

Вовденко Михаил Константинович – e-mail: mikhail_vovdenko@rambler.ru; тел.: 89174439899; аспирант.

Губайдуллин Ирек Марсович – e-mail: irekmars@mail.ru; тел.: 89173405022; профессор кафедры «Технология нефти и газа»; д.ф.-м.н.; доцент; с.н.с.

Коледин Сергей Николаевич – e-mail: koledinsrg@gmail.com; тел.: 89872557811; доцент кафедры «Математика»; к.ф.-м.н.

Koledina Kamila Feliksovna – Institute of Petrochemistry and Catalysis, UFIC RAS; e-mail: koledinakamila@mail.ru; 71, pr. Oktyabrya, Ufa, Russia; phone: +79872557810; associate professor of math department; cand. of phis.-math. sc.; researcher.

Vovdenko Mikhail Kostantinovich – e-mail: mikhail_vovdenko@rambler.ru; phone: +79174439899; graduate student.

Gubaydullin Irek Marsovich – e-mail: irekmars@mail.ru; phone: +79173405022; professor of the petroleum and gas technology department; dr. of phis.-math. sc.; associate professor; senior researcher.

Koledin Sergey Nikolaevich – e-mail: koledinsrg@gmail.com; phone: +79872557811; associate professor of math department; cand. of phis.-math. sc.

УДК 621.396

DOI 10.23683/2311-3103-2018-8-163-173

Е.Е. Завтур, И.И. Маркович, А.И. Паньчев

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИЛЬТРА ПОДАВЛЕНИЯ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ ПРИ СОГЛАСОВАННОЙ ФИЛЬТРАЦИИ СИГНАЛОВ БАРКЕРА

Целью исследования является синтез дополнительного фильтра подавления боковых лепестков, обеспечивающего компромисс между ухудшением отношения сигнал-шум и уменьшением уровня боковых лепестков на выходе фильтра, согласованного с сигналами на основе кодов Баркера. Для достижения поставленной цели находятся коэффициенты фильтра подавления боковых лепестков и оценивается его эффективность. Цифровой фильтр подавления боковых лепестков синтезирован на основе решения оптимизационной задачи поиска условного максимума относительного значения главного лепестка выходного сигнала неоптимального фильтра при условии ограничения величины его боковых лепестков. Исследованы фильтры подавления боковых лепестков при согласованной фильтрации сигналов, сформированных на основе последовательностей Баркера различной длины. Получены количественные оценки величины подавления боковых лепестков и ухудшения отношения сигнал-шум на выходе синтезированного фильтра. Установлено, что максимальное подавление боковых лепестков достигается в случае пятиэлементного (11,65 дБ) и 13-элементного (11,7 дБ) кодов Баркера. Величина боковых лепестков в выходном сигнале при этом составляют минус 25,63 дБ и минус 33,98 дБ соответственно. Минимальный проигрыш в отношении сигнал-шум получен для сигналов на основе 11-элементного (1,56 дБ) и 13-элементного (0,73 дБ) кодов Баркера. Для сигнала с пятиэлементным кодом Баркера этот показатель составляет 1,75 дБ. Таким образом, оптимальное соотношение между степенью подавления боковых лепестков и ухудшением отношения сигнал-шум при обработке выходного сигнала согласованного фильтра дополнительным несогласованным фильтром достигается для сигналов 13-элементного кода Баркера. В тех случаях, когда наложены существенные ограничения на длительность выходного сигнала, предпочтительным является использование пятиэлементного кода Баркера.

Радиолокация; согласованный фильтр; код Баркера; подавление боковых лепестков.

E.E. Zavtur, I.I. Markovich, A.I. Panychev

**EVALUATION OF THE SIDELobe SUPPRESSION FILTER
EFFECTIVENESS IN THE CONDITION OF THE BARKER SIGNALS
MATCHED FILTERING**

The aim of the study is the synthesis of an additional filter for suppressing side lobes, providing the best compromise between the SNR decreasing and reduction of the sidelobe level at the filter output, consistent with the signals based on the Barker codes. To achieve this goal, it is necessary to find the coefficients of the filter for sidelobe suppression and evaluate its effectiveness. The digital sidelobe suppression filter is synthesized on the basis of solving the optimization problem of searching the relative value conditional maximum in the main lobe of the output signal in a non-optimal filter under the condition of limiting the value of its sidelobes. Sidelobe suppression filters are investigated for matched filtering of signals formed on the basis of Barker sequences of different lengths. In all cases, the minimum possible length of the side lobes suppression filter pulse characteristic has been chosen, which is equal to the number of reports in the matched filter output. Quantitative estimates of the side lobes suppression and the accompanying SNR decreasing at the output of the synthesized filter for signals based on different Barker codes are obtained. It is established that the maximum suppression of sidelobe is achieved in the case of 5-element (11.65 dB) and 13-element (11.7 dB) Barker codes. The value of the side lobes in the output signal are minus 25,63 dB and minus 33,98 dB respectively. The minimum loss in SNR is obtained for signals based on 11-element (1.56 dB) and 13-element (0.73 dB) Barker codes. For a signal with a 5-element Barker code, this value is 1.75 dB. Thus, for 13-element Barker code signals the optimal ratio between the degree of sidelobe suppression and SNR decreasing in the processing of the matched filter output by an additional non matched filter is achieved. In cases where significant restrictions are imposed on the duration of the output signal, the use of a 5-element Barker code is preferred.

Radar; matched filter; Barker code; side lobe suppression.

Введение. Известно широкое применение в современных радиолокационных комплексах различного назначения суперкомпьютеров, позволяющих решать самые сложные задачи цифровой обработки сигналов с высокой точностью в реальном масштабе времени. Традиционным вариантом использования суперкомпьютерных технологий является реализация с их помощью оптимальных фильтров, которые формируют на выходе взаимную корреляционную функцию зондирующего сигнала и принятого эхосигнала и тем самым максимизируют отношение сигнал-шум (ОСШ) в пике выходного сигнала.

В радиолокации достаточно широко используются сигналы на основе кодов Баркера, представляющие собой двоичные последовательности конечной длины [1]. Сжатие откликов таких сигналов посредством согласованной фильтрации позволяет воспользоваться их основными преимуществами: высокой разрешающей способностью по дальности при обеспечении большой дальности обнаружения и простой технической реализации устройств обработки.

Однако в тех случаях, когда сигнал принимается на фоне достаточно сильных шумов или в приемном тракте радиолокационной станции одновременно присутствует отклики от нескольких целей существенно различных уровней, достоверность обнаружения, сопровождения, разрешения и измерения параметров выбранной цели недопустимо снижается. Это происходит вследствие ложного определения бокового лепестка (БЛ) как самостоятельного отраженного сигнала или, наоборот, маскирования полезного сигнала низкого уровня боковыми лепестками более мощного отклика [2].

В научной литературе вопросам снижения уровня боковых лепестков (УБЛ) в отклике сложного дискретного радиолокационного сигнала посвящено достаточно много исследований. Некоторые результаты изложены, например, в работах [3–18].

Один из путей решения проблемы предусматривает использование неоптимального фильтра с длиной импульсной характеристики, большей длительности обрабатываемого сигнала.

Другой способ предполагает применение последовательного соединения согласованного фильтра (СФ) для сжатия сложного сигнала и дополнительного фильтра для подавления боковых лепестков в отклике СФ.

Постановка задачи. Целью исследования является синтез дополнительного фильтра подавления боковых лепестков (ФПБЛ), обеспечивающего уменьшение УБЛ отклика фильтра, согласованного с сигналами на основе кодов Баркера.

Для достижения поставленной цели необходимо найти коэффициенты ФПБЛ и оценить эффективность его использования.

Анализ проблемы. Из теории оптимальной фильтрации известно, что УБЛ сжатой СФ двоичной последовательности на основе кодов Баркера является постоянным и имеет значение $1/N$, где N – количество элементов кода Баркера [2].

Эффективным способом подавления боковых лепестков является использование специальных, несогласованных, фильтров [9]. Синтез ФПБЛ может проводиться различными методами. Один из распространенных приемов – использование эвристических (генетических) алгоритмов для расчета коэффициентов ФПБЛ [19–21]. Альтернативным методом является отыскание коэффициентов ФПБЛ путем решения оптимизационной задачи, в рамках которой производится поиск условного максимума относительного значения главного лепестка выходного сигнала ФПБЛ при ограничениях на величину его боковых лепестков.

Метод решения. Для подавления БЛ используем несогласованный фильтр – ФПБЛ. Степень подавления БЛ возрастает с увеличением длины импульсной характеристики ФПБЛ. При этом уменьшение УБЛ отклика СФ сопровождается незначительным расширением главного лепестка и увеличением области БЛ выходного сигнала, т.е. сигнал становится длиннее сигнала на выходе СФ.

Рассмотрим алгоритм синтеза коэффициентов ФПБЛ на основе решения оптимизационной задачи поиска условного экстремума, сущность которого заключается в том, что отыскивается максимальное значение главного лепестка выходного сигнала при условии ограничения величины его БЛ [22]. Ограничения на другие параметры выходного сигнала ФПБЛ не накладываются.

Такая задача относится к классу задач линейного программирования и формулируется следующим образом. Необходимо экстремизировать (обратить в максимум) форму

$$z_m = L_m(b_1, \dots, b_K) \rightarrow \max \quad (1)$$

при ограничениях

$$|z_j = L_j(b_1, \dots, b_K)| \leq 1, j = 1, \dots, M; j \neq m, \quad (2)$$

где z_j – отсчеты сигнала на выходе ФПБЛ;

m – номер максимального отсчета выходного сигнала ФПБЛ;

L_j – линейные формы от неизвестных переменных b_1, \dots, b_K ;

b_1, \dots, b_K – искомые коэффициенты синтезируемого фильтра;

K – длина импульсной характеристики синтезируемого ФПБЛ;

$M = N + K - 1$ – количество отсчетов выходного сигнала ФПБЛ;

N – количество отсчетов выходного сигнала СФ.

Ограничения (2) соответствуют критерию синтеза фильтра по минимуму УБЛ его выходного сигнала и задают нормировку его коэффициентов

$$\mu = \frac{\max\{|z_1|, \dots, |z_M|\}}{|z_m|},$$

где $|z_m|$ – модуль главного лепестка выходного сигнала ФПБЛ.

Целевая функция (1) и ограничения (2) формируются на основе соотношений [22]

$$z_j = \begin{cases} \sum_{i=1}^j y_i b_{j-i+1}, & 1 \leq j \leq N, \\ \sum_{i=1}^N y_i b_{j-i+1}, & N < j \leq K, \\ \sum_{i=1+j-K}^N y_i b_{j-i+1}, & K < j \leq M. \end{cases} \quad (3)$$

где y_i – отсчеты выходного сигнала СФ ($i = 1, 2, \dots, N$).

Таким образом, определение коэффициентов ФПБЛ заключается в решении задачи линейного программирования, формируемой выражениями (1)–(3).

Подавление БЛ отклика СФ в ФПБЛ сопровождается проигрышем в ОСШ в максимуме выходного сигнала ФПБЛ. Его величину можно оценить, используя выражение [22]

$$\rho^2 = \frac{z_m^2}{\sum_{n=1}^N y_n^2 \sum_{k=1}^K b_k^2}.$$

Параметр ρ^2 не превышает единицу и показывает, насколько отличается ОСШ на выходе ФПБЛ относительно выхода СФ.

Обсуждение результатов. Выполним синтез ФПБЛ по описанному выше алгоритму для обработки сигнала, сформированного по правилу пятиэлементного кода Баркера $\{1; 1; 1; -1; 1\}$ (рис. 1).

После согласованной фильтрации получена последовательность длиной $N = 9$ с УБЛ, равным $\frac{1}{5}$, что составляет минус 13,98 дБ (рис. 1).

Для уменьшения УБЛ выполним обработку выходной последовательности СФ с помощью ФПБЛ. Для этого выберем длину фильтра $K = N = 9$ и найдем его коэффициенты методом поиска условного экстремума, решив соответствующую оптимизационную задачу линейного программирования (1)–(3). Решением является набор коэффициентов ФПБЛ:

$$b = \{-0,555556; 0; -0,444444; 0; 4,222222; 0; -0,444444; 0; -0,555556\}.$$

Используя эти коэффициенты в ФПБЛ, получим на его выходе последовательность длиной $M = 17$ (рис. 1) с УБЛ, равным $\frac{1}{19,11}$, что составляет минус

25,63 дБ.

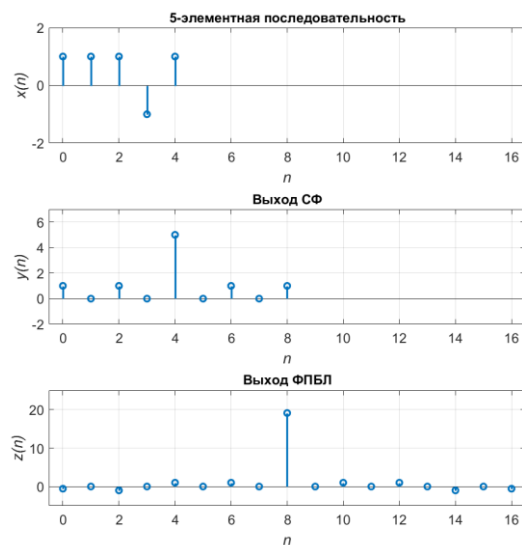


Рис. 1. Пятиэлементная последовательность Баркера и выходные сигналы СФ и ФПБЛ

Таким образом, в случае сигнала с пятиэлементным кодом Баркера применение синтезированного ФПБЛ после СФ позволило уменьшить значение УБЛ в 3,82 раза (на 11,65 дБ). Проигрыш в ОСШ по мощности составляет $\rho^2 \approx 0,67$, или минус 1,75 дБ.

Рассмотрим сигнал, сформированный по правилу семиэлементного кода Баркера $\{1; 1; 1; -1; -1; 1; -1\}$ (рис. 2). После оптимальной фильтрации получена последовательность длиной $N = 13$ с теоретически достижимым значением ОСШ и уровнем боковых лепестков $\frac{1}{7}$, что составляет минус 16,9 дБ.

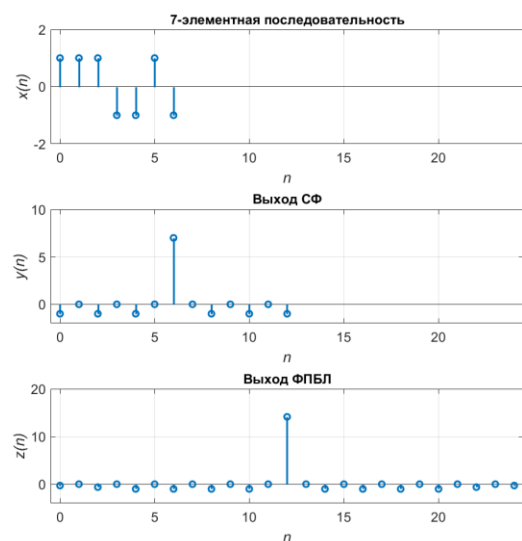


Рис. 2. Семиэлементная последовательность Баркера и выходные сигналы СФ и ФПБЛ

Для уменьшения УБЛ выполним обработку выходной последовательности СФ фильтром подавления боковых лепестков. Выберем фильтр длиной $K = N = 13$ и синтезируем коэффициенты этого ФПБЛ методом поиска условного экстремума. Для этого составим и решим соответствующую оптимизационную задачу линейного программирования (1)–(3). Решением является вектор коэффициентов ФПБЛ:

$$b = \{0,28795812; 0; 0,33507853; 0; 0,37696335; 0; 2,30367323; 0; 0,37696335; 0; 0,33507853; 0; 0,28795812\}.$$

Используя эти коэффициенты в ФПБЛ, получим на его выходе 25-элементную последовательность длиной $M = 25$ (рис. 2) с наибольшим уровнем боковых лепестков $\frac{1}{14,13}$, что составляет минус 23,0 дБ.

Таким образом, применение для сигнала с семиэлементным кодом Баркера после СФ синтезированного ФПБЛ позволило уменьшить значение УБЛ в 2,02 раза (на 6,1 дБ), ОСШ по мощности при этом уменьшилось до $\rho^2 \approx 0,61$ (на 2,17 дБ) относительно выхода СФ.

Аналогичный синтез ФПБЛ был выполнен для сигналов на основе других последовательностей Баркера. Для иллюстрации полученных результатов на рис. 3 представлена 13-элементная последовательность Баркера и выходные сигналы СФ и ФПБЛ при ее обработке.

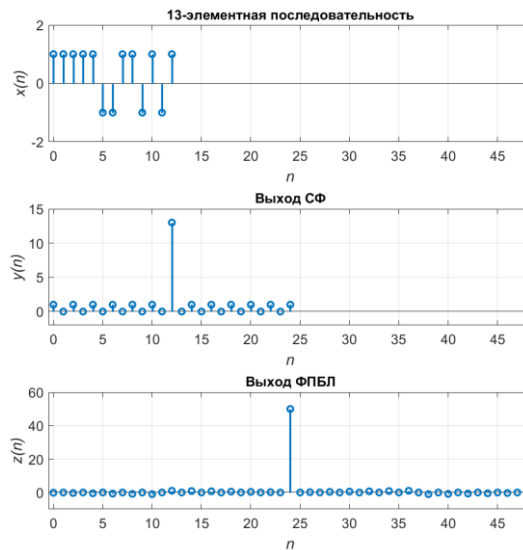


Рис. 3. 13-элементная последовательность Баркера и выходные сигналы СФ и ФПБЛ

Параметры выходных сигналов СФ и ФПБЛ для всех исследованных последовательностей Баркера, а также оценки эффективности подавления БЛ взаимных корреляционных функций этих сигналов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры выходных сигналов СФ и ФПБЛ при различных кодирующих последовательностях Баркера

Длина кодирующей последовательности Баркера	УБЛ на выходе СФ, дБ	УБЛ на выходе ФПБЛ, дБ	Подавление БЛ в ФПБЛ, дБ	Проигрыш в ОСШ, дБ
3	-9,54	-20,0	10,46	2,97
4	-12,04	-20,22	8,18	2,97
5	-13,98	-25,63	11,65	1,75
7	-16,9	-23,0	6,1	2,17
11	-20,83	-24,03	4,8	1,56
13	-22,28	-33,98	11,7	0,73

Данные табл. 1 иллюстрируются зависимостями УБЛ на выходе СФ и ФПБЛ (рис. 4) и потерь в ОСШ (рис. 5) от длины кодирующих последовательностей Баркера.

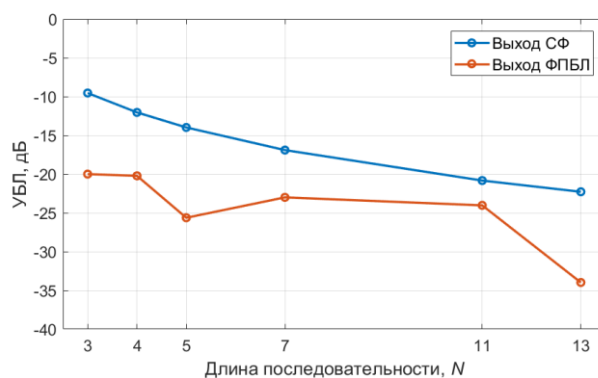


Рис. 4. Зависимость УБЛ на выходе СФ и ФПБЛ от длины кодирующих последовательностей Баркера

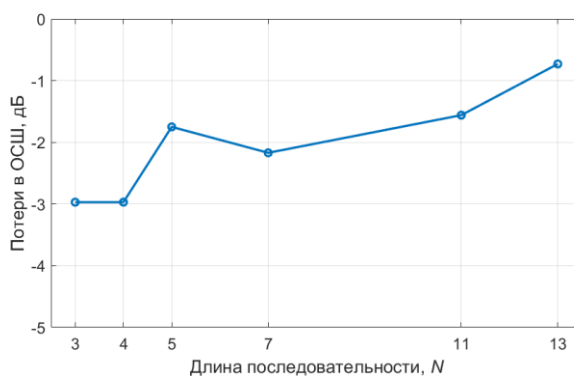


Рис. 5. Зависимость потерь в ОСШ на выходе ФПБЛ от длины кодирующих последовательностей Баркера

Таким образом, применение ФПБЛ после СФ для сигналов на основе кодов Баркера позволяет существенно (в разы) уменьшить УБЛ при ухудшении ОСШ менее 3 дБ. Максимальное подавление боковых лепестков достигается в случае

пятиэлементного (11,65 дБ) и 13-элементного (11,7 дБ) кодов Баркера. Величина боковых лепестков в выходном сигнале и его длительность при этом составляют минус 25,63 дБ, 17 отсчетов и минус 33,98 дБ, 49 отсчетов, соответственно. Минимальный проигрыш в отношении сигнал-шум получен для сигналов на основе 11-элементного (1,56 дБ) и 13-элементного (0,73 дБ) кодов Баркера., для сигнала с пятиэлементным кодом Баркера этот показатель составляет 1,75 дБ.

Заключение. Основными результатами работы являются следующие:

1. Путем решения оптимизационной задачи поиска условного экстремума синтезирован ФПБЛ отклика СФ для нескольких сигналов на основе кодов Баркера.

2. Количественно оценено подавление боковых лепестков и потери в ОСШ. Наибольшее подавление в ФПБЛ достигается для сигналов на основе 13-элементного кода Баркера и составляет 11,7 дБ при потерях в ОСШ 0,73 дБ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т. 1. РЛС – информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов / под ред. А.И. Канащенкова, В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2006. – 656 с.
2. Дудник П.И., Кондратенков Г.С., Татарский Б.Г., Ильчук А.Р., Герасимов А.А. Авиационные радиолокационные комплексы и системы: учебник для слушателей и курсантов ВУЗов ВВС / под ред. П.И. Дудника. – М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2006. – 1112 с.
3. *Enrique Garcia, José A. Paredes, Fernando J. Álvarez.* Spreading sequences in active sensing // *Signal Processing.* – 2015. – Vol. 106. – P. 88-105.
4. *Carroll J. Nunn, Gregory E. Coxson.* Best-Known Autocorrelation Peak Sidelobe Levels for Binary Codes of Length 71 to 105 // *International Workshop on Coding and Cryptography.* 2013. April 15–19.
5. *Matthew A. Ferrara,* Near-Optimal Peak Sidelobe Binary Codes // *IEEE Department of Mathematical Sciences Rensselaer Polytechnic Institute Troy, New York 12180.* 2006. – P. 400-403.
6. *Leukhin A.N., Potehin E.N.* Binary Sequences with Minimum Peak Side-lobe Level up to Length 68 // *International Workshop on Coding and Cryptography.* 2013. April 15–19.
7. *NagaJyothi A., Raja Rajeswari K.* Cross-correlation of Barker code and Long binary signals // *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST).* – 2011. – Vol. 3.
8. *Li, Lihua, Coon, Michael, McLinden, Matthew,* Radar Range Sidelobe Reduction Using Adaptive Pulse Compression Technique // *NASA Tech Briefs.* 2013. October.
9. Кравченко Д.Н. Методы повышения разрешающей способности по дальности вертолетной РЛС // *Радиолокационные системы специального и гражданского назначения.* 2010–2012 / под ред. Ю.И. Белого. – М.: Радиотехника, 2011. – С. 395-402.
10. *Jaber Ismail M.* Sidelobe-Suppression Technique Applied To Binary Phase Barker Codes // *Journal of Engineering and Development.* – Vol. 16, No. 4. – P. 330-336.
11. *Kiranmai B., Rajesh Kumar P.* Performance Evaluation of Barker Codes using New Pulse Compression Technique // *International Journal of Computer Applications.* – Vol. 107, No. 20. – P. 24-27.
12. *Nuthalapati R.M.* Design of mismatched filters for long binary codes // *RadarCon 2008 May 26–30, 2008, Rome Italy.* 2008 *IEEE Proc.* – P. 54-59.
13. Бабур Г.П., Хлусов В.А. Подавление боковых лепестков отклика согласованного матричного фильтра РЛС, производящей «моноимпульсную» совместную оценку координат и матрицы рассеяния объектов // *Научный вестник МГТУ ГА. Сер.: Радиофизика и радиотехника.* – 2005. – № 93. – С. 131-140.
14. Мальцев Г.Н., Сакулин Е.А. Ускоренный поиск широкополосных фазоманипулированных сигналов по задержке с использованием фильтра подавления боковых лепестков автокорреляционной функции // *Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике: Материалы IV Всероссийской научной конференции.* – 2013. – С. 114-118.

15. Пат. 2335782 Российская Федерация, МПК G01S 7/36. Способ подавления боковых лепестков автокорреляционной функции широкополосного сигнала / Компаниец Ю.И., Кривченков Д.Н.; заявитель и патентообладатель Государственный Рязанский приборный завод. – № 2007106099/09, заявл. 20.02.2007; опубл. 10.10.2008. Бюл. 28. – 11 с.
16. Пат. 2 503 971 Российская Федерация, МПК G01S 7/36. Способ подавления боковых лепестков автокорреляционной функции широкополосного сигнала / Кривченков Д.Н., Компаниец Ю.И., Костромичев В.Д., Вакарева З.И.; заявитель и патентообладатель Государственный Рязанский приборный завод. – № 2012123183/07, заявл. 05.06.2012; опубл. 10.01.2014. Бюл. № 1. – 10 с.
17. Калениченко С.П., Сокольников В.А. Обработка радиолокационных сигналов в цифровых фильтрах с подавлением боковых лепестков функции отклика // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2009. – Вып. 2. – С. 69-75.
18. Полезная модель к пат. 110502 Российская Федерация, МПК G01S 7/292. Фильтр подавления боковых лепестков сложного радиолокационного сигнала / Калениченко С.П., Сокольников В.А.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). – № 2011113797/07, заявл. 08.04.2011; опубл. 20.11.2011. Бюл. № 32. – 13 с.
19. Yilmaz KAYA, Murat UYAR, Ramazan TEKDN. A Novel Crossover Operator for Genetic Algorithms: Ring Crossover // Computing Research Repository Journal. – 2011. – Vol. abs/1105.0.
20. Abuiziah I., Shakarneh N., A Review of Genetic Algorithm Optimization: Operations and Applications to Water Pipeline Systems // International Journal of Mathematical, Computational, Physical and Quantum Engineering. – 2013. – Vol. 7, No. 12. – P. 1262-1268.
21. Hesam G., Mohammad M. P., Optimization of Matched and Mismatched Filters in Short Range Pulse Radars using Genetic Algorithm // International Journal Image. Graphic and Signal processing (IJIGSP). – 2016. – Vol. 8, No. 5.
22. Амиантов И.Н. Избранные вопросы статистической теории связи – М.: Сов. радио, 1971. – 416 с.

REFERENCES

1. Radiolokatsionnye sistemy mnogofunktsional'nykh samoletov. T. 1. RLS – informatsionnaya osnova boevykh deystviy mnogofunktsional'nykh samoletov. Sistemy i algoritmy pervichnoy obrabotki radiolokatsionnykh signalov [Radar systems of multifunctional aircraft. Vol.1. Radar-the information basis of the fighting multifunctional aircraft. Systems and algorithms for primary processing of radar signals], ed. by A.I. Kanashchenkova, V.I. Merkulova. Moscow: Radiotekhnika, 2006, 656 p.
2. Dudnik P.I., Kondratenkov G.S., Tatarskiy B.G., Il'chuk A.R., Gerasimov A.A. Aviatsonnye radiolokatsionnye komplekсы i sistemy: uchebnik dlya slushateley i kursantov VUZov VVS [Aviation radar systems and systems: textbook for students and cadets of air force Universities], ed. by P.I. Dudnika. Moscow: Izd-vo VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 2006, 1112 p.
3. Enrique Garcia, José A. Paredes, Fernando J. Álvarez. Spreading sequences in active sensing, *Signal Processing*, 2015, Vol. 106, pp. 88-105.
4. Carroll J. Nunn, Gregory E. Coxson. Best-Known Autocorrelation Peak Sidelobe Levels for Binary Codes of Length 71 to 105, *International Workshop on Coding and Cryptography. 2013. April 15–19*.
5. Matthew A. Ferrara, Near-Optimal Peak Sidelobe Binary Codes, *IEEE Department of Mathematical Sciences Rensselaer Polytechnic Institute Troy, New York 12180. 2006*, pp. 400-403.
6. Leukhin A.N., Potehin E.N. Binary Sequences with Minimum Peak Side-lobe Level up to Length 68, *International Workshop on Coding and Cryptography. 2013. April 15–19*.
7. NagaJyothi A., Raja Rajeswari K. Cross-correlation of Barker code and Long binary signals // *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*. – 2011. – Vol. 3.
8. Li, Lihua, Coon, Michael, McLinden, Matthew, Radar Range Sidelobe Reduction Using Adaptive Pulse Compression Technique, *NASA Tech Briefs. 2013. October*.
9. Kravchenkov D.N. Metody povysheniya razreshayushchey sposobnosti po dal'nosti vertoletnoy RLS [Methods of increasing the resolution of the range of the helicopter radar], *Radiolokatsionnye sistemy spetsial'nogo i grazhdanskogo naznacheniya. 2010–2012* [Radar systems for special and civil purposes. 2010-2012], ed. by Yu.I. Belogo. Moscow: Radiotekhnika, 2011, pp. 395-402.

10. *Jaber Ismail M.* Sidelobe-Suppression Technique Applied To Binary Phase Barker Codes, *Journal of Engineering and Development*, Vol. 16, No. 4, pp. 330-336.
11. *Kiranmai B., Rajesh Kumar P.* Performance Evaluation of Barker Codes using New Pulse Compression Technique, *International Journal of Computer Applications*, Vol. 107, No. 20, pp. 24-27.
12. *Nuthalapati R.M.* Design of mismatched filters for long binary codes, *RadarCon 2008 May 26–30, 2008, Rome Italy. 2008 IEEE Proc.*, pp. 54-59.
13. *Babur G.P., Khlusov V.A.* Podavlenie bokovykh lepestkov otklika soglasovannogo matrichnogo fil'tra RLS, proizvodnyashchey «monoimpul'snuyu» sovmestnuyu otsenku koordinat i matritsy rasseyaniya ob'ektov [Suppression of lateral lobes of the response of the coordinated matrix radar filter, producing a "monopulse" joint assessment of the coordinates and scattering matrix of objects], *Nauchnyy vestnik MGTU GA. Ser. Radiofizika i radiotekhnika* [Scientific Bulletin of MSTU GA. Series: radio Physics and radio engineering], 2005, No. 93, pp. 131-140.
14. *Mal'tsev G.N., Sakulin E.A.* Uskorennyy poisk shirokopolosnykh fazomanipulirovannykh signalov po zaderzhke s ispol'zovaniem fil'tra podavleniya bokovykh lepestkov avtokorrelatsionnoy funktsii [Accelerated search for wideband phase-manipulated signals by delay using the side lobe suppression filter of the autocorrelation function], *Sverkhshirokopolosnye signaly v radiolokatsii, svyazi i akustike: Materialy IV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii* [Ultra-wideband signals in radar, communication and acoustics: Proceedings of the IV all-Russian scientific conference], 2013, pp. 114-118.
15. *Kompaniets Yu.I., Krivchenkov D.N.* Sposob podavleniya bokovykh lepestkov avtokorrelatsionnoy funktsii shirokopolosnogo signala [A method of suppressing side lobes of the autocorrelation function of the wideband signal]. Patent 2335782 RF, MPK G01S 7/36; the applicant and the patent holder of the Ryazan state instrument plant. No. 2007106099/09; declared 20.02.2007; published 10.10.2008. Bul. 28, 11 p.
16. *Krivchenkov D.N., Kompaniets YU.I., Kostromichev V.D., Vakareva Z.I.* Sposob podavleniya bokovykh lepestkov avtokorrelatsionnoy funktsii shirokopolosnogo signala [A method of suppressing side lobes of the autocorrelation function of the wideband signal]. Patent 2 503 971 RF, MPK G01S 7/36; the applicant and the patent holder of the Ryazan state instrument plant. No. 2012123183/07, declared 05.06.2012; published 10.01.2014. Bul. No. 1, 10 p.
17. *Kalenichenko S.P., Sokol'nikov V.A.* Obrabotka radiolokatsionnykh signalov v tsifrovyykh fil'trakh s podavleniem bokovykh lepestkov funktsii otklika [Processing of radar signals in digital filters with side lobe suppression], *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika* [News of Russian universities. Radionics], 2009, Issue 2, pp. 69-75.
18. *Kalenichenko S.P., Sokol'nikov V.A.* Fil'tr podavleniya bokovykh lepestkov slozhnogo radiolokatsionnogo signala [The filter of suppression of lateral petals of a complex radar signal]. Utility model to patent 110502 RF, MPK G01S 7/292; applicant and patent holder Saint-Petersburg state electrotechnical University "LETI". V.I. Ulyanov (Lenin). No. 2011113797/07; declared 08.04.2011; published 20.11.2011. Bul. No. 32, 13 p.
19. *Yilmaz KAYA, Murat UYAR, Ramazan TEKDN.* A Novel Crossover Operator for Genetic Algorithms: Ring Crossover, *Computing Research Repository Journal*, 2011, Vol. abs/1105.0.
20. *Abuiziah I., Shakarneh N.*, A Review of Genetic Algorithm Optimization: Operations and Applications to Water Pipeline Systems, *International Journal of Mathematical, Computational, Physical and Quantum Engineering*, 2013, Vol. 7, No. 12, pp. 1262-1268.
21. *Hesam G., Mohammad M.P.*, Optimization of Matched and Mismatched Filters in Short Range Pulse Radars using Genetic Algorithm, *International Journal Image. Graphic and Signal processing (IJIGSP)*, 2016, Vol. 8, No. 5.
22. *Amiantov I.N.* Izbrannye voprosy statisticheskoy teorii svyazi [Selected questions of statistical theory of communication]. Moscow: Sov. radio, 1971, 416 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Р. Ильчук.

Завтур Евгений Евгеньевич – Научно-конструкторское бюро цифровой обработки сигналов Южного федерального университета; e-mail: zavtur90@mail.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: +78634393-075; конструктор 1-ой кат.

Маркович Игорь Ильич – e-mail: marko@sfedu.ru; тел.: +78634394055; к.т.н.; с.н.с., директор – главный конструктор.

Паньчев Андрей Иванович – Южный федеральный университет, e-mail: aipanychev@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

Zavtur Evgeny Evgenevich – Research and Design Bureau of Digital Signal Processing Southern Federal University; e-mail: zavtur90@mail.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634393075; designer of the 1st category.

Markovich Igor I'ich – e-mail: marko@sfedu.ru; phone: +78634394055; cand. of eng. sc.; senior fellow; director – chief designer.

Panychev Andrey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: aipanychev@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; the department of antennas and radio transmitters; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 004.067

DOI 10.23683/2311-3103-2018-8-173-181

Ю.А. Брюхомицкий, В.М. Федоров

МЕТОД ТЕКСТОНЕЗАВИСИМОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ ПО ГОЛОСУ

Предлагается иммунологический метод решения задачи текстонезависимой идентификации личности по голосу, основанный на принципах представления и обработки речевой информации, принятых в искусственных иммунных системах. Для идентификации личности по голосу используется модель Фанта, в которой, речевой сигнал образуется путем прохождения через фильтр высокого порядка. В качестве векторов признаков используются кепстральные коэффициенты, полученные на основе линейного предсказателя речи. Последующий анализ векторов признаков осуществляется на основе аппарата искусственных иммунных систем с использованием иммунологической модели отрицательного отбора. Модель реализует децентрализованное распознавание последовательно идущих фрагментов речи, путем их сопоставления со специальными, предварительно созданными распознающими элементами – детекторами, имитирующими иммунокомпетентные клетки иммунной системы. Сопоставление осуществляется с использованием меры близости Евклида по принципу негативной селекции. Принятие решения «свой»-«чужой» при анализе речевого сигнала реализуется на основе статистического подхода по частоте срабатывания детекторов. Метод прошел экспериментальную проверку в среде MATLAB, которая показала его работоспособность и эффективность. Метод предназначен для непрерывного аутентификационного контроля личности говорящего в темпе поступления голосовых данных при воспроизведении текста произвольного объема и содержания, что позволяет своевременно принимать решение о возможной подмене дикторов. Преимуществом метода является его полная защищенность от атак воспроизведения. Эффективная реализация метода, повышение его точности тесно связаны с возможностью организации параллельных вычислений больших объемов данных, обусловленных размерами анализируемых текстов и размерами популяции детекторов. Это обстоятельство обуславливает перспективу применения многопроцессорных вычислительных систем высокой производительности.

Текстонезависимая идентификация личности по голосу; кепстральный анализ; линейный предсказатель речевого сигнала; искусственные иммунные системы; модель отрицательного отбора.