

ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFOCOMMUNICATION TECHNOLOGIES

УДК 004.716

DOI 10.52575/2687-0932-2023-50-4-936-943

Оценка импульсной характеристики канала связи на основе ортогонального субполосного базиса

¹ Урсол Д.В., ² Болгова Е.В.

¹ ООО «Промышленные электронные системы»,

Россия, 308000, г. Белгород, Михайловское шоссе, 121а

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет,

Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

E-mail: ursoldenis@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается метод оценки импульсной характеристики канала связи на основе сигнально-кодовых конструкций (СКК), сформированных с помощью ортогонального субполосного базиса. Ортогональный базис состоит из собственных векторов субполосной матрицы, рассчитанной для заданного диапазона частот с минимальным уровнем внеполосного излучения. Для ортогонального базиса отбираются собственные вектора, собственные числа которых близки или равны единице. Оценка импульсной характеристики канала основана на решении системы линейных уравнений, где передаваемая информация заведомо известна. Метрикой эффективности предложенного метода выступает среднеквадратическое отклонение между полученной оценкой и применяемым искажением.

Ключевые слова: импульсная характеристика, преобразование Фурье, свертка, ортогональный субполосный базис, обратная матрица, псевдо-обратная матрица, среднеквадратическое отклонение, нелинейные искажения

Для цитирования: Урсол Д.В., Болгова Е.В. 2023. Оценка импульсной характеристики канала связи на основе ортогонального субполосного базиса. Экономика. Информатика, 50(4): 936–943. DOI: 10.52575/2687-0932-2023-50-4-936-943

Estimation the Impulse Response of a Wireless Channel Using an Orthogonal Subband Basis

¹ Denis V. Ursol, ² Evgeniya V. Bolgova

¹ Industrial Electronic Systems LLC,

121a Mikhailovskoe shosse, Belgorod, 308000, Russia

² Belgorod State National Research University,

85 Pobedy St, Belgorod, 308015, Russia

E-mail: ursoldenis@mail.ru

Abstract. The article discusses a method for estimating the impulse response of a communication channel based on signal-code structures formed using an orthogonal subband basis. The orthogonal basis consists of eigenvectors of a subband matrix calculated for a given frequency range with a minimum level of out-of-band radiation. For an orthogonal basis, eigenvectors are selected whose eigenvalues are close to or equal to one. Estimation of the channel impulse response is based on solving a system of linear equations, where the transmitted information is known. Since out-of-band emission is minimal, this basis is optimal for channel estimation. The orthogonality of the vectors and their occupation of the entire frequency range allows the

use of only one pilot signal to estimate the impulse response of the entire channel. The effectiveness metric of the proposed method is the standard deviation between the obtained estimate and the applied distortion. The experimental results show the effectiveness of the developed method for estimating the impulse response of a channel in the presence of different levels of Additive white Gaussian noise (AWGN).

Keywords: impulse response, Fourier transform, convolution, orthogonal subband basis, inverse matrix, pseudo-inverse matrix, standard deviation, nonlinear distortion

For citation: Ursol D.V., Bolgova E.V. 2023. Estimation the Impulse Response of a Wireless Channel

Введение

В любой системе связи прохождение сигнально-кодовой конструкции через канал связи подвержен амплитудно-фазовым искажениям. Если канал является беспроводным, то данная проблема возникает в результате многолучевого распространения сигнала, движения источника или приемника, изменения окружающей обстановки. Нелинейные искажения в тракте передачи могут быть представлены как результат свертки сигнала с импульсной характеристикой канала передачи. Получив такую оценку импульсной характеристики, возможно ее компенсировать на передающей или приемной стороне, тем самым увеличить вероятность верного декодирования информации вне зависимости от искажения в канале. Однако для этого необходимо получить оценку импульсной характеристики как можно точнее. В современных системах оценка канала происходит с помощью пилот и зондирующих сигналов. Это является технической информацией, что снижает эффективную скорость передачи всей системы в целом. Поиск метода оценки импульсной характеристики канала связи с максимальной точностью и минимальными потерями в пропускной способности является актуальной задачей. В данной статье предлагается использовать субполосный базис для получения оценки импульсной характеристики канала.

Метод оценки канала

Пусть математическая модель прохождения сигнально-кодовой конструкции через канал связи принимает вид:

$$\tilde{x}(\vec{e}, t) = x(\vec{e}, t) \otimes h(t) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

где $h(t)$ – импульсная характеристика канала, зависящая от времени, т.е. подразумевается изменчивость в результате движения абонента или появление новых препятствий на пути распространения электро-магнитной волны, \otimes – оператор свертки, $\varepsilon(t)$ – аддитивный гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием, $\vec{e} = (\dot{e}_1, \dots, \dot{e}_J) = (a_1 + b_1 i, \dots, a_J + b_J i) \in \mathbb{C}, i = \sqrt{-1}$ – информационный вектор.

При этом положим, что энергия передаваемого информационного символа не меняется:

$$\|\dot{e}_k\|^2 = e_k \cdot e_k^* = E = const, k = 1, \dots, J, \quad (2)$$

где k – индекс элемента информационного вектора, J – количество передаваемых информационных символов.

Формирование сигнально-кодовой конструкции осуществляется согласно выражению:

$$x(\vec{e}, t) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(\vec{e}) \cdot q_n(t) \quad (3)$$

или в векторной форме

$$x(\vec{e}, t) = Q(t) \cdot f(\vec{e}) \quad (4)$$

$$Q(t) = (\vec{q}_1(t), \vec{q}_2(t), \dots, \vec{q}_J(t)),$$

где $f()$ – функция кодирования информационного символа т.е. имеет место BPSK или QAM манипуляция, $Q(t)$ – комплексный ортогональный базис в заданных полосах частот, собственные функции которого рассчитаны из комплексного субполосного ядра вида:

$$C_0(t - \tau) = \begin{cases} \sum_{m=1}^M \frac{e^{j\nu_{1m}(t-\tau)} - e^{j\nu_{2m}(t-\tau)}}{-2j\pi(t-\tau)}, & t \neq \tau \\ \sum_{m=1}^M \frac{|\nu_{2m} - \nu_{1m}|}{2\pi}, & t = \tau \end{cases} \quad (5)$$

Собственные функции выбраны согласно с максимальным значением соответствующих собственных чисел.

После преобразования Фурье распределение энергии такого вектора будет иметь вид:

$$Q_n(\omega) = \int_0^T q_n(t) e^{-j\omega t} dt, n = 1, \dots, J, \quad (6)$$

$$H(\omega) = \int_0^T h(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (7)$$

Поскольку значение соответствующего собственного числа показывает долю энергии за пределами заданного диапазона выделенных полос, то справедливо выражение:

$$Q_n(\omega) = \begin{cases} \int_0^T q_n(t) e^{-j\omega t} dt, \omega \in \Delta\nu \\ 0, \omega \notin \Delta\nu \end{cases}, n = 1, \dots, J \quad (8)$$

$$1 \geq \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n \dots > 0$$

$$\Delta\nu = (\nu_1, \dots, \nu_m) = (2\pi\Delta f_1, \dots, 2\pi\Delta f_m), \Delta f_m = f_{2m} - f_{1m}, f_{2m} > f_{1m}, m = 1 \dots M$$

где M – количество частотных интервалов, f_{2m}, f_{1m} верхняя и нижняя границы частотных интервалов.

Импульсная характеристика будет минимально воздействовать на сигнал вне заданного набора диапазонов частот. Учитывая свойство трансформант Фурье, можно записать СКК после прохождения канала в частотной области:

$$Q_n(\omega) \cdot H(\omega) = \begin{cases} Q_n(\omega) \cdot H(\omega), \omega \in \Delta\nu \\ 0 \cdot H(\omega), \omega \notin \Delta\nu \end{cases}, n = 1, \dots, J \quad (9)$$

$$\tilde{x}(\vec{e}, t) = \sum_{n=1}^J (f_n(\vec{e}) \cdot q_n(t)) \otimes h(t) + \varepsilon(t) \quad (10)$$

$$\tilde{x}(\vec{e}, t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=1}^J \int_{\omega \in \Delta\nu_n} (E_n \cdot Q_n(\omega) \cdot H(\omega) + \sigma(\omega)) e^{j\omega t} d\omega \quad (11)$$

Из этого следует, что импульсная характеристика канала оказывает воздействие на сигнално-кодовые конструкции только в заданном диапазоне частот и позволяет составить систему уравнений:

$$X(\vec{e}, \omega) \cdot H(\omega) + \sigma(\omega) = \begin{cases} E_1 \cdot Q_1(\omega_1) \cdot H(\omega_1) + E_2 \cdot Q_2(\omega_1) \cdot H(\omega_1) + E_n \cdot Q_n(\omega_1) \cdot H(\omega_1) + \sigma(\omega_1) \\ E_1 \cdot Q_1(\omega_2) \cdot H(\omega_2) + E_2 \cdot Q_2(\omega_2) \cdot H(\omega_2) + E_n \cdot Q_n(\omega_2) \cdot H(\omega_2) + \sigma(\omega_2) \\ \dots \\ E_1 \cdot Q_1(\omega_k) \cdot H(\omega_k) + E_2 \cdot Q_2(\omega_k) \cdot H(\omega_k) + E_n \cdot Q_n(\omega_k) \cdot H(\omega_k) + \sigma(\omega_k) \end{cases},$$

где $n = 1, \dots, J$ индекс передаваемых символов, $\omega_k \in \omega, k = 1, \dots, K$ круговая частота, на которой требуется найти импульсную характеристику.

Представим систему уравнений через матрицу коэффициентов:

$$A = \begin{pmatrix} E_1 \cdot Q_1(\omega_1) \cdot H(\omega_1) + \sigma(\omega_1) / J, \dots, E_n \cdot Q_n(\omega_1) \cdot H(\omega_1) + \sigma(\omega_1) / J \\ E_1 \cdot Q_1(\omega_2) \cdot H(\omega_2) + \sigma(\omega_2) / J, \dots, E_n \cdot Q_n(\omega_2) \cdot H(\omega_2) + \sigma(\omega_2) / J \\ \dots \\ E_1 \cdot Q_1(\omega_k) \cdot H(\omega_k) + \sigma(\omega_k) / J, \dots, E_n \cdot Q_n(\omega_k) \cdot H(\omega_k) + \sigma(\omega_k) / J \end{pmatrix}. \quad (12)$$

$$A = \{a_{kn}\}, n = 1 \dots J, \omega_k \in \omega, k = 1, \dots, K$$

$$a_{kn} = \{E_n \cdot Q_n(\omega_k) \cdot H(\omega_k) + \sigma(\omega_k) / J\} \quad (13)$$

Для возможности решить систему уравнений, обязательно должно выполняться условие:

$$K \geq J. \quad (14)$$

Коэффициенты $E_n, Q_n(\omega_k)$ известны из уравнений (2) и (8) соответственно.

Поскольку у матрицы не может быть больше собственных векторов, чем ее размерность, то условие всегда выполняется. Вектор столбец трансформант Фурье вектора СКК после канала связи представим в виде:

$$B = \begin{pmatrix} \tilde{X}(\vec{e}, \omega_1) \\ \tilde{X}(\vec{e}, \omega_2) \\ \dots \\ \tilde{X}(\vec{e}, \omega_k) \end{pmatrix}. \quad (15)$$

В матричном виде СКК после прохождения канала связи без аддитивного Гауссовского шума примет вид:

$$A \cdot |H(\omega)| = B. \quad (16)$$

Тогда нахождение спектра импульсной характеристики канала связи:

$$|H(\omega)| = A^{-1} \cdot B, \quad (17)$$

где A^{-1} – обратная матрица. Однако из условия (14) возможно, что матрица A не будет квадратной и тогда решение будет через псевдообратную матрицу:

$$|H(\omega)| = A^+ \cdot B = (A^* A)^{-1} A^* \cdot B, \quad (18)$$

из которой можно получить оценку импульсной характеристики канала

$$\tilde{h}(t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=1}^J \int_{\omega \in \Delta \nu_n} |H(\omega)| e^{j\omega t} d\omega. \quad (19)$$

Вычислительный эксперимент

Максимальное соответствие будет достигаться при условии выбора и использования комплексных ортогональных функций с максимальным собственным числом и при минимальном уровне аддитивного гауссовского шума с нулевым математическим ожиданием.

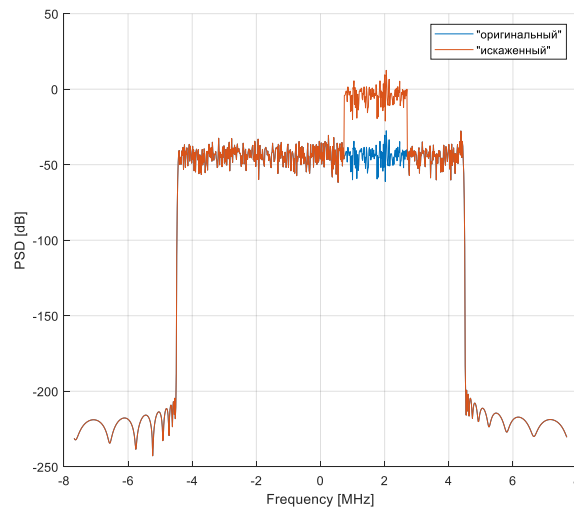


Рис. 1. Искажение сигнала в синтетическом канале связи
 Fig. 1. Signal distortion in a synthetic communication channel

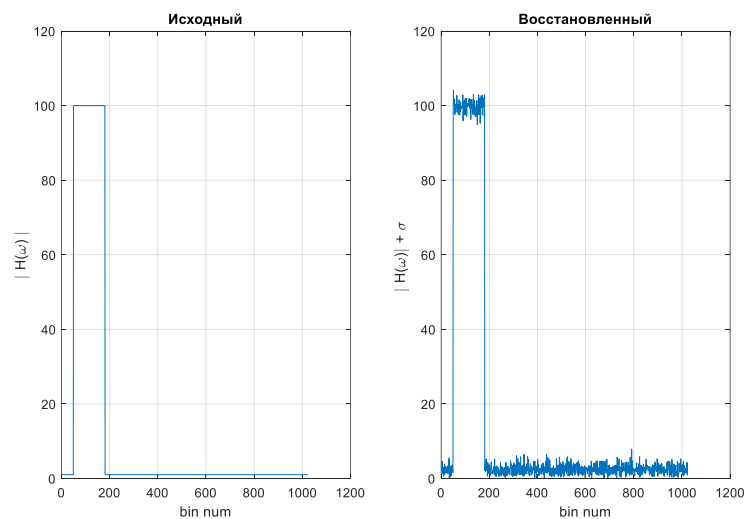


Рис. 2. Исходная и восстановленная амплитудно-частотная характеристика канала с уровнем аддитивного шума 10дБ
 Fig. 2. Original and reconstructed amplitude-frequency response of a channel with an additive noise level of 10 dB

В таблице представлены результаты вычислительных экспериментов по оценке среднеквадратического отклонения амплитудно-частотных характеристик различного вида с наличием аддитивного шума, где $|H_1(\omega)|$ – прямоугольный вид (Рис.2), $|H_2(\omega)|$ – монотонно возрастающий, $|H_3(\omega)|$ – случайный вид.

Таблица 1
Table 1

Среднеквадратическое отклонение амплитудно-частотных характеристик различного вида с наличием аддитивного шума
Mean square error of amplitude-frequency characteristics of various types with additive noise

Соотношение сигнал/шум (дБ)	$ H_1(\omega) $	$ H_2(\omega) $	$ H_3(\omega) $
-10	538.7281	78759.8996	0.453656
-5	168.1956	26023.7499	0.161660
0	47.0822	7654.2331	0.048871
5	13.5875	2519.8999	0.014455
10	3.4596	788.2748	0.004780
15	0.9005	249.1105	0.001561
20	0.2786	83.2765	0.000472
25	0.1022	25.1078	0.000160
30	0.0323	8.4347	0.000045

Из таблицы видно, что основной вклад в ошибку оценки импульсной характеристики вносит аддитивный Гауссовский шум. Аналогичные результаты достигаются с другим амплитудно-частотными характеристиками искажающего канала связи.

Заключение

Каждая собственная функция позволяет получить оценку частотно-амплитудной характеристики канала связи. Использование одной собственной функции в качестве одного пилот сигнала для повышения эффективной скорости передачи, является предметом дальнейших исследований.

Полученную оценку можно использовать на приемной стороне для предварительного выравнивания частотного спектра СКК и на передающей стороне, используя ее обратную функцию для предварительного искажения передаваемого сигнала.

Список литературы

- Ермолаев В.Т., Флакман А.Г. 2011. Теоретические основы обработки сигналов в беспроводных системах связи: Монография. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского. – 368 с.
- Жиляков Е.Г., Урсол Д.В., Магергут В.З. 2012. Разработка нового способа формирования сигналов для систем доступа к широкополосным мультимедийным услугам. Научные ведомости БелГУ. Серия История. Политология. Экономика. Информатика. №19-1 (138), с. 207-211
- Урсол Д.В. 2012. Метод обеспечения помехоустойчивости информационных коммуникаций при субполосной передаче информации. Дис. канд. техн. наук: 05.13.17 – Теоретические основы информатики. Белгород.
- Урсол Д.В. 2021. О помехоустойчивости сигнально-кодовых конструкций для систем интернет вещей. Экономика. Информатика. 48(4): 822-830.

- Урсол Д.В. 2022. Сигнально-кодовые конструкции для передачи информации с минимальной межканальной интерференцией. Экономика. Информатика. 48(4): 854-862
- 3GPP TS 36.141. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) Conformance Testing. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network. URL: <https://www.3gpp.org>.
- Halperin D. 2010. 802.11 with Multiple Antennas for Dummies, ACM SIGCOMM Comp. Commun. Rev., vol. 40, Jan., pp. 19–25
- Khaled M. Gharaibeh 2012. Nonlinear distortion in wireless systems: modeling and simulation with MATLAB, IEEE, pp.341-346
- Lin Y. P., Tseng P.H., Feng K.T. 2014. Compressive sensing based location estimation using channel impulse response measurements. IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC), Washington, DC, USA, pp. 2066-2070
- Lv X., Li Y., Wu Y., Liang H. 2020. Kalman filter based recursive estimation of slowly fading sparse channel in impulsive noise environment for OFDM systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 3, pp. 2828-2835
- Maas D., Firooz M.H., Zhang J., Patwari N., Kasera S.K. 2012. Channel Sounding for the Masses: Low Complexity GNU 802.11b Channel Impulse Response Estimation. IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 11, no. 1, pp. 1-8, January 2012
- Salous S. 2013. Data Analysis in Radio Propagation Measurement and Channel Modelling. Wiley, pp. 255-336.
- Talebi F., Pratt T. 2016. Channel sounding and parameter estimation for a wideband correlation-based MIMO model. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 2, pp. 499-508.
- Tkac A., Wieser V. 2014. Channel estimation using measurement of channel impulse response. 2014 ELEKTRO, Rajecke Teplice, Slovakia, pp. 113-117
- Zhang J., Kountouris M., Andrews J.G., Heath R. W. 2011. Multi-mode transmission for the MIMO broadcast channel with imperfect channel state information. Communications, IEEE Transactions on, vol. S9, no.3, pp.803-814

References

- Ermolaev V.T., Flaxman A.G. 2011. Theoretical foundations of signal processing in wireless communication systems: Monograph. Nizhny Novgorod: Publishing house of Nizhny Novgorod State University N.I. Lobachevsky. – 368 p.
- Zhylyakov E.G., Ursol D.V., Magergut V.Z. 2012. Development of a new method of forming signals for access to broadband multimedia services. Belgorod State University Scientific Bulletin. Series History. Political science. Economics. Information technologies. №19-1 (138), pp. 207-211
- Ursol D.V. 2012. Metod obespechenija pomehoustojchivosti informacionnyh kommunikacij pri subpolosnoj peredache informacii [The method of ensuring noise immunity of information communications in the subband transmission of information]: dis. cand. tech. sciences: 05.13.17 - Theoretical foundations of computer science. Belgorod.
- Ursol D.V. 2021. About noiseimmunity of signal-code structures for internet of things. Economics. Information technologies. 48(4): 822-830.
- Ursol D.V. 2022. Signal-code structures for information transmission with minimal adjacent channel interference. Economics. Information technologies. 49(4): 854-862
- 3GPP TS 36.141. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) Conformance Testing. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network. URL: <https://www.3gpp.org>.
- Halperin D. 2010. 802.11 with Multiple Antennas for Dummies, ACM SIGCOMM Comp. Commun. Rev., vol. 40, Jan., pp. 19–25
- Khaled M. Gharaibeh 2012. Nonlinear distortion in wireless systems: modeling and simulation with MATLAB, IEEE, pp.341-346
- Lin Y.P., Tseng P.H., Feng K.T. 2014. Compressive sensing based location estimation using channel impulse response measurements. IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC), Washington, DC, USA, pp. 2066-2070
- Lv X., Li Y., Wu Y., Liang H. 2020. Kalman filter based recursive estimation of slowly fading sparse channel in impulsive noise environment for OFDM systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 3, pp. 2828-2835

- Maas D., Firooz M.H., Zhang J., Patwari N., Kasera S. K. 2012. Channel Sounding for the Masses: Low Complexity GNU 802.11b Channel Impulse Response Estimation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 1, pp. 1-8, January 2012.
- Salous S. 2013. *Data Analysis in Radio Propagation Measurement and Channel Modelling*. Wiley, pp.255-336.
- Talebi F., Pratt T. 2016. Channel sounding and parameter estimation for a wideband correlation-based MIMO model. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 2, pp. 499-508.
- Ткач А., Wieser V. 2014. Channel estimation using measurement of channel impulse response. 2014 ELEKTRO, Rajecke Teplice, Slovakia, pp. 113-117
- Zhang J., Kountouris M., Andrews J.G., Heath R.W. 2011. Multi-mode transmission for the MIMO broadcast channel with imperfect channel state information. *Communications, IEEE Transactions on*, vol. S9, no.3, pp.803-814

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 06.11.2023

Received November 06, 2023

Поступила после рецензирования 21.11.2023

Revised November 21, 2023

Принята к публикации 01.12.2023

Accepted December 01, 2023

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Урсол Денис Владимирович, кандидат технических наук, инженер-программист, ООО «Промышленные электронные системы», г. Белгород, Россия

Denis V. Ursol, Candidate of Technical Sciences, software engineer, Industrial Electronic Systems LLC, Belgorod, Russia

Болгова Евгения Витальевна, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных технологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Evgeniya V. Bolgova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Informatics and Information Technologies, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russia