

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЛГОРИТМОВ СЛЕПОЙ ОЦЕНКИ КАНАЛА В СИСТЕМАХ ПОДВИЖНОЙ СВЯЗИ

Горячкин О.В., Иващенко Е.В.

Поволжская государственная академия телекоммуникаций и информатики

1. Введение

В современных системах подвижной связи для борьбы с эффектом межсимвольной интерференции требуется знание импульсной характеристики (ИХ) канала передачи. В случае радиоканала подвижной связи, оценка ИХ усложняется следующими существенными особенностями:

- многолучёвость;
- ИХ такого канала переменна во времени.

В последние десятилетия развивается новое направление цифровой обработки сигналов (ЦОС) – так называемая слепая обработка сигналов (СОС). Среди приложений СОС можно выделить слепую идентификацию. Основная идея идентификации канала вслепую состоит в том, чтобы получить оценку ИХ канала только на основе информационных символов, то есть без применения обучающих последовательностей. Такой подход к оценке канала способствует увеличению общей эффективности систем связи.

В данной работе проводится сравнение свойств известного алгоритма слепой идентификации EVI (Eigen Vector algorithm for blind Identification) (далее А1) с алгоритмом слепой идентификации на основе преобразования ненулевой парной корреляции (далее А2).

Алгоритм А1 принадлежит классу алгоритмов, использующих статистики высших порядков (НОС) и предложен в [1] немецкими учёными К. Д. Каммейером, Б. Йелоннеком и Д. Боссом.

Алгоритм слепой идентификации А2 основан на использовании нестационарности входного сигнала и предложен в [4,5].

Поскольку рассматриваемые алгоритмы используют для слепой идентификации различные свойства сигналов, подобное сравнение вызывает интерес.

2. Описание рассматриваемых алгоритмов

Алгоритм EVI

Предполагается, что неизвестный канал порядка q удовлетворяет эквивалентной фильтровой модели с дискретным временем и белым шумом [2]. Данные на входе канала $d(k)$ представляют собой равномерно распределённую последовательность независимых случайных комплексных чисел с нулевым средним и дисперсией σ^2 . Сигнал на выходе канала искажён независимым стационарным аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ) $n(k)$ с нулевым средним.

Полученный в [1] алгоритм слепой идентификации EVI интересен тем, что представляет задачу слепой идентификации в виде задачи на нахождение собственных векторов оператора.

Приёмник, реализующий алгоритм А1, имеет структуру, показанную на рис. 1, где:

$v(k)$ – отсчёты с выхода канала, взятые со скоростью передачи символов;

$x(k)$ – отсчёты сигнала на выходе КИХ– фильтра порядка l с ИХ $e(k)$;

$y(k)$ – отсчёты сигнала на выходе КИХ– фильтра порядка l с ИХ $f(k)$.

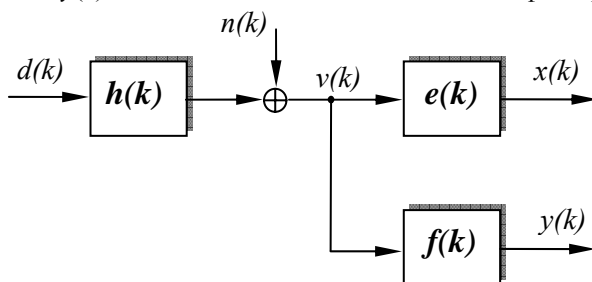


Рис. 1 – Структура приёмника

В [1] доказано, что решение задачи слепой идентификации канала представимо как решение следующего уравнения, называемого «уравнением EVI».

$\lambda \cdot \mathbf{h}_{\text{EVI}} = \mathbf{C}_4^{yv} \cdot \mathbf{R}_{vv}^{-1} \cdot \mathbf{h}_{\text{EVI}}$, где $\mathbf{R}_{vv} = M\{v_k v_k^*\}$ – эрмитова матрица автокорреляции сигнала на выходе канала; \mathbf{C}_4^{yv} – это эрмитова матрица взаимных кумулянтов, содержащая в строке i_1 и столбце i_2 взаимные кумулянты четвёртого порядка вида $[C_4^{yv}]_{i_1, i_2} = c_4^{yv}(-i_1, 0, i_2)$, где: $i_1, i_2 \in \{0, 1, \dots, l\}$;

$$c_4^{yv}(0, 0, 0) = M\{|v(k)|^2 \cdot |y(k)|^2\} - M\{|v(k)|^2\} \cdot M\{|y(k)|^2\} - |M\{v^*(k) \cdot y(k)\}|^2 - |M\{v(k) \cdot y(k)\}|^2;$$

В [1] обосновывается метод сокращения размерности матриц \mathbf{C}_4^{yv} и \mathbf{R}_{vv} , основанный на том, что диапазон задержек взаимных кумулянтов, отличных от нуля, ограничен порядком канала q . Таким образом, раз-

меры матрицы кумулянтов и матрицы автокорреляции зависят не от порядка фильтров l , а от порядка канала q . Тогда «уравнение EVI» записывается в виде

$$\lambda \cdot \tilde{h}_{EVI} = \tilde{C}_4^{yv} \cdot \tilde{R}_{inv} \cdot \tilde{h}_{EVI}.$$

Это уравнение называют «модифицированным уравнением EVI». Матрицы \tilde{C}_4^{yv} и R_{inv} полу получены из матриц C_4^{yv} и R_{yv} выбором областей размерами $(2q + 1) \times (4q + 1)$ и $(4q + 1) \times (2q + 1)$, соответственно. Матрица \tilde{R}_{inv} представляет собой тёпллицеву матрицу, составленную из элементов матрицы R_{inv} . Доказательство справедливости этих преобразований представлено в работе [1]. Таким образом, оценка ИХ канала представляет собой вектор из $2 \cdot q + 1$ коэффициентов, из которых q ненулевые.

В [1] и [3] было доказано, что решение «уравнений EVI» единственно, если объединённая импульсная характеристика

$$w(k) = h(k) * f(k)$$

имеет единственный максимум, то есть

$$\begin{aligned} \max(|w(k)|) &= w_m, & \text{если } k = k_m \\ |w(k)| &< w_m, & \text{если } k \neq k_m. \end{aligned}$$

Так как импульсная характеристика канала априори неизвестна, то выполнение этого условия гарантировать нельзя. В [1] предлагается производить оценку ИХ $f(k)$ с помощью итеративной процедуры, использующей алгоритм слепого выравнивания EVA (Eigenvector algorithm for blind equalization), описанный в [3]. Необходимо заметить, что при идентификации не достигается выравнивания канала, хотя первым шагом алгоритма A1 является использование алгоритма выравнивания EVA. Использование EVA необходимо для обеспечения условия единственности максимума объединённой ИХ $w(k)$.

Таким образом, алгоритм слепой идентификации EVI включает в себя следующие шаги:

1. Выполнение N итераций алгоритма EVA для оценки $f(k)$ в соответствии с условием (6).

2. Вычисление матриц \tilde{C}_4^{yv} и \tilde{R}_{inv} .

3. Нахождение решения «модифицированного уравнения EVI», выбором собственного вектора, связанного с максимальной величиной собственного значения.

4. В качестве оценки импульсной характеристики канала $h(k)$ берётся комплексно сопряжённый вектор с обратным порядком записи элементов.

Число итераций алгоритма EVA (N) подбирается на основе опытных данных и для порядков канала $q = 2, q = 3$ не превышает $N=10$.

Алгоритм, на основе преобразования ненулевой парной корреляции

Часто в системах, использующих временное разделение каналов, помимо специальных тестовых сигналов, информационные блоки разделяются специальными "защитными" паузами для организации работы эквалайзера. Наличие таких интервалов позволяет использовать алгоритмы статистической слепой идентификации для периодически нестационарного по входу канала. К таким алгоритмам относится алгоритм слепой идентификации A2.

В [4] показано, что такой алгоритм может быть построен как алгоритм нахождения собственного вектора, соответствующего максимальному собственному числу матрицы корреляции. Алгоритм A2 можно представить следующими этапами:

1. Для каждой из M реализаций наблюдаемого сигнала y_k выполняют преобразование ненулевой парной корреляции:

$$s_k = V_{n-1}^{n-1}(\alpha_1, \dots, \alpha_{n-1}) \cdot y_k,$$

где V_{n-1}^{n-1} - матрица Вандермонда размера $n \times (n-1)$.

2. По полученным векторам находят оценку выборочной ковариационной матрицы:

$$\hat{R} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{k=1}^M s_k \cdot s_k^*$$

4. Вычисляют собственный вектор, соответствующий максимальному собственному числу матрицы R .

5. Оценку импульсной характеристики канала получают по следующей формуле:

$$\begin{pmatrix} h_0 \\ \dots \\ h_{L-1} \end{pmatrix} = \left(V_L^{n-1}(\alpha_1, \dots, \alpha_{n-1}) \right)^\# \cdot \begin{pmatrix} h(\alpha) \\ \dots \\ h(\alpha_{n-1}) \end{pmatrix}$$

где $(\bullet)^\#$ обозначает операцию псевдоинверсии матрицы;

Данный алгоритм позволяет получать оценку ИХ канала высокого качества при наличии пассивных пауз в передаваемом сигнале, которые выступают как дополнительная двоичная амплитудная модуляция.

3. Результаты сравнения алгоритмов

Моделирование описанных алгоритмов проводилось в среде Matlab. Программная модель алгоритма А1, разработанная его авторами, представлена в Internet по адресу www.uni-bremen.de.

В качестве входного сигнала для алгоритма А1 задавалась из 300 отсчётов модулированной PSK-8 информационной последовательности. Алгоритм А2 работал с 30 пачками отсчётов, в каждой из которых содержалась пауза с длиной, равной порядку канала в тактовых интервалах, и 12 отсчётов модулированной PSK-8 информационной последовательности.

При описании ИХ радиоканала подвижной связи использовалась модель Гауссовского некоррелированного стационарного рассеяния (Gaussian Stationary Uncorrelated Scattering (GSUS)). Согласно этой модели ИХ может быть представлена в виде:

$$h_c(\tau, t) = \frac{1}{\sqrt{N_e}} \cdot \sum_{v=1}^{N_e} e^{j(2\pi \cdot f_{d,v} \cdot t + \Theta_v)} \cdot g_{TR}(\tau - \tau_v)$$

где:

N_e – число лучей (эхо-сигналов);

$f_{d,v}$ – частота Допплера, для v -ого луча;

Θ_v – начальная фаза v -ого луча;

$g_{TR}(\tau - \tau_v)$ – объединенная ИХ приёмного и передающего фильтров.

Для определения случайных начальных фаз Θ_v и времён задержки τ_v используется стандарт COST-207 ((European) Cooperation in the field of Scientific and Technical Research, project № 207), согласно которому определены четыре типа профилей ландшафтов, определяющих свойства канала:

- TU (Typical Urban);
- BU (Bad Urban);
- HT (Hilly Terrain);
- RA (Rural Area).

Качество «слепой» оценки ИХ канала определяется посредством относительной погрешности оценки γ , которая рассчитывается по формуле:

$$\gamma = \sqrt{M \left\{ \frac{\|h(k) - \hat{h}(k)\|_2^2}{\|h(k)\|_2^2} \right\}}, \text{ где: } M\{\bullet\} \text{ обозначает оператор математического ожидания, по номеру}$$

испытания; $\|\bullet\|_2^2$ обозначает квадрат евклидовой векторной нормы; $h(k)$ – коэффициенты истинной ИХ канала; $\hat{h}(k)$ – коэффициенты оценки ИХ канала.

На рис. 2 представлены зависимости относительной погрешности оценки от отношения сигнал/шум в дБ (ОСШ) для порядка канала $q = 2$. Для сравнения показан график зависимости от (ОСШ) погрешности оценки ИХ по тестовой последовательности.

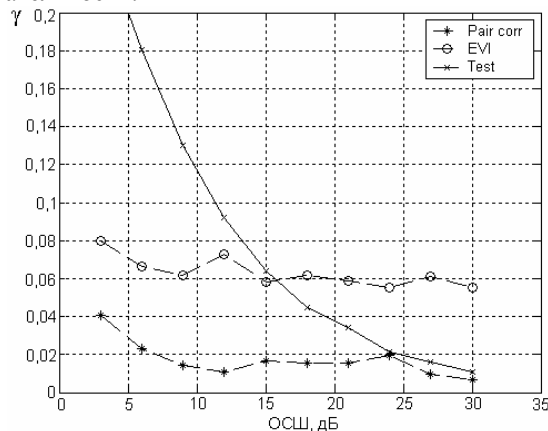


Рис. 2.

Из графиков на рис. 2 видно, что оба алгоритма опережают по помехоустойчивости оценку по тестовой последовательности. При этом алгоритм А2 даёт для всех значений ОСШ на 4% меньшую погрешность оценки, чем алгоритм А1.

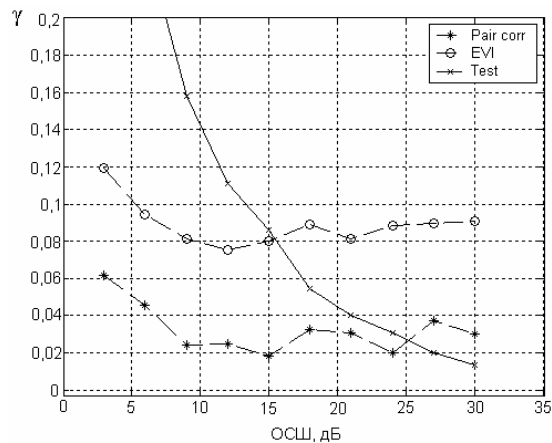


Рис. 3.

На рис. 3 представлены зависимости относительной погрешности оценки от ОСШ для порядка канала $q = 3$. Видно, что в этом случае погрешность оценки немногим больше, чем в случае $q = 2$.

4 Выводы

Исследование свойств алгоритмов А1 и А2 показало, что оба алгоритма способны давать качественные оценки ИХ канала, устойчивые к воздействию АБГШ. Алгоритм А2 предоставляет более качественную оценку ИХ, но проигрывает А1 в скорости сходимости (А1 даёт оценку ИХ с погрешностью менее 15% уже при пачке отсчётов на входе длиной 150 отсчётов).

Полученные результаты позволяют говорить об алгоритмах, использующих нестационарность входного сигнала, как о перспективном направлении развития слепой обработки сигналов. На данном пути могут быть найдены технические решения для применения методов слепой обработки во вновь создаваемых системах и стандартах подвижной связи.

Литература

1. Boss D., Jelonck B., Kammeyer K. D. Eigenvector algorithm for blind MA system identification // Elsevier Signal Processing. – 1998. – Vol.66, № 1.
2. Прокис Дж. Цифровая связь: Пер. с англ. / Под ред. Д. Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.: ил.
3. Jelonck B., Kammeyer K. D. A closed-form solution to blind equalization // Elsevier Signal Processing. – 1994. – Vol.36, № 3. – p. 251 – 259.
4. Горячкин О. В. Методы слепой обработки сигналов и их приложения в системах радиотехники и связи. – М.: Радио и связь, 2003. – 230с.: ил.
5. Горячкин О. В. Многообразия постоянных парных корреляций и их применения в задаче слепой обработки широкополосных сигналов // Успехи современной радиоэлектроники, 2003, №10, С.72 – 76.

SOME PERFORMANCES OF BLIND IDENTIFICATIONS ALGORITHMS FOR MOBILE TELECOMMUNICATION SYSTEMS

Goriachkin O., Ivaschenko E.

Volga state academy of telecommunications and informatics

In the given work research and comparison of the basic properties of algorithm of blind identification EVI (Eigen Vector algorithm for blind Identification) and the algorithm using transformation of nonzero pair correlation is lead{carried out}. The purpose of research is comparison of quality of the estimations given by the specified algorithms at an estimation of the impulse response (IR) radio channel of system of mobile communication. The given research is of interest, as considered algorithms are based on use of various properties of an entrance signal. Algorithm EVI concerns to class HOS (based on Higher Order Statistics) and consequently demands, that the entrance signal had non-Gaussian distribution. The algorithm using transformation of nonzero pair correlation concerns to algorithms on a basis polynomial statistics and demands non-stationary a signal on input channel.

Modeling of work of researched algorithms was carried out at the estimation of IR corresponding to model GSUS (Gaussian Stationary Uncorrelated Scattering) for environments of distribution of signal Typical Urban (TU) and Bad Urban (BU), described by standard COST-207. Quality of identification of channels was estimated by a relative error for attitudes signal-to-noise ratio (SNR) from a range 3 - 30 dB.

Modeling has shown, that considered algorithms are capable to give quality standard of IR channel (less than 10 %) practically for all range SNR. The algorithm with use of transformation of nonzero pair correlation gives an error of estimation on 2 % smaller for all SNR, than algorithm EVI. But the requirement non-stationary on input

channel is realized by introduction in a signal of passive pauses (additional binary amplitude modulation). We receive of it is smaller speed of convergence in comparison with algorithm EVI.

Thus, that the methods using non-stationary of an entrance signal, are perspective for researches in a direction of increase of a noise robustness of an estimation of IR channels in systems of mobile communication.

