

# ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ И СПЕЦИАЛЬНЫХ НЕСОГЛАСОВАННЫХ v-ФИЛЬТРОВ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ШУМОВ БФМ СИГНАЛОВ

Лозовой А.В.<sup>+</sup>, Мельников Б.Ф.<sup>++</sup>, Радионов А.Н.<sup>+++</sup>

<sup>+</sup> Московский энергетический институт, каф. радиотехнических приборов

<sup>++</sup> Ульяновский государственный университет, каф. прикладной математики

<sup>+++</sup> Ульяновский государственный университет, каф. информационных систем

Известно, что несмотря на равномерный характер побочных максимумов, *Автокорреляционные Функции (АКФ) Бинарных Фазоманипулированных Сигналов (БФМС)* не обладают достаточно низким уровнем *корреляционных шумов (КШ)*. Известные методы [6,7,8,9,10,11] подавления (фильтрации) КШ могут дать наиболее хорошие результаты, только при использовании БФМС оптимальных (ОБФМС) или максимально приближенных к оптимальным (квазиоптимальных- КоБФМС). Критерием оптимальности является минимальное значение функции (обозначим ее как  $v(s)$ ), определяющей относительный уровень побочных максимумов АКФ сигнала или ВКФ (*ВзаимоКорреляционной Функции*) сигнала и фильтра. В данной статье рассматривается возможность применения специальных v-фильтров (термин впервые введен в работе[6]) к квазиоптимальным БФМС, полученным с помощью генетических алгоритмов. Для задачи синтеза ОБФМС, как известно, не существует методов решения, отличных от прямого переборного (который приводит к т. н. комбинаторному взрыву - экспоненциальной зависимости времени решения задачи от размерности), поэтому в реальных условиях для размерностей 30 и более, применяются только различные эвристические алгоритмы (некоторые из них описаны в [1]). Эти алгоритмы дают решения, близкие к оптимальным. Описанные в данной статье генетические алгоритмы для ряда размерностей БФМС позволяют находить бинарные последовательности, значения которых отличаются от оптимальных менее чем на 0.1%, и при этом, время работы генетических алгоритмов полиномиально, например, при размерности (длине) искомого КоБФМС 100 и более- составляет менее  $10^{-9}$  от полного времени работы прямого переборного алгоритма. Кроме того, для некоторых размерностей, описываемые генетические алгоритмы по аналогичным критериям (т.е., время работы и степень отклонения получаемого решения от оптимального) дают результаты, превосходящие результаты всех других алгоритмов, известных авторам. Совместное применение генетических алгоритмов для нахождения КоБФМС и v-фильтров (метод синтеза которых приводится ниже), дает новое эффективное решение для подавления КШ свертки векторов сигнала и фильтра. Расчеты показывают, что уровень КШ ВКФ может быть снижен таким образом до 50-60дб (0.5-0.3%).

Введем некоторые обозначения: Вектор АКФ БФМ сигнала  $\bar{S}_i$  ( $1 \leq i \leq N$ , где N- размерность БФМС) обозначим как  $\bar{\lambda} = (\lambda_1, \dots, \lambda_M)$ ,  $M=2N-1$ . Коэффициенты  $\bar{\lambda}_i$  являются скалярным произведением комплексно сопряженных векторов сигнала:

$$\bar{\lambda}_l = \begin{cases} \sum_{i=1}^l \overline{S_i S_{l-i+1}}, 1 \leq l < N, \\ \sum_{i=1}^N \overline{S_i S_{l-i+1}}, l = N, (\lambda_l = \lambda_{\max}) \\ \sum_{i=1+l-k}^N \overline{S_i S_{l-i+1}}, N < l \leq M \end{cases}$$

Функция, характеризующая уровень КШ и являющаяся критерием оптимальности при нахождении сигнала выглядит следующим образом:

$$v(s) = \frac{\left[ \sum_{l=1}^M \overline{\lambda_l \lambda_l^*} \right]^{1/2}}{|\lambda_{\max}|}$$

Задача поиска *оптимального* вектора сигнала сводится к нахождению такой кодовой последовательности, состоящей из +1,-1, при которой  $v(s)$  имеет минимальное значение. В настоящей заметке, в отличие от [1], рассматривается возможность применения для решения этой задачи специальных генетических алгоритмов ([2, 3, 4, 5]). И, аналогично [1], мы ищем не оптимальный по сформулированному выше критерию вектор (или один из них), а т. н. квазиоптимальный вектор, т. е. такой, на котором функция  $v(s)$  достигает достаточно хорошего значения. (Заметим, что практически любой из генетических алгоритмов позволяет находить решения, вообще говоря, оптимальными не являющиеся, но достаточно близкие к ним по некоторым критериям.) А именно, согласно практическим требованиям радиоинженеров, значения функции  $v(s)$  не должны превышать значения 0.32; для сравнения отметим, что, например, в случае  $n = 31$  оптимальное решение примерно равно 0.265.

В процессе решения задачи авторами был полностью разработан собственный аппарат для реализации *любых* генетических алгоритмов. (Известная библиотека GALib, о которой много написано в Интернете, на практике не отвечала необходимым требованиям - практически все решения, найденные с её помощью, превышали значение 0.4.) Авторами также были расширены и дополнены традиционные генетические операторы кроссинговера и мутации: изменения были вызваны спецификой описанной задачи. Например, оператор мутации был растянут на несколько поколений, т. е. аппарат мутации из однократного превратился в многократный. Также было введено понятие оптимизирующей мутации.

Была разработана программа, в которой были реализованы описанные выше идеи; с её помощью за приемлемое время были получены результаты, вполне удовлетворяющие радионинженеров. В приведённой ниже таблице:

- результаты вычислений для различных алгоритмов сведены в столбцы: 1 - полный переборный; 2 - созданный на основе теории, приведённой в [1]; 3 - генетический алгоритм, кратко описываемый в настоящей заметке;
- для различных размерностей БФМС в клетках таблицы указано примерное время работы алгоритма на компьютере с процессором Intel Pentium с тактовой частотой 200 МГц (при этом время, превышающее 100 лет, обозначается как «∞»), а также, (если возможны) получаемые значения  $v(s)$ . Для генетического алгоритма приведены средние значения.

Размерность кода (N)	1		2		3	
	Вычислит. время	v(s)	Вычислит. время	v(s)	Вычислит. время	v(s)
31	12ч.	0.264	0с	0.28	15 с	0.264
63	∞	--	0с	0.34	270 с	0.317
127	∞	--	0с	0.46	600 с	0.33

Несмотря на сравнительно низкий уровень боковых компонент КоБФМС, полученных с помощью генетических алгоритмов, вызываемый ими корреляционный шум для многих задач радиолокации и телеметрии может быть критически большим. Для его подавления авторами был разработан метод синтеза специальных несогласованных  $v$  – фильтров.

В основе предлагаемого ниже метода получения ВКФ с уровнем КШ близким к 0 для КоБФМС заданной размерности лежит один из известных методов синтеза  $v$ -фильтров [6], но в отличие от аналогичных методов синтеза фильтров БФМС данный метод позволяет получать более точный результат за счет использования прямого метода Гаусса для решения рекуррентного соотношения [6], представляющего собой линейное уравнение с искомым вектором  $\bar{h}_j$ , а также не имеет вычислительных ограничений при использовании кодов больших размерностей (до 1000).

Вектор ВКФ обозначим как  $\bar{\Lambda} = (\Lambda_1, \dots, \Lambda_M)$ ,  $M=N+K-1$ , (K-размерность фильтра, причем  $K>N$ ). Коэффициенты  $\bar{\Lambda}_l$ , являются скалярным произведением векторов сигнала и фильтра  $\bar{h}_j$ , где  $1 \leq j \leq K$ :

$$\bar{\Lambda}_l = \begin{cases} \sum_{i=1}^l \overline{S_i h_{l-i+1}}, & 1 \leq l \leq N, \\ \sum_{i=1}^N \overline{S_i h_{l-i+1}}, & l = (N + K) / 2, (\Lambda_l = \Lambda_{\max}) \\ \sum_{i=l+1-k}^N \overline{S_i h_{l-i+1}}, & K \leq l \leq N + K - 1 = M. \end{cases}$$

При синтезе коэффициентов фильтра вводится ограничение на уровень боковых компонент ВКФ [6]:

$$\sum_{l=1}^M \overline{\lambda_l \lambda_l^*} = 1, \lambda_l \neq \lambda_{\max}, \text{ причем, данное соотношение производит нормировку фильтра.}$$

Проигрыш сигнал/шум в максимуме выходного сигнала по сравнению с оптимальной величиной сигнал/шум согласованного фильтра характеризуется величиной  $\rho^2$  [6]:

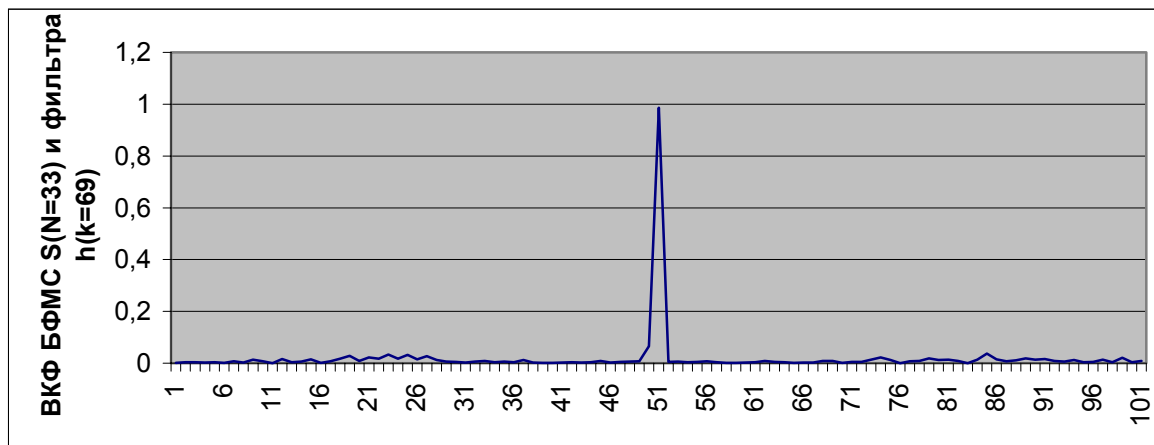
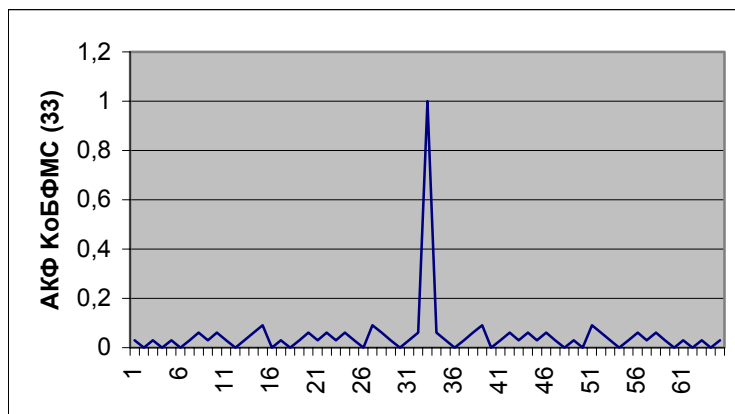
$$\rho^2 = \frac{q^2}{E/N_0} = \frac{|\lambda_{\max}|^2}{N \sum_{j=1}^K \overline{h_j h_j^*}} \leq 1.$$

С ростом относительной длительности корректирующей функции -  $K/N > 1$  эффективность  $v$ -фильтров увеличивается, незначительные энергетические потери рассогласования остаются практически неизменными в пределах 2-10 %, в зависимости от примененного КоБФМС.

При использовании  $v$ -фильтров происходит расширение области КШ, но суммарная энергия боковых максимумов снижается в десятки раз.

Была разработана программа для ЭВМ, с помощью которой были проведены расчеты апериодических корреляционных функций известных и полученных с помощью генетического алгоритма БФМС, синтезированы для них оптимальные опорные корректирующие функции. Периоды псевдослучайных кодов  $N=5, \dots, 511$ , длительности опорных корректирующих функций -  $K=7, \dots, 1023$  знаков. Исследовано влияние относительной длительности корректирующих функций на степень подавления корреляционных шумов (коэффициент  $-v$ ). Так, для кода  $N=169$  при относительной длительности  $K/N=3$  уровень КШ по сравнению с полезным сигналом =2%, при  $K/N=6$  - КШ составляет 0.3%, в то время как КШ АКФ этого кода достигает 27%.

Ниже приводятся графики автокорреляционной функции 33 компонентного сигнала и взаимокорреляционной функции 69 компонентного фильтра с этим же сигналом. КШ АКФ данного кода составляет около 24% от уровня центральной компоненты, при использовании фильтра с относительной длительностью  $K/N \approx 2$  уровень КШ по сравнению с полезным сигналом  $\approx 7\%$ , это можно визуальнo оценить на графике, при  $K/N=6$  - КШ составляет уже 0.5%.



Проведено машинное моделирование влияния доплеровского смещения, ошибок квантования и разрядности представления векторов на величину  $\nu$ . Отмечено, что коды, обладающие наименьшим уровнем КШ АКФ (лучшие по  $\nu$  критерию КоБФМС) обладают наибольшим «запасом чувствительности» к влиянию смещению, поскольку при  $Fd=0$  их характеристики  $\rho^2, \nu$  лучше.

Эффективность подавления КШ ВКФ с помощью  $\nu$ -фильтров зависит от выбора БФМС, обладающего наименьшим значением коэффициента  $\nu(s)$ . Поэтому использование генетических алгоритмов для синтеза квазиоптимальных бинарных фазоманипулированных сигналов в комплексе с применением специальных  $\nu$ -фильтров открывает новые возможности для значительного устранения корреляционного шума в радиолокации и телеметрии.

#### Литература:

- [1] В. П. Ипатов: Периодические дискретные сигнал с оптимальными корреляционными свойствами. - М., Радио и связь, 1992.
- [2] Искусственный интеллект. Справочник в трёх книгах (Под ред. И. В. Попова). - М., Радио и связь, 1990.
- [3] Handbook of Genetic Algorithms (Ed. by L. Davis). - Van Nostrand Reinhold, N.Y., 1991.
- [4] N. N. Schraudolph, R. K. Belew: Dynamic Parameter Encoding for Genetic Algorithms. - Machine Learning. 1992. Vol.3, P.98-114.
- [5] D. Beasley, D. R. Bull, R. R. Martin: An Overview of Genetic Algorithms. Part 2, Research Topics. - University Computing. 1993. Vol.15, No.4, P.170-181.
- [6] Амиантов И.Н. Избранные вопросы статистической теории связи.М. Изд-во "Советское радио", 1971,416 стр.
- [7] Лукашенко Ю.И./Под ред. А.Ф.Богомолова.Космические радиолокаторы с синтезированным раскрытием антенны.М.,Изд-во МЭИ. 1992. 60 с.
- [8] Зондирующие радиолокационные сигналы. Басаков А.И., Лукашенко Ю.И., Щернакова Л.А./Под ред. А.Ф.Богомолова.-М.: Изд-во МЭИ, 1990. - 79 с.
- [9] Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Н. Антипов, В.Т.Горяинов, А.Н. Кулин и др.; под ред. В.Т. Горяинова.- М.: Радио и связь 1988 - 304 с. : ил.
- [10] Ч.Кук, М.Бернфельд. Радиолокационные сигналы. Пер с английского под ред. В.С.Кельзона. М. Изд-во "Советское радио",1971,стр.568.
- [11] Л.Рабинер, Б.Гоулд . Теория и применение цифровой обработки сигналов.Пер с английского А.Л.Зайцева и др. , под ред. Ю.Н.Александрова М. Изд-во "Мир", 1978г.

**THE USE OF GENETIC ALGORITHMS AND SPECIFIC UNMATCHED  $v$ -FILTERS FOR BPSK SIGNALS CORRELATION NOISE MINIMIZING**

Lozovoy A.V.<sup>+</sup>, Melnikov B.F.<sup>++</sup>, Radionov A.N.<sup>+++</sup>

<sup>+</sup> The chair of Radio appliances, the Radio faculty of The Moscow Power Engineering Institute,

<sup>++</sup> The chair of Applied mathematics, the Mechanics and Mathematics faculty of The Ulianovsk State University,

<sup>+++</sup> The chair of Information systems, the Mechanics and Mathematics faculty of The Ulianovsk State University

It is well known, that in spite of the even shape of the side lobes, the Binary Phase-Shift Keyed Signal (BPSKS) Autocorrelation Functions (ACF) do not have sufficiently low Correlation Noise (CN). The known CN reduction procedures [1,6,7,8,9,10,11] may bring good results if the Optimal BPSKS (OBPSKS) or near to optimal - quasioptimal signals (QoBPSKS) are used only. The minimal comparative level of the ACF or Cross-Correlation Function (CCF) Side lobes is the optimal convolution criterion. This criterion is known as  $v$ - function [6].

This article deals with the specific  $v$ -filters application to the signals received by genetic algorithms. There is no method to get an Optimal Binary Phase-Shift Keyed Signal accept direct computer searching which leads to the so-called combinatorial explosion - an exponential dependence of searching time on the number of signal units (BPSKS dimension). Various heuristic methods are used usually for dimensions 30 and more (some of them are described in [1]). These algorithms bring solutions near to optimal ones. The genetic algorithms offered in the article allow to get QoBPSKS, which are differ from OBPSKS less then 0.1% and processing time is polynomial i.e. for 100 units signal the processing time is  $10^9$  of the direct computer searching. Besides, for some dimensions the genetic algorithms show much better results then all the others (processing time, aberration from the optimal result are considered). Combined use of the genetic algorithms for receiving QoBPSKS together with the  $v$ -filters, which are described below, gives us new effective solution for the side lob suppression. The rate of the CN can be suppressed up to 50-60db (0.5-0.3%) according to available calculations.

Authors created completely new means to realize any genetic algorithms. A library known to Internet society as GALib does not meet the essential requirements ( $0.2 < v(s) < 0.32$ )- almost all the solutions obtained by the GALib, did not show the  $v(s)$  lower then 0.4. If consider specific character of the problem the authors extended and supplemented traditional genetic crossing over and mutation clauses. For example, mutation clause, has been extended to several generations, from single-stage it has been turned out to multi-stage clause. The term of optimizing mutation has been introduced into practice as well. The program was created based on the theory. Comparative table below shows the real results, received by different methods:

- Algorithms are in the columns: 1- full searching algorithm, 2-based on a theory [1], 3 - genetic algorithm, described in this article.
- Approximate PC (Intel Pentium processor 200 Mhz) processing time and  $v(s)$  values (if they are possible) are shown in the rows along from a signal dimension (time exceeding 100 years is shown as the « $\infty$ » sign)

Code dimension(N)	1		2		3	
	processing time	$v(s)$	processing time	$v(s)$	processing time	$v(s)$
31	12ч.	0.264	0с	0.28	15 с	0.264
63	$\infty$	--	0с	0.34	270 с	0.317
127	$\infty$	--	0с	0.46	600 с	0.33

Correlation noise of the QoBPSKS received by the genetic algorithms can be critically large for many tasks such as radiolocation or telemetry, despite of a comparatively low level of the side lobes. The authors developed a method of special unmatched  $v$ -filters synthesis for CN suppression.

In a basis of the offered method below lays a known method described in the book [6], but that one has been improved and now it allows to receive an exacter result using a direct gauss method to determine a recurrence relation [6] being a kind of linear equation. Computing restrictions were removed also for large codes ( $N \leq 1000$ ). growth of the recourse function relative dimension -  $K/N > 1$  efficiency of the  $v$ -filters is increased, the insignificant power losses caused by the filters mismatching remain practically constant within the limits of 2-10 %, depending on applied QoBPSKS. In other words- the longer the filter, the less the side lobes of the CCF, while the central lobe are nearly the same height.

CN area expands when the  $v$ -filters are applied, but the total energy of the side lobs is reduced in tens of times.

The computer program was developed, aperiodic cross-correlation functions of known BPSKSs and of the synthesized ones by genetic algorithm were received by. Optimum unmatched  $v$ -filters were calculated for that signals. The periods of the pseudo-casual codes (QoBPSKS) are 5.., 511, dimension of the unmatched  $v$ -filters are 7.., 1023 units. The influence of  $v$ -filters relative dimension on the CN suppression degree was investigated.

For example:

The cross-correlation function was calculated for  $N=169$  units code and  $K=339,1015$  units filters. The CN of the auto-correlation function is about 27 % of the central lobe level. When a filter with the relative dimension  $K/N \approx 2$  is used the CN is about 7% of the useful signal, when  $K/N=6$  – the CN makes already 0.5 %.

Doppler translation, sampling error and bit capacity influence on the  $v(s)$  were computer simulated. It was noticed that codes with the least value  $v(s)$  of their ACF are less “sensitive” to Doppler translation and other influences to their CCF.

The CN suppression efficiency of the CCF with the help of  $v$ -filters depends on a choice of the BPSKS with the least value  $v(s)$ . Therefore the usage of the genetic algorithms for Quasioptimal Binary Phase-Shift Keyed Signals synthesis together with the special  $v$ -filters application opens new opportunities for significant correlation noise suppression in a radiolocation and telemetry.

References.

- [1] В. П. Ипатов: Периодические дискретные сигнал с оптимальными корреляционными свойствами. - М., Радио и связь, 1992.
- [2] Искусственный интеллект. Справочник в трёх книгах (Под ред. И. В. Попова). - М., Радио и связь, 1990.
- [3] Handbook of Genetic Algorithms (Ed. by L. Davis). - Van Nostrand Reinhold, N.Y., 1991.
- [4] N. N. Schraudolph, R. K. Belew: Dynamic Parameter Encoding for Genetic Algorithms. - Machine Learning, 1992. Vol.3, P.98-114.
- [5] D. Beasley, D. R. Bull, R. R. Martin: An Overview of Genetic Algorithms. Part 2, Research Topics. - University Computing, 1993. Vol.15, No.4, P.170-181.
- [6] Амиантов И.Н. Избранные вопросы статистической теории связи.М. Изд-во "Советское радио", 1971,416 стр.
- [7] Лукашенко Ю.И./Под ред. А.Ф.Богомолова. Космические радиолокаторы с синтезированным раскрывом антенны.М.,Изд-во МЭИ. 1992. 60 с.
- [8] Зондирующие радиолокационные сигналы. Баскаков А.И., Лукашенко Ю.И., Щернакова Л.А./Под ред. А.Ф.Богомолова.-М.: Изд-во МЭИ, 1990. - 79 с.
- [9] Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В.Н. Антипов, В.Т.Горяинов, А.Н. Кулин и др.; под ред. В.Т. Горяинова.- М.: Радио и связь 1988 - 304 с. : ил.
- [10] Ч.Кук, М.Бернфельд. Радиолокационные сигналы. Пер с английского под ред. В.С.Кельзона. М. Изд-во "Советское радио",1971,стр.568.
- [11] Л.Рабинер, Б.Гоулд . Теория и применение цифровой обработки сигналов.Пер с английского А.Л.Зайцева и др. , под ред. Ю.Н.Александрова М. Изд-во “Мир”, 1978г.