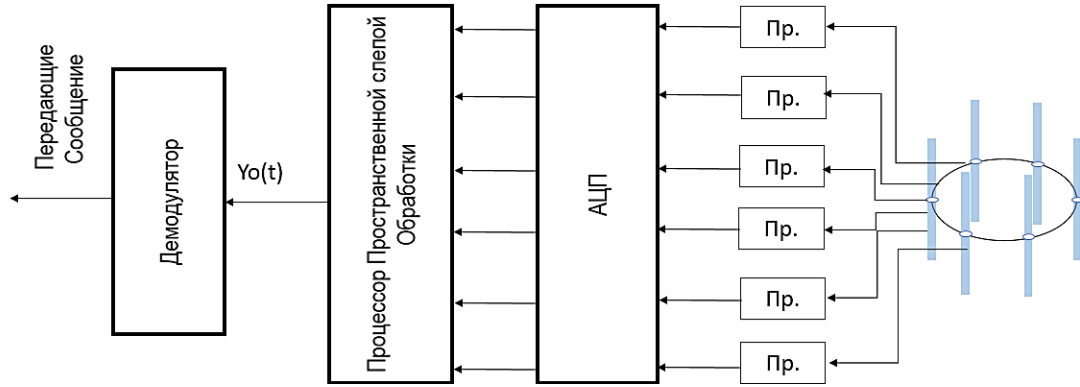


Рис. 1. Структура многоканальной приемной системы средства цифровой радиосвязи

Сигналы с выходов приемных антенн поступают на идентичные приемники (ПР), где они фильтруются, преобразуются по частоте и усиливаются. Далее происходит их преобразование в цифровую форму с использованием многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В процессоре пространственной «слепой» обработки происходит формирование сигнала адаптированного приемного канала. Отметим, что процессор пространственной «слепой» обработки может работать без априорной информации, такой как опорный сигнал, тип модуляции и т. д.. Затем сигнал адаптированного приемного канала отправляется на демодулятор, который извлекает исходную информацию (такую как аудио, данные или видео), которая была закодирована в сигнале во время передачи.

При «слепой» обработке используется априорная информация о том, что сигнал имеет постоянный модуль огибающей. Поэтому, необходимо за счет выбора вектора весовых коэффициентов приемных каналов  $\mathbf{w}$  минимизировать квадрат модуля отклонения сигналов на выходе системы обработки от некоторой заданной величины  $B$ :

$$\mathbf{w}_{\text{опт}} = \arg \min_{\mathbf{w}} \Psi(\mathbf{w}) \quad (1)$$

где

$$\Psi(\mathbf{w}) = \overline{(B^2 - |\mathbf{w}^H \mathbf{y}(t)|^2)^2}; \quad (2)$$

$\mathbf{y}(t) = (\dot{Y}_1(t), \dots, \dot{Y}_L(t))^T$  - вектор выходных сигналов приемных каналов;  $H$  - знак комплексного сопряжения и транспонирования;  $L$  - число приемных каналов.

При вычислении  $\Psi(\mathbf{w})$  по  $K$  отсчетам запишем:

$$\Psi(\mathbf{w}) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (B^2 - |\mathbf{w}^H \mathbf{y}(t_k)|^2)^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (B^2 - |\mathbf{w}^H \mathbf{y}(k)|^2)^2. \quad (3)$$

Вычислим градиент (3):

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi(\mathbf{w})}{d\mathbf{w}} &= \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K (B^2 - |\mathbf{w}^H \mathbf{y}(k)|^2) \frac{d|\mathbf{w}^H \mathbf{y}(k)|^2}{d\mathbf{w}} = \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K (B^2 - |\mathbf{w}^H \mathbf{y}(k)|^2) \frac{d(\mathbf{w}^H \mathbf{y}(k) \mathbf{y}^H(k) \mathbf{w})}{d\mathbf{w}} = \\ &= \frac{2}{K} \sum_{k=1}^K (B^2 - |\mathbf{w}^H \mathbf{y}(k)|^2) \mathbf{y}(k) \mathbf{y}^H(k) \mathbf{w} = -\frac{2}{K} \sum_{k=1}^K (B^2 - |\dot{Y}_a(k)|^2) \mathbf{y}(k) Y_a^*(k). \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\dot{Y}_a(k) = \mathbf{w}^H \mathbf{y}(k)$  - выходной сигнал системы обработки в  $k$ -й момент времени.

Оптимальный весовой вектор можно найти градиентным методом с использованием рекурсивной процедуры

$$\mathbf{w}(m) = \mathbf{w}(m-1) - \mu \frac{d\Psi(\mathbf{w})}{d\mathbf{w}} = \mathbf{w}(m-1) + \frac{2\mu}{K} \sum_{k=1}^K (B^2 - |\dot{Y}_a(k)|^2) \mathbf{y}(k) Y_a^*(k), \quad (5)$$

где  $\mu$  - шаг сходимости, определяющий скорость сходимости. Выражения (1), (3), (5) определяют алгоритм наименьших квадратов ошибок (LMS).

При использовании для адаптации только одного, текущего отсчета получим:

$$\Psi(k, \mathbf{w}) = (B^2 - |\mathbf{w}^H(k-1)\mathbf{y}(k)|^2)^2;$$

$$\frac{d\Psi(k, \mathbf{w})}{d\mathbf{w}} = -(B^2 - |\dot{Y}_a(k)|^2)\mathbf{y}(k)Y_a^*(k); Y_a^*(k) = \mathbf{w}^H(k-1)\mathbf{y}(k);$$

$$\mathbf{w}(k) = \mathbf{w}(k-1) - \mu \frac{d\Psi(k, \mathbf{w})}{d\mathbf{w}} = \mathbf{w}(k-1) + \mu(B^2 - |\dot{Y}_a(k)|^2)\mathbf{y}(k)Y_a^*(k)$$

Это стохастических LMS-алгоритм. Если потребовать, чтобы градиент на текущем шаге не зависел от амплитуды входных сигналов, то получим стохастический нормализованный алгоритм вида

$$\mathbf{w}(k) = \mathbf{w}(k-1) - \mu \frac{d\Psi(k, \mathbf{w})}{d\mathbf{w}} = \mathbf{w}(k-1) + \mu \frac{(B^2 - |\dot{Y}_a(k)|^2)\mathbf{y}(k)Y_a^*(k)}{(\mathbf{y}^H(k)\mathbf{y}(k))^2 + \delta^2},$$

где  $\delta$  - параметр регуляризации.

Выражение (7) представляет собой стохастический нормализованный алгоритм наименьшего квадрата ошибки (SNLMS). Сравнение (7) с классическим стохастическим LMS-алгоритмом [1,2,6] заключается в том, что в знаменателе используется норма вектора входных сигналов в четвертой степени, так как аналогичная степень характерна и для числителя ( $|\dot{Y}_a(k)|^2 = |\mathbf{w}^H \mathbf{y}|^2, Y_a^*(k)$  и непосредственно  $\mathbf{y}(k)$ ). Регуляризация в виде  $\delta^2$  приводит к уменьшению флуктуаций вектора весовых коэффициентов при малых значениях  $\mathbf{y}^H(k)\mathbf{y}(k)$ .

### Математическая модель для исследования «слепой» обработки сигналов

Структурная схема математической модели для исследования алгоритмов слепой обработки сигналов приведена на рисунке 2.

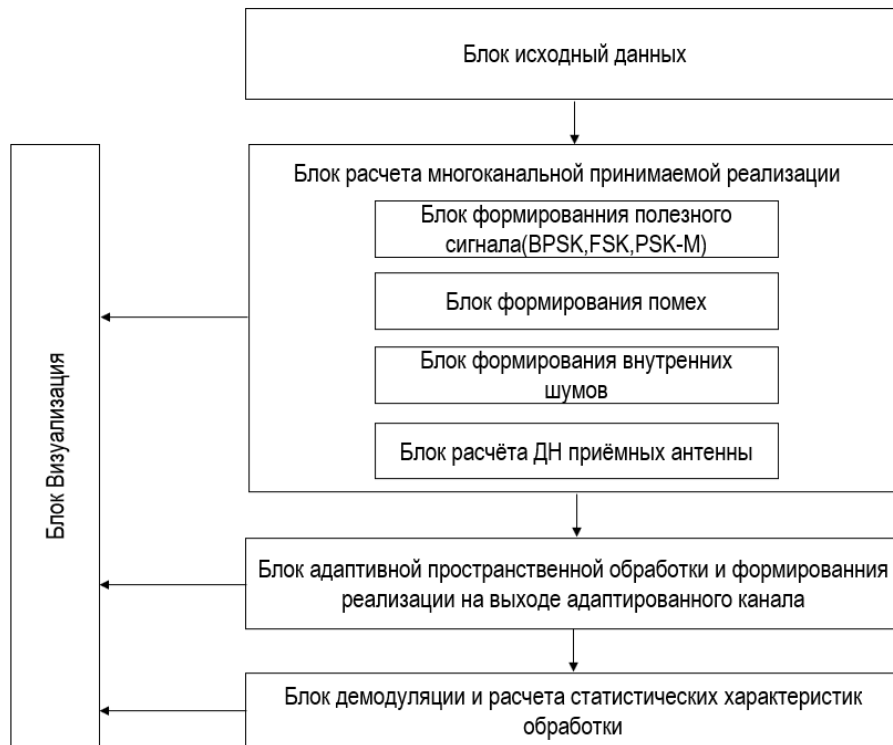


Рис. 2. Структура математической модели для исследования эффективности способов слепой обработки сигналов в адаптивных антенных системах средств цифровой радиосвязи

В блоке исходных данных задаются исходные данные по антенной системе, алгоритмам обработки, полезным сигналами и помехам, такие, как: радиус приемной решетки, число и координаты фазовых центров приемных антенн; число и мощности источников полезных сигналов и помех; угловые координаты источника полезного сигнала и источников помех.

В блоке расчета многоканальной принимаемой реализации проводится расчет цифровых сигналов на выходах приемных каналов с учетом их пространственного расположения, угловых координат и мощностей источников, внутренних шумов приемных каналов, частоты дискретизации и разрядности АЦП.

ДН приемных каналов для случая приемной антенной системы в виде кольцевой антенной решетки из вертикально ориентированных вибраторов рассчитываются в соответствии с выражением:

$$\dot{F}_\ell(\alpha, \beta) = e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(x_\ell \cos \alpha \cos \beta + y_\ell \sin \alpha \cos \beta)},$$

где  $\lambda$  - длина волны принимаемого сигнала;  $x_\ell, y_\ell$  - координаты фазового центра антенны  $\ell$ -го приемного канала.

Полезный сигнал воспроизводится для заданного вида модуляции с постоянной амплитудой (BPSK, QPSK, M-PSK, FSK с минимальным сдвигом) для априорно заданного или стохастически формируемого информационного сообщения. Это сообщение запоминается и используется для сравнения с его оценкой на выходе блока демодуляции. Формирование помех и внутренних шумов проводится по стандартным алгоритмам в виде последовательности комплексных нормально-распределенных случайных чисел с нулевым математическим ожиданием и заданной мощностью.

В блоке адаптивной пространственной обработки воспроизводятся «слепой» адаптации - вычисления вектора весовых коэффициентов и формирования сигнала на выходе адаптированного приемного канала.

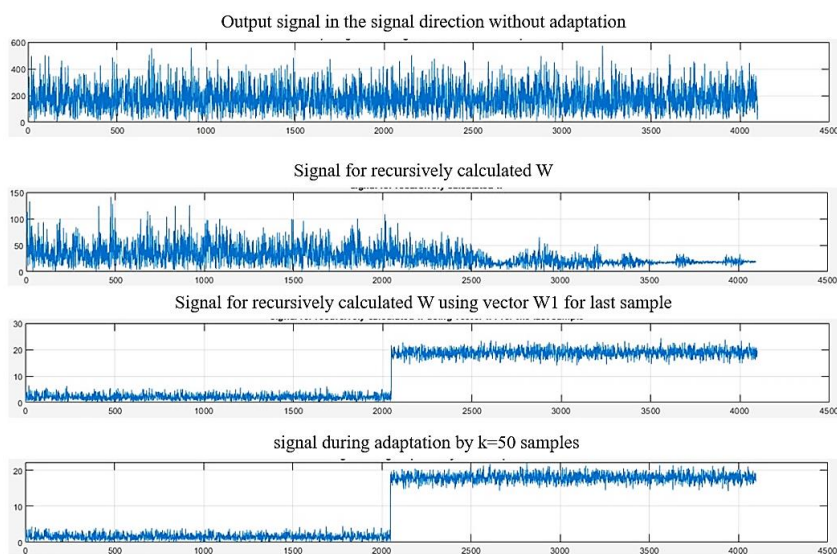
Блок демодуляции воспроизводит процессы оценивания передаваемого информационного сообщения и позволяет оценить наиболее важные параметры системы цифровой радиосвязи: отношение сигнал/шум, вероятность битовой ошибки, кратности ошибок и т.д. Это обеспечивает наиболее объективную оценку системы цифровой радиосвязи в условиях помех.

### Результаты исследований эффективности слепой обработки

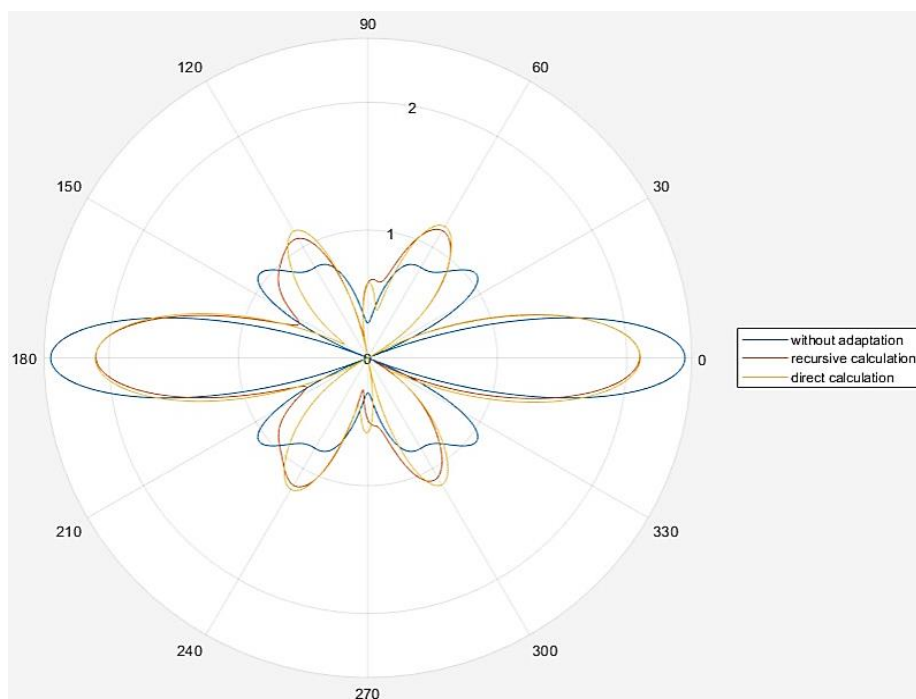
При исследовании эффективности слепой обработки сигналов принимались следующие исходные данные: число элементов решетки 6; длина волны 0,3 м; радиус кольцевой решетки 0,3 м; мощность сигнала по отношению к мощности шумов на выходе приемного канала 17 дБ; разность азимутов источника помех и сигнала 30°; мощность помехи по отношению к мощности шумов на выходе приемного канала 40 дБ.

В качестве полезного сигнала моделировался BPSK-сигнал, который начинался с 2048 отсчета при длине реализации 4096 отсчетов.

Результаты моделирования приведены на рисунке 3, где последовательно показаны: 1) сигнал на выходе при фокусировке антенной решетки в направлении полезного сигнала без компенсации; 2) сигнал на выходе для нормализованного стохастического алгоритма (7); 3) сигнал на выходе при финальном значении вектора весовых коэффициентов для алгоритма (7); сигнал на выходе для алгоритма (1) с учетом (2) и (5). На рисунке 4 приведены диаграммы направленности приемной системы после слепой адаптации.



**Рис. 3.** Выходной сигнал для различных вариантов обработки



**Рис. 4.** Диаграммы направленности после адаптации для слепого алгоритма

Как следует из результатов моделирования, без адаптивной обработки выделение полезного сигнала невозможно. При использовании стохастического LMS-алгоритма весовые коэффициенты системы обработки, обеспечивающие компенсацию помех и выделение сигнала с постоянной огибающей, формируются примерно за 1000...1500 отсчетов. Финальные весовые коэффициенты обеспечивают достаточно хорошую компенсацию помехи и выделение сигнала с постоянной огибающей.

LMS-алгоритм обеспечивает примерно такое же качество компенсации, но необходимо использовать 50 отсчетов участка реализации, где присутствует полезный сигнал

Из рис. 4 видно, что в направлении на источник полезного сигнала ( $\alpha=0$ ) оба алгоритма сформировали максимум, а в направлении помехи – близкое к нулю значение.

Таким образом, с использованием разработанной математической модели может быть исследована эффективность и обоснованы рациональные параметры «слепой» обработки сигналов в средствах цифровой радиосвязи.

#### Список использованных источников

1. Монзинго, Р. А. Адаптивные Антенные Решетки, введение в теорию / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
2. Уидроу, Б. Адаптивная Обработка Сигналов / Б. Уидроу, С. Стирнз ; пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.
3. Джиган, В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. – М.: Техносфера, 2013. – 528 с.
4. Alan J. Fenn. Adaptive Antennas and Phased Arrays for Radar and Communications. 2008. – 114 p.