

## Слепая оценка импульсной характеристики канала связи в цифровой системе передачи данных

А.Е. Архипов, А.В. Неуструев

МГТУ им. Н. Э. Баумана, 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5

*Предложен алгоритм оценки импульсной характеристики систем передачи данных, включающих в себя радиоканалы с узкополосными сигналами и с многолучевым распространением сигналов.*

*Impulse response estimation algorithm for data transmission systems with narrowband or multipath signals is offered.*

Рассматривается задача оценки импульсной характеристики (ИХ) системы связи по априори неизвестному входному сигналу (слепая оценка [1]). Подобные задачи актуальны в различных областях прикладной информатики и цифровой обработки сигнала, в частности в системах цифровой связи, радиолокации, радионавигации, обработки изображения различного происхождения. Наибольшее распространение в настоящее время получили радиоканалы с узкополосным сигналом, либо с многолучевым распространением, поэтому в данной работе производятся оценки ИХ именно для таких каналов.

В общем виде задачу слепой обработки сигнала можно сформулировать как цифровую обработку неизвестных сигналов, прошедших линейный стационарный канал с неизвестными характеристиками на фоне аддитивных шумов. Упрощённая структура цифровой системы с таким каналом представлена на рис. 1.

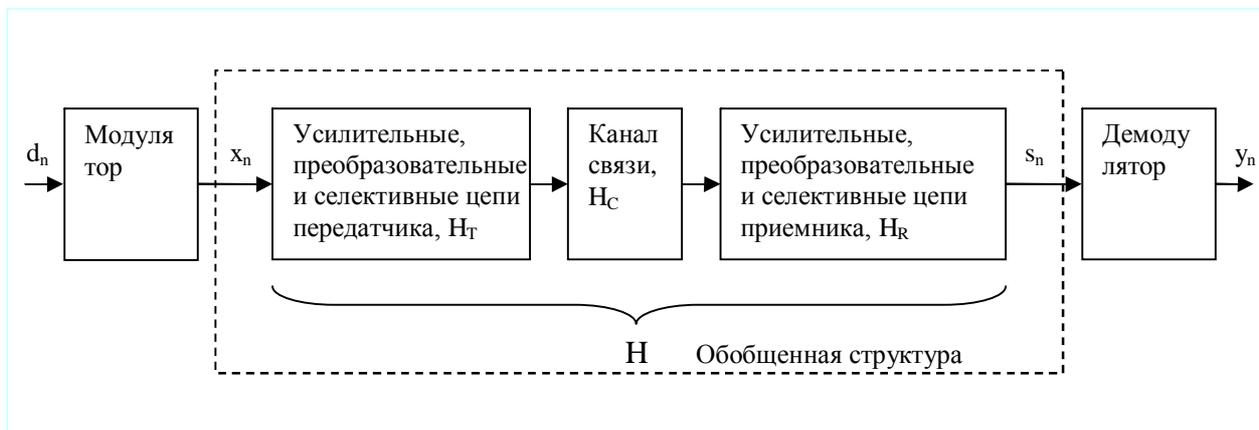


Рис. 1. Упрощенная структура цифровой системы передачи данных

В соответствии со схемой, модулятор формирует последовательность канальных символов  $\{x_n\}$ ,  $n=1..N$ , где  $N$ - длина передаваемой последовательности, которые выбираются из некоторого алфавита  $\Theta$  в соответствии с входным потоком данных  $\{d_n\}$ . Полагая систему стационарной, канал связи, а так же селективные цепи передатчика и приемника, можно представить в виде некоторой обобщенной структуры, имеющей единую импульсную характеристику канала  $\{H_k\}$ ,  $k=1..K$ , где  $K$ - число отсчётов ИХ канала, проходя через которую поток канальных символов  $\{x_n\}$  преобразуется в поток  $\{s_n\}$ . Демодулятор анализирует наблюдаемую на выходе канала последовательность  $\{s_n\}$  и формирует на своём выходе соответствующую ей последовательность канальных символов  $\{y_n\}$ , которые также выбираются из алфавита  $\Theta$ , в соответствии с некоторым критерием.

Известно [2], что для линейной системы взаимная корреляционная функция (ВКФ) выходного и входного сигналов есть свертка автокорреляционной функции (АКФ) входного сигнала системы с ее импульсной характеристикой.

$$B_m = \sum_{k=1}^K H_k \cdot A_{m-k}. \quad (1)$$

Или в матричной форме:

$$\begin{pmatrix} \bar{B}_1 \\ \text{M} \\ \bar{B}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{A}_{11} & \text{K} & \bar{A}_{1k} \\ \text{M} & \text{O} & \text{M} \\ \bar{A}_{m1} & \text{K} & \bar{A}_{mk} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} H_1 \\ \text{M} \\ H_k \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где:

-  $\bar{B}_m = \sum_{n=1}^N x_n \cdot s_{n+m}$  – m-ый элемент вектора – столбца взаимной корреляционной функции между выходной  $\{s\}$  и входной  $\{x\}$  последовательностями символов, усредненный по N символам;

-  $\bar{A}_{mk} = \sum_{n=1}^N x_{n+m} \cdot x_{n+k}$  – элемент, стоящий на пересечении m-ой строки и k-ого столбца автокорреляционной матрицы входной последовательности символов x, усредненный по N символам;

-  $H_k$  – k-ый элемент вектора–столбца искомой импульсной характеристики.

Если матрица A является невырожденной, то решая систему уравнений (2) относительно H, получим:

$$H = A^{-1} \cdot B. \quad (3)$$

Сделаем предположение, что демодулятор работает без ошибок и формирует на выходе последовательность восстановленных символов  $\{y_n\}$ , являющуюся точной копией последовательности символов  $\{x_n\}$  на входе системы. Тогда, пренебрегая постоянными задержками сигнала при обработке и распространении в канале, можно переписать выражения для элементов ВКФ и АКФ следующим образом:

$$B_m = \sum_{n=1}^N y_n \cdot s_{n+m}, \quad (4)$$

$$A_{mk} = \sum_{n=1}^N y_{n+m} \cdot y_{n+k}.$$

Уравнения (3) и (4) определяют функционирование предлагаемого алгоритма оценки ИХ канала передачи данных. Упрощенная функциональная схема такого алгоритма представлена на рис. 2.

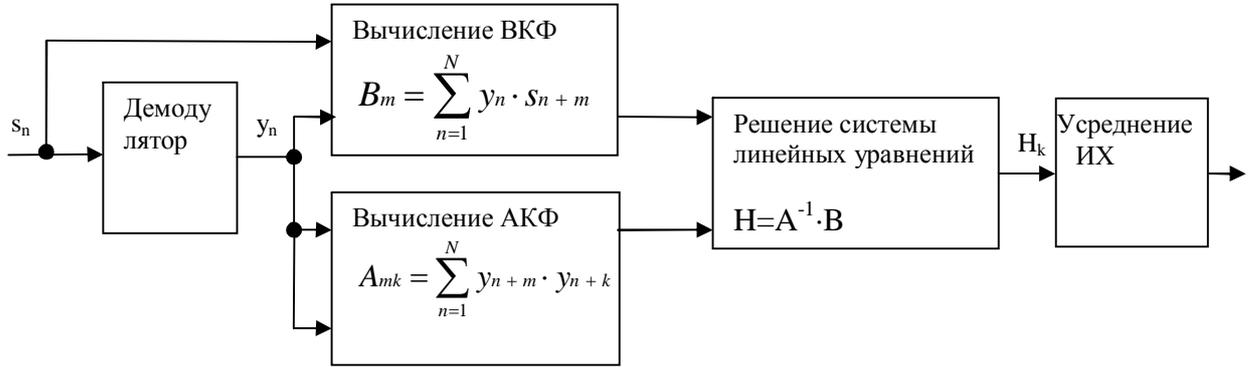


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема алгоритма оценки

В условиях реальной системы связи последовательность  $y_n$  воспроизводится демодулятором с ошибками, которые вызваны наличием шумов и межсимвольной интерференции данных на входе демодулятора. Для уменьшения влияния ошибок демодуляции, вызванных межсимвольной интерференцией, на результат работы, в алгоритм включен блок усреднения оценки импульсной характеристики.

В качестве критерия оценки предложенного алгоритма выбрана нормированная среднеквадратичная ошибка (СКО) оценки ИХ [3]

$$\Delta = \frac{1}{L} \sum_k \frac{D_k + m_k^2}{H_k^2}, \quad (5)$$

Где:

- $L$  – количество ненулевых отсчётов ИХ;
- $D_k$  – дисперсия ошибки оценки  $k$ -го отсчёта;
- $m_k$  – математическое ожидание ошибки оценки  $k$ -го отсчёта;
- $H_k$  – истинное значение  $k$ -го отсчёта.

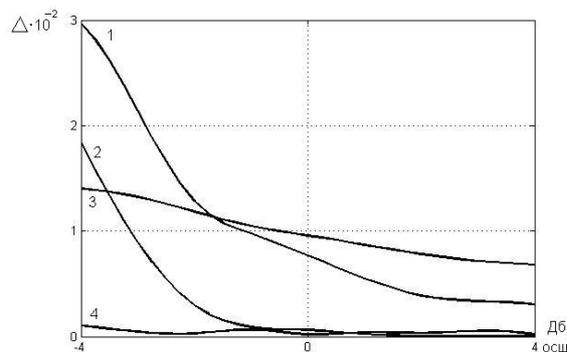
Суммирование в (5) производится по всем  $k$ , соответствующим ненулевым отсчётам ИХ.

Моделирование работы описанного алгоритма проводилось для сигналов, параметры которых приведены в таблице 1 (при частоте квантования 10 кГц).

Таблица 1. Описание сигналов, использованных в модели

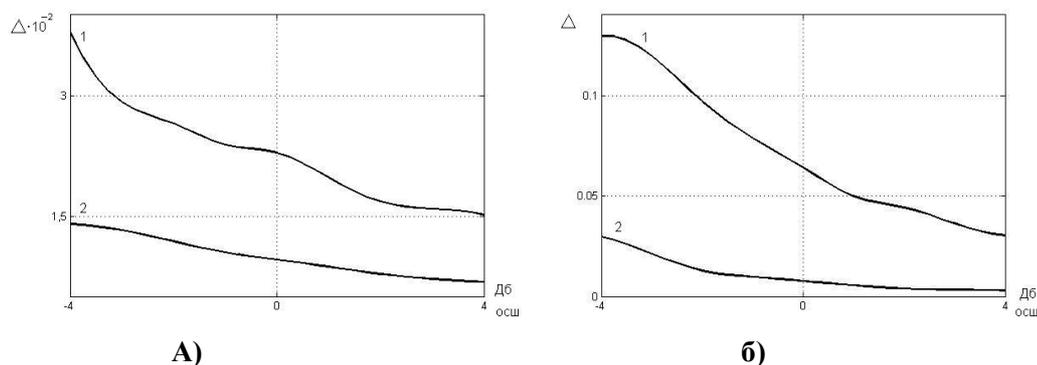
	Сигнал 1	Сигнал 2	Сигнал 3	Сигнал 4
Модель канала	Многолучевое распространение	Узкополосный фильтр $\Delta F = 1\text{кГц}$	Многолучевое распространение	Узкополосный фильтр $\Delta F = 1\text{кГц}$
Тип сигнала	ФМ2	ФМ2	ФМ2	ФМ2
Частота следования символов, Гц	500	1 000	500	1 000
Число символов в выборке	50 000	50 000	5 000	5 000
Число отсчётов на символ	20	10	20	10

На рис. 3 и 4 представлены результаты моделирования предложенного алгоритма при параметрах модели, показанных в таблице 1 и значениях отношения сигнал-шум (ОСШ) в диапазоне от  $-4$  до  $4$  Дб.



**Рис. 3. Нормированная СКО оценки ИХ канала, полученной с помощью предложенного алгоритма**

Кривая 1 на рис.3 соответствует сигналу 1 (здесь и далее название сигнала соответствует таблице 1) без усреднения оценки ИХ, кривая 2 – тому же сигналу с усреднением оценки ИХ, кривая 3 – сигналу 2 без усреднения оценки ИХ, кривая 4 – тому же сигналу с усреднением оценки ИХ.



**Рис. 4. Нормированная СКО оценки ИХ канала, полученной с помощью предложенного алгоритма**

На рис. 4 а) кривая 1 соответствует сигналу 2, кривая 2 – сигналу 4. На рис. 4 б) кривая 1 соответствует сигналу 1, кривая 2 – сигналу 3. Для всех кривых усреднение оценки ИХ не применялось.

Вычисление интегральных оценок ВКФ и АКФ на большом интервале позволяет уменьшить нормированную СКО оценки ИХ.

Различие в характере кривых, представляющих СКО оценки ИХ для каналов с многолучевым распространением сигналов и с узкой полосой пропускания объясняется тем, что вероятность ошибки демодуляции символа в канале с многолучевым распространением существенно выше, так как при независимых информационных символах запоздавшие копии сигнала представляют собой для демодулируемого сигнала некоррелированную помеху. Данная помеха складывается с тепловыми шумами на входе решающего устройства демодулятора, увеличивая тем самым вероятность ошибочной демодуляции символа.

Таким образом, использование выходных значений демодулятора вместо входного детерминированного сигнала при вычислении ИХ позволяет использовать априорно неизвестный поток данных и отказаться от калибровочных последовательностей в пользу полностью слепой оценки.

Анализ результатов моделирования показал, что усреднение ИХ по нескольким реализациям позволяет добиться уменьшения нормированной СКО оценки ИХ минимум на 3 Дб для канала с многолучевым распространением сигнала при ОСШ от –3 до 0, 10Дб для того же канала при ОСШ от 0 до 4 Дб, и минимум на 10 Дб для узкополосного канала при ОСШ от –4 до +4 Дб.

### **Литература**

1. О.В. Горячкин, Методы слепой обработки сигналов и их применение в системах электросвяз, УДК 621.391.01
2. Л. Льюнг, Идентификация систем. Теория для пользователя. – М.: Наука, 1991.– 432с.
3. В.И. Тихонов, Статистическая радиотехника. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.