

References

1. **Kukhareno B. G., Solntseva M. O.** Klasterizacija upravlyаемых объектов na osnove shodstva ih mnogomernyh trajektoriyi. *Informacionnye tehnologii*. 2014, no. 5, pp. 3–7.
2. **Kukhareno B. G., Solntseva M. O.** Analiz rezultatov klasterizacii mnogomernyh trajektoriyi posredstvom modelei lineinyh dinamicheskikh sistem. *Informacionnye tehnologii*. 2015, no. 2, pp. 104–109.
3. **Listgarten J., Neal R. M., Roweis S. T., Emili A.** Multiple alignment of continuous time series / Saul L. K., Weiss Y., Bottou L., eds. *Proceedings of Neural Information Processing Systems (NIPS 2004). December 13–18, 2004, Vancouver, British Columbia, Canada*. Advances in Neural Information Processing Systems. Cambridge, MA: MIT Press. 2005, vol. 17, pp. 5–13.
4. **Listgarten J.** *Analysis of sibling time series data: Alignment and difference detection. PhD thesis*. University of Toronto: Graduate Department of Computer Science. 2007.
5. **Kukhareno B. G.** Analiz nezavisimyh komponent i skrytaja Markovskaja model dlja opredelenija dominantnyh komponent mnogomernyh vremennyh rjadov. *Informacionnye tehnologii*. 2010, no. 11. Prilozhenie, pp. 1–32.
6. **Poritz A. B.** Hidden Markov models: A guided tour. *Proceedings of the IEEE Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. Morgan Kaufmann. 1988, pp. 7–13.
7. **Dasgupta P., Maskin E.** On the robustness of majority rule // *Journal of the European Economic Association*. 2008, vol. 6, no. 5, pp. 949–973.

УДК 621.391

А. В. Вольнская, канд. техн. наук, доц., e-mail: anna-volinskaya@mail.ru,
Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург,
И. В. Сапожников, аспирант, fbjumper@mail.ru,
Уральский технический институт связи и информатики, г. Екатеринбург

Моделирование линейного мультипараметрического модема для каналов передачи информации с низким отношением сигнал/помеха

Приведены результаты компьютерного моделирования алгоритма мультипараметрической модуляции и демодуляции с оценкой его помехоустойчивости путем корреляционного анализа принятых сигналов.

Ключевые слова: модуляция, помехоустойчивость, свертка, двоичные сигналы, сложные шумоподобные сигналы, коды Баркера, корреляция

Введение

Существуют системы передачи информации, в которых отношение сигнал/помеха (с/п) на входе приемника меньше единицы. К ним относятся, например, системы беспроводной аварийной сигнализации в шахтах, PLC-R каналы (связь с электровозом по контактному проводу), военные системы связи, работающие в условиях радиопротиводействия. В этих системах применение классических видов модуляции затруднено ввиду так называемого порогового эффекта помехоустойчивости, когда отношение сигнал/помеха на входе приемника снижается до единицы, а на выходе — лавинообразно падает [1]. Причина этого явления — нелинейность модуляции, возникающая в результате перемножения сигналов. Кроме того, модуляции подвергается, как правило, один параметр простого гармонического колебания, максимум — два (в комбинированных видах модуляции). Теоретическая возможность применения более сложной шумоподобной несущей обсуждается с середины прошлого века, но только в варианте однопараметрической модуляции, например дисперсии или средней частоты [2]. В начале 80-х годов А. И. Самойловым предложены алгоритм и варианты технической реализации мульт-

типараметрической линейной модуляции шумоподобной несущей путем ее свертки (*convolution*) с передаваемым сигналом и развертки (*deconvolution*) на приемном конце [3]. Назовем такой модем линейным мультипараметрическим модемом (ЛММ). Преимуществом ЛММ является его способность работать при наличии шумов с адаптацией спектра передаваемого сигнала к спектру помех. В упрощенном виде эта технология реализована в стандарте IEEE 802.22 (когнитивное радио) [4] и PLC-каналах передачи сигналов по проводам электропитания [5]. Идея общая — энергия сигнала перераспределяется на участки спектра, где минимальна энергия помехи.

Основные положения

На рис. 1 представлены схема и временные диаграммы, поясняющие суть ЛММ, который работает следующим образом. Пусть передаваемое сообщение $s(t)$, имеющее ширину спектра F_s и длительность T_s , разбивается на фрагменты по $2F_s T_s$ отсчетных значений, которые записываются в регистр; шумоподобное несущее колебание $y(t)$ имеет период $2F_s T_s$ отсчетных значений и продвигается по цифровой линии задержки, при этом каждое его

отсчетное значение умножается на соответствующее отсчетное значение модулирующего сигнала и с этим коэффициентом поступает на сумматор. Очевидно, что сигнал $x(t)$ на выходе модулятора является сверткой двух сигналов. При этом каждое его отсчетное значение есть результат линейного взаимодействия всех отсчетных значений несущего колебания со всеми отсчетными значениями передаваемого сообщения. Это обеспечивает как высокую помехоустойчивость, так и высокую скрытность [6, 7].

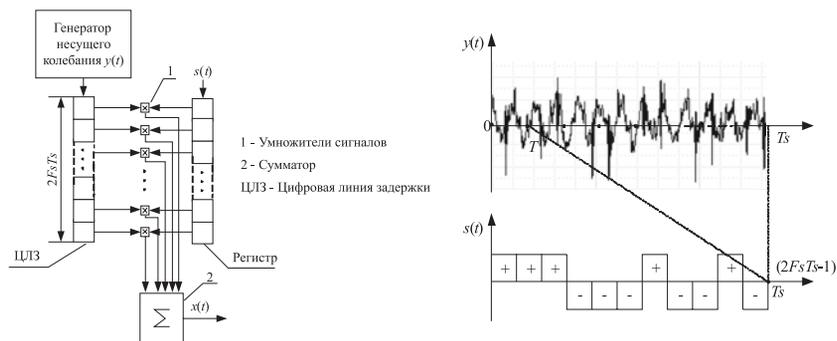


Рис. 1. Схема линейного мультипараметрического модема и временные диаграммы его работы

Оценка помехоустойчивости линейного мультипараметрического модема

Для проверки корректности ЛММ и оценки его помехоустойчивости проведено моделирование в программной среде Visual Studio 2010 [8]. В качестве передаваемых сигналов рассматриваются канонические сигналы Баркера и новые, более сложные, комбинированные сигналы Баркера [9], а в качестве несущего колебания — случайная (шумоподобная) двоичная последовательность. Далее проводится свертка одного из выбранных сигналов с псевдослучайной двоичной последовательностью, в результате чего получается сложное шумоподобное колебание. К этому колебанию добавляется помеха, сформированная с помощью генератора случайных чисел. Для демодуляции вычисляется матрица, обратная матрице несущего колебания и соответствующая демодулирующему колебанию, и выполняется свертка с принятой смесью сигнала и помехи. В результате получаем демодулированный сигнал, для которого вычисляется нормированная функция взаимной корреляции (ВКФ) с переданным сигналом. По главному пику этой функции оценивается возможность надежного обнаружения переданных сигналов.

На рис. 2 приведены результаты моделирования для 11-элементного сигнала Баркера. 11-элементный сигнал Баркера (рис. 2, а) сворачивается с несущим сигналом, представляющим собой случайную двоичную последовательность (рис. 2, б). Модулированный сигнал (полученный в результате свертки) показан на рис. 2, в. На рис. 2, г сверху — сигнал после демодуляции (ниже, для сравнения, — исходный сигнал) и их взаимокорреляционная функция (ВКФ), которая совпадает с автокорреляционной функцией (АКФ), так как сигналы одинаковые.

Теперь к модулированному сигналу добавим помеху. На рис. 3, а снизу показана помеха, а сверху — сумма сигнала и помехи на входе демодулятора. На рис. 3, б — сигнал на выходе демодулятора (снизу — исходный сигнал); пик ВКФ (рис. 3, в) имеет высоту более 0,9, что свидетельствует о хорошем сходстве демодулированного сигнала с переданным.

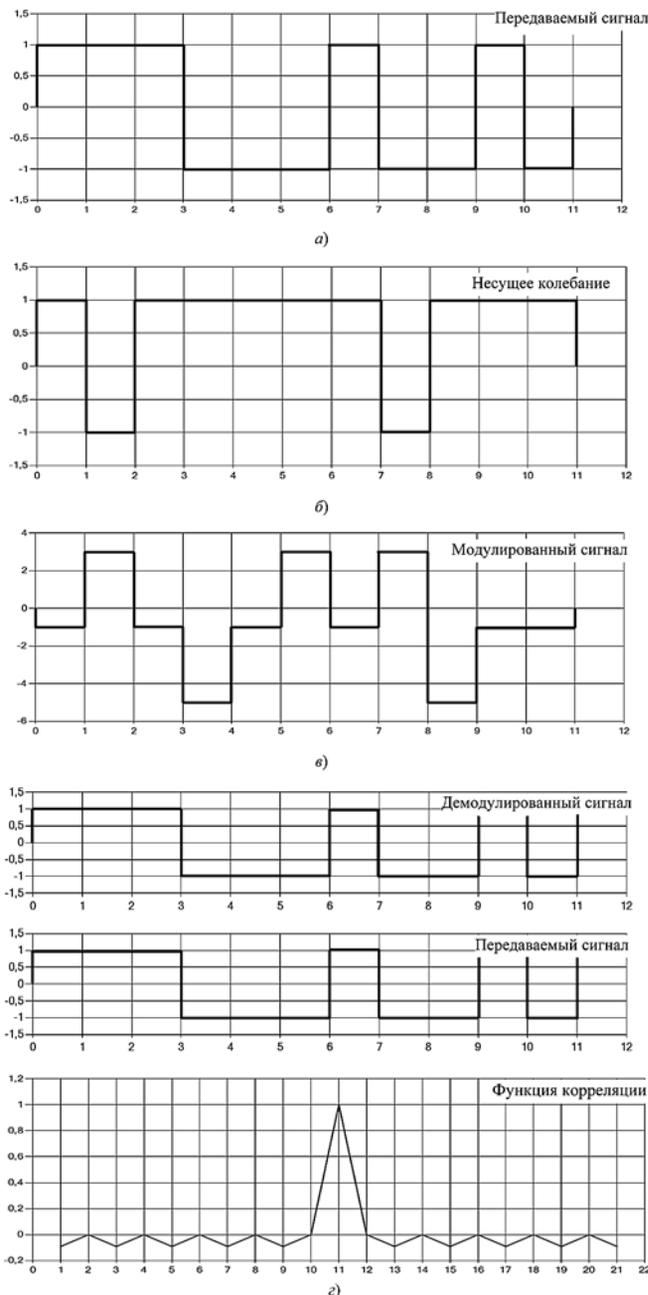


Рис. 2. Результаты моделирования для 11-элементного сигнала Баркера

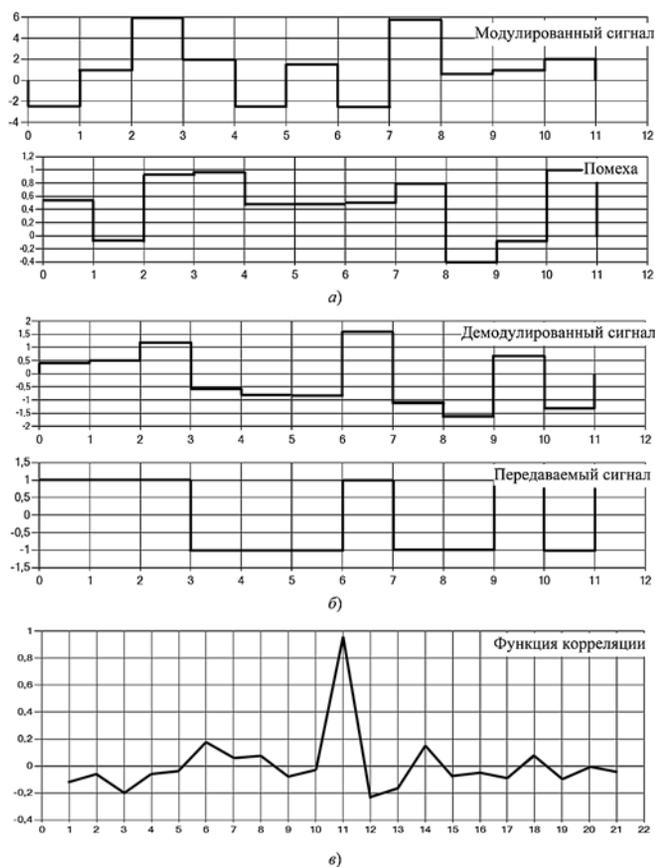


Рис. 3. Результаты моделирования для 11-элементного сигнала Баркера (отношение $s/p = 1$)

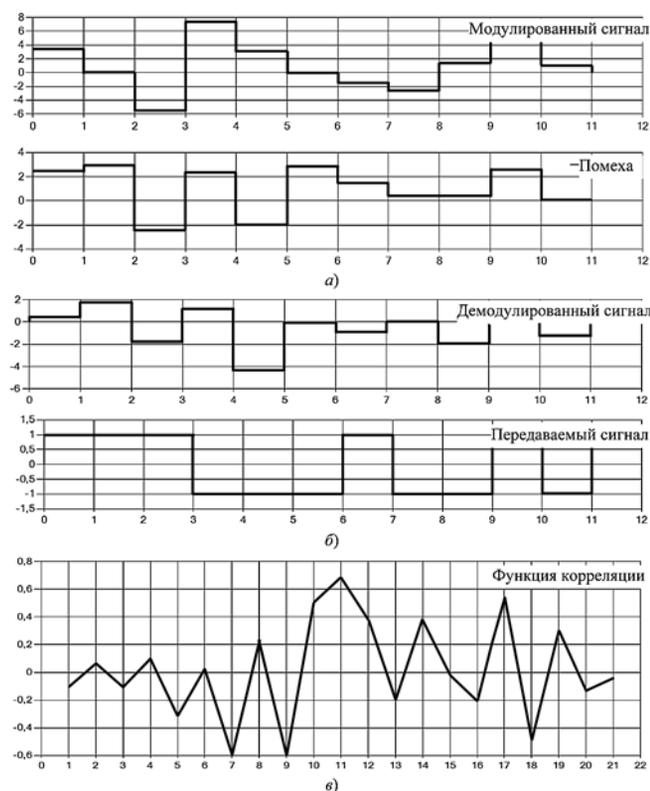


Рис. 4. Результаты моделирования для 11-элементного сигнала Баркера (отношение $s/p = 1/3$)

Увеличим помеху в 3 раза (рис. 4). Видим, что демодулированный сигнал сильно отличается от исходного, поэтому говорить о его надежном обнаружении не приходится.

Теперь проведем эксперимент с более сложным сигналом, например, с одним из найденных нами ранее — комбинационным сигналом Баркера 11—11, содержащим 121 разряд [9]. Видим (рис. 5), что алгоритм модуляции-демодуляции работает корректно, так как демодулированный сигнал в точности совпадает с переданным, что подтверждается значением ВКФ в пиковой точке, равным единице.

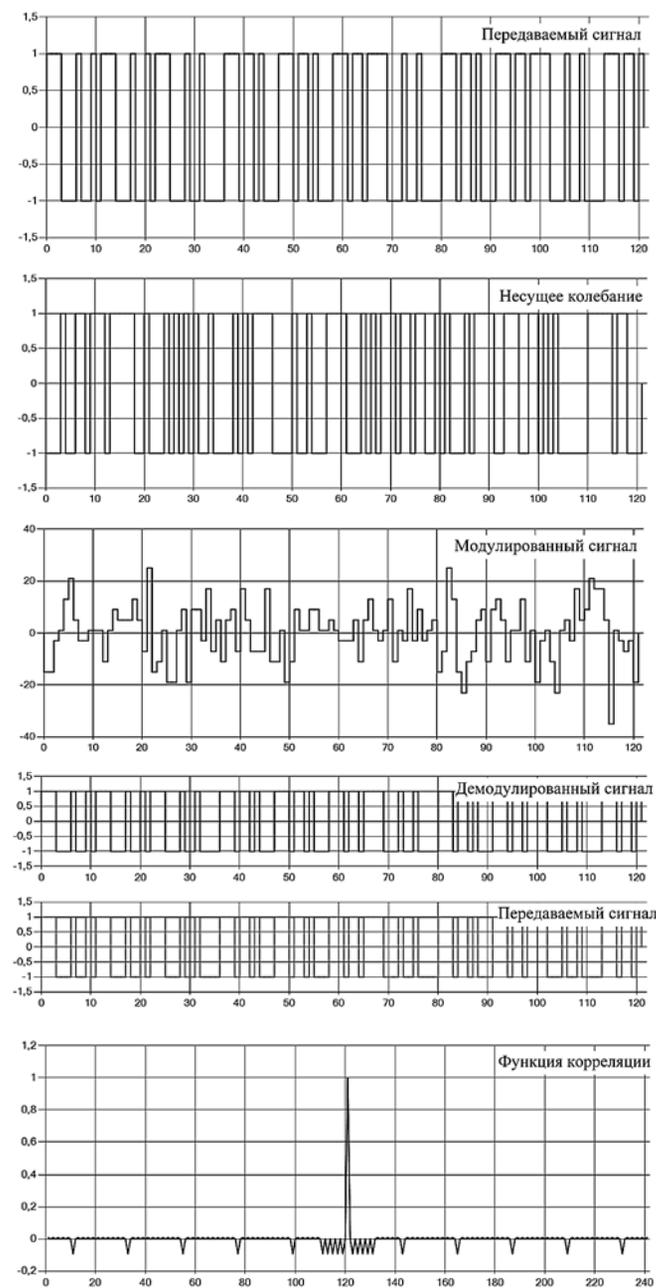


Рис. 5. Результаты моделирования для комбинационного сигнала Баркера 11—11

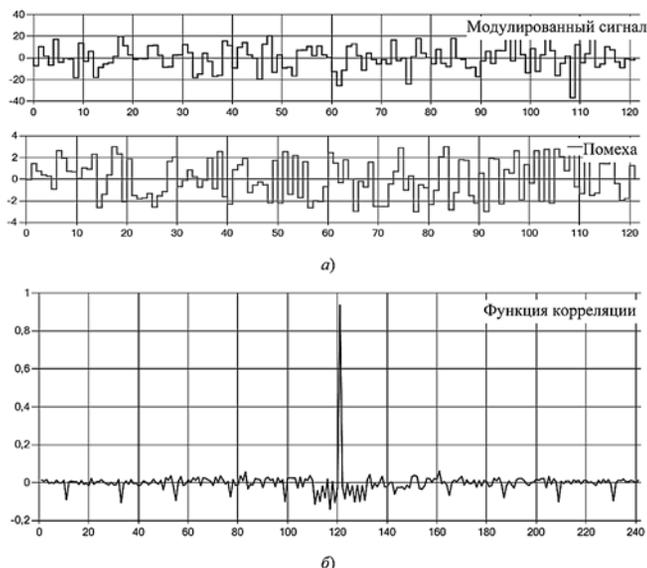


Рис. 6. Результаты моделирования для комбинированного сигнала Баркера 11—11 (отношение $c/p = 1/3$)

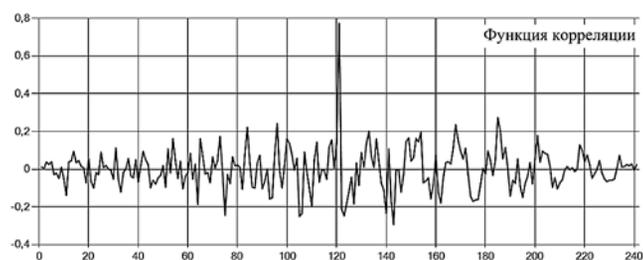


Рис. 7. Результаты моделирования для комбинированного сигнала Баркера 11—11 (отношение $c/p = 1/10$)

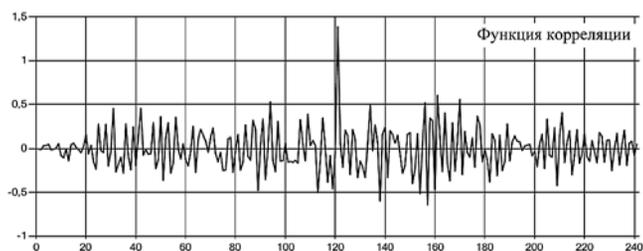


Рис. 8. Результаты моделирования для комбинированного сигнала Баркера 11—11 (отношение $c/p = 1/30$)

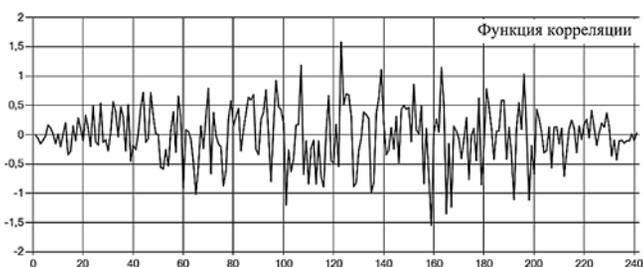


Рис. 9. Результаты моделирования для комбинированного сигнала Баркера 11—11 (отношение $c/p = 1/100$)

Добавим помеху, превышающую сигнал в 3 раза. На рис. 6, *а* показаны сигнал в канале и помеха; на рис. 6, *б* — ВКФ, вид которой говорит о хорошем сходстве переданного и принятого сигналов и возможности надежного обнаружения.

Добавим помеху, превышающую сигнал в 10 раз. На рис. 7 ВКФ имеет главный пик, позволяющий достаточно надежно обнаруживать сигнал.

На рис. 8 представлена ВКФ в случае, когда помеха превышает сигнал в 30 раз. Даже в этом случае можно говорить о высокой вероятности обнаружения.

И лишь помеха, в 100 раз превышающая сигнал, делает обнаружение ненадежным, поскольку главный пик ВКФ соизмерим с боковыми (рис. 9).

Заключение

Итак, применение ЛММ, в котором полезным сигналом является сложный шумоподобный сигнал с наилучшей автокорреляционной функцией (комбинированные сигналы Баркера), а в качестве несущего колебания используется сложное шумоподобное колебание, позволяет, несмотря на сложную помеховую обстановку, организовать надежный канал связи. Кроме того, работа "под шумами" делает такую связь секретной, поскольку сигнал в канале неотличим от помех и обнаружить сам факт сеанса связи трудно. И даже в случае перехвата сигнала злоумышленником осуществлять демодуляцию невозможно, так как для этого нужно знать несущее колебание, которое в данном случае можно рассматривать как ключ шифра.

ЛММ пригоден и для систем связи, и для систем управления. Некоторая небольшая задержка (равная длительности фрагмента сигнала), необходимая для его демодуляции, в большинстве случаев приемлема. Дальнейшие наши исследования направлены на проверку алгоритма для недвоичных сигналов.

Список литературы

1. **Голдман С.** Теория информации. М.: Изд. Иностранной литературы, 1957. 446 с.
2. **Харкевич А. А.** Теория информации. Опознавание образов / Избранные труды в 3 т. М.: Наука, 1973. Т. 3. 524 с.
3. **Самойлов А. И.** Выбор оптимального зондирующего сигнала // Геология и геофизика. 1982. № 7. С. 105—112.
4. **Ray K. J. and Wang B.** Cognitive Radio Networking and Security: A Game-Theoretic View. Cambridge University Press, 2010. 618 p.
5. **Охрименко В.** Широкополосная PLC-технология: проблемы и решения // Электронные компоненты. 2010. № 1. С. 43—49.
6. **Вольнская А. В., Сергеев Б. С.** Предпосылки применения псевдослучайных сигналов-переносчиков в каналах телемеханики железнодорожного транспорта // Транспорт: наука, техника, управление: Научный информационный сборник РАН ВИНТИ. 2011. Вып. 6. С. 39—41.
7. **Вольнская А. В.** Исследование способов адаптации сигналов к помехам в интеллектуальном канале телемеханики же-

лезнодорожного транспорта // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Труды XV Международной конф. Самара: Самарский научный центр РАН, 2013. С. 577—581.

8. **Вольнская А. В., Сапожников И. В.** Результаты компьютерного моделирования мультипараметрической модуляции // Проблемы управления и моделирования в сложных системах:

Труды XVI Международной конф. Самара: Самарский научный центр РАН, 2014. С. 540—548.

9. **Вольнская А. В.** Разработка устройств формирования и оптимальной обработки сложных двоичных сигналов для информационных систем железнодорожного транспорта // Информационные технологии. 2014. № 2. С. 65—70.

A. V. Volynskaya, Ph. D., Associate Professor, e-mail: anna-volinskaya@mail.ru,
The state educational institution of the higher vocational training
"Ural state university of railway transport" (URGUPS),
I. V. Sapozhnikov, Assistant Professor, fbjumper@mail.ru,
The state educational institution of the higher vocational training
"Ural technical institute of communication and informatics" (UrTISI)

Modelling of the Linear Multiparametrical Modem for Channels of Information Transfer with the Low Relation a Signal/Noise

Classical ways of modulation of signals are nonlinear procedures as are based on multiplication of the transmitted signal and the bearing fluctuation. Therefore the so-called threshold effect of a noise stability which consists that at decrease in the relation a signal/hindrance on a receiver entrance to some level close to unit, the relation the signal/hindrance at the exit falls is inherent in them, and communication becomes impossible. For example, in the CDMA standard the minimum relation a signal/hindrance — 6 dB.

If it is required to work at lower relations a signal/hindrance, it is expedient to apply the new type of modulation based on convolution of the transmitted signal from the noise-type bearing. As convolution is linear procedure, the threshold effect is absent that allows to work "under noise". Thus each value of a signal in a communication channel contains information on all transferred message in general, as defines a high noise stability. Besides, such type of communication is protected from interception of information as, first, we won't distinguish a useful signal from hindrances, and secondly, even at its interception it is impossible to carry out demodulation, without knowing the bearing fluctuation.

Results of modeling of a correctness of algorithm of modulation and assessment of its noise stability are given in article. Thus as the transmitted signals Barker's kanonic signals and new — the combined Barker's signals are used.

Modeling showed a correctness of procedures of modulation demodulation for enough difficult signals with base more than 100, and also the high noise stability allowing to work at the relations a signal/hindrance there are a lot of smaller unit.

Keywords: modulation, noise stability, convolution, binary signals, difficult noise-type signals, Barker's codes, computer modeling of a noise stability, correlation

References

1. **Goldman S.** *Teoriya informatsii* (Theory of information). M.: Izd. inostrannoi literatury, 1957. 443 p. (in Russian).
2. **Harkevich A. A.** *Teoriya informatsii. Opoznanie obrazov* (Theory of information. Identification of images). Izbrannye trudy v 3-h t. M.: Nauka, 1973. 524 p. (in Russian).
3. **Samoylov A. I.** Vyibor optimalnogo zondiruyushogo signala. *Geologiya i geofizika*. 1982, no. 7, pp. 105—112 (in Russian).
4. **Ray K. J. Liu and Wang B.** *Cognitive Radio Networking and Security: A Game-Theoretic View*. Cambridge University Press, 2010. 618 p.
5. **Ohrimenko V. S.** Hirokopolosnaya PLC-tehnologiya: problemy i resheniya. *Elektronnyie komponenti*, 2010, no. 1, pp. 43—49 (in Russian).
6. **Volynskaya A. V., Sergeev B. S.** Pregposylki primeneniya psevdosluchainykh signalov-perenoschikov v kanalah telemehaniki

zheleznodorozhnogo transporta. *Transport: nauka, tehnika, upravlenie — nauchnyi informatsionnyi sbornik RAN VINITI*. 2011, vyp. 6, pp. 39—41 (in Russian).

7. **Volynskaya A. V.** Issledovanie sposobov adaptatsii signalov k pomemham v intellektualnom kanale telemehaniki zheleznodorozhnogo transporta. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemah: Tr. XV Mezhdunarodnoy konf.*, Samara. 2013, pp. 577—581 (in Russian).

8. **Volynskaya A. V., Sapozhnikov I. V.** Rezultaty komputernogo modelirovaniya multiparametricheskoi modulyatsii. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemah: Tr. XVI Mezhdunarodnoy konf.*, Samara, 2014, pp. 540—548 (in Russian).

9. **Volynskaya A. V.** Razrabotka ustroystv formirovaniya i optimalnoi obrabotki slozhnykh dvoichnykh signalov dlya informatsionnykh sistem zheleznodorozhnogo transporta. *Informatsionnye tehnologii*. 2014, no. 2, pp. 65—70 (in Russian).