

УДК 621.396.96

## КОМПЕНСАЦИЯ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЙ В РЛС ОБЗОРА СО ВЗАИМНО ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ЗАКОНАМИ МОДУЛЯЦИИ

К. т. н. С. А. Горшков, к. т. н. С. Ю. Седышев, М. Н. Воронцов

Военная академия Республики Беларусь  
Республика Беларусь, г. Минск  
voroncovmn@mail.ru

*Приводятся результаты математического моделирования последовательностей псевдослучайных сигналов и устройства их обработки на фоне пассивных помех для РЛС обзора*

*Ключевые слова: LPI радар, шумоподобные сигналы, взаимно ортогональные сигналы*

Одним из путей улучшения помехозащищенности и живучести радиолокаторов обзора является снижение вероятности перехвата излучаемых ими сигналов. Радары с низкой вероятностью перехвата излучения называют Low Probability of Intercept Radar (LPI Radar) [1—3, 6, 7, 12, 14]. Для улучшения скрытности излучения в LPI радарх изменяют время-частотную структуру зондирующего сигнала (ЗС), приближая ее к шумовой [4, 5, 12, 14].

Многие теоретические и практические проблемы LPI радаров уже решены [1—4]. В настоящее время изучены:

- правила формирования когерентных последовательностей псевдослучайных сигналов [4—8];
- способы генерации мощных псевдошумовых зондирующих сигналов;
- принципы сжатия псевдослучайных сигналов.

Недостаточно изученным остается еще один важный вопрос активной LPI радиолокации — обнаружение движущихся целей на фоне пассивных помех. Случайный закон модуляции (ЗМ) шумоподобных сигналов обладает случайной структурой боковых лепестков сжатого импульса. В этом случае может происходить снижение коэффициента межпериодной корреляции пассивных помех и, как следствие — снижаться качество их подавления. В докладе приводятся результаты математического моделирования последовательностей шумоподобных сигналов (ШПС) и устройств их обработки на фоне пассивных помех для РЛС обзора.

Улучшение качества подавления пассивных помех может быть достигнуто при увеличении частоты повторения сигнала РЛС обзора. Кроме того, введение когерентного накопления (КН) отраженных сигналов (ОС) позволит снизить вероятность перехвата излучения РЛС [12]. Использование квазинепрерывных когерентных последовательностей ШПС с изменением ЗМ от импульса к импульсу (рис. 1) позволяет сохранить однозначную дальность  $r_{\text{одн}}$  при одновременном расширении интервала однозначного определения радиальной скорости  $V_{r_{\text{одн}}}$  [9, 10].

Бесконечная когерентная последовательность составных ЗМ  $U_0(t)$

$$U(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} U_0(t - kT_{\text{п}}), \quad (1)$$

состоит из  $N$  повторяющихся взаимно ортогональных сигналов

$$U_0(t) = \sum_{j=0}^{N-1} U_{0j}(t - kT_{\text{п}}), \quad (2)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} U_{0j} U_{0i}^*(t) dt = 0 \quad \forall i \neq j \quad i, j = \overline{0, N-1}. \quad (3)$$

Для зондирующей последовательности (1) с учетом (2) и (3) однозначная дальность определяется периодом повторения  $T_{\text{п}}$ :

$$r_{\text{одн}} = 0,5cT_{\text{п}}, \quad (4)$$

а интервал однозначной радиальной скорости – периодом повторения  $T_{\text{п1}}$ :

$$V_{r_{\text{одн}}} = \pm\lambda / 4T_{\text{п1}}, \quad (5)$$

где  $c$  — скорость света,  $\lambda$  — длина волны.

На рис. 1, б показано тело неопределенности последовательности (1) в сравнении с телом неопределенности обычной (без взаимной ортогональности) последовательности ЗС (рис. 1, а).

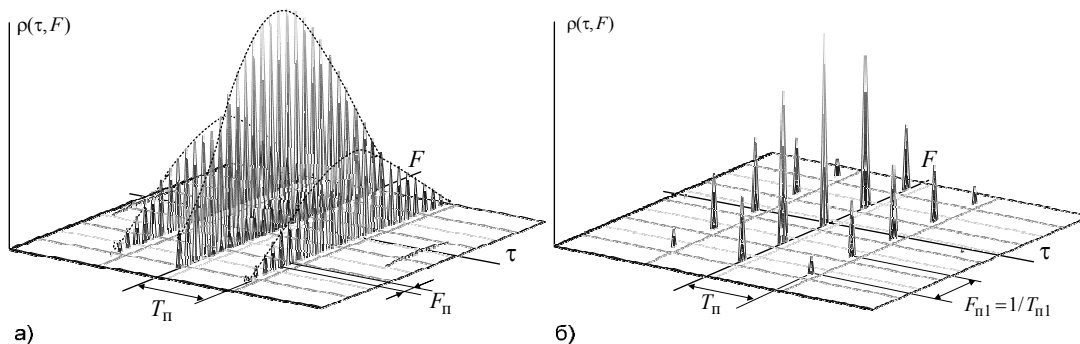


Рис. 1. Тело неопределенности обычной последовательности ЗС (а) и последовательности из трех ЗС, состоящих из пяти взаимно ортогональных ШПС (б)

Импульсная характеристика согласованного фильтра (СФ) описывается зеркальным отображением комплексно-сопряженного закона модуляции ЗС  $U_0(t)$  [6]. Для составного ЗМ (2)

$$v_0(t) = U_0^*(t_0 - t) = \sum_{j=0}^{N-1} U_{0j}^*(t_0 - t - kT_{\text{п1}}), \quad (6)$$

где минимальное значение задержки  $t_0$  вытекает из условия физической реализуемости фильтра. Таким образом, устройство ВПО для сигнала с составным ЗМ (2) представляет собой параллельное соединение  $N$  фильтров, каждый из которых согласован со своим ЗМ  $U_{0j}(t)$ .

В дальнейшем будем рассматривать цифровую реализацию устройства ВПО (6) для составного ЗМ. Его структурная схема с буфером оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) для случая  $N=5$  показана на рис. 2.

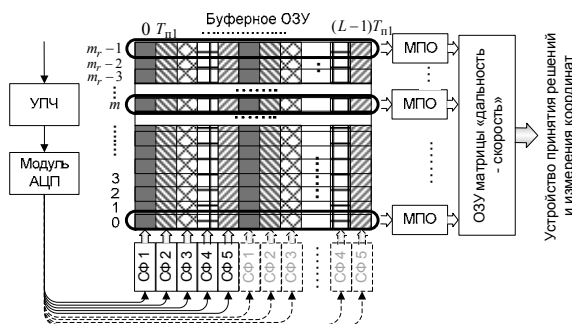


Рис. 2. Устройство обработки сигнала с составным ЗМ

На рис. 2  $L$  — число когерентно накапливаемых комплексных отсчетов через период  $T_{\text{п1}}$  в каждом  $m$ -м элементе разрешения РЛС по дальности,  $m_r$  — число элементов РЛС по дальности,

$$m_r = r_{\text{одн}} / \Delta r, \quad (7)$$

где  $\Delta r$  — разрешающая способность РЛС по дальности.

Междупериодная обработка (МПО) принятого сигнала состоит из трех этапов [6]: когерентной компенсации мешающих отражений (КК МО), когерентного накопления ОС, некогерентного накопления ОС.

На практике КК МО осуществляется с помощью устройств череспериодного вычитания (ЧПВ)

или режекторных фильтров с фиксированными параметрами, адаптивных автокомпенсаторов МО с корреляционными обратными связями, адаптивных решетчатых фильтров (АРФ) и другими способами когерентной компенсации [6].

В модели для КК МО используется устройство двукратного ЧПВ.

Когерентное накопление  $L$  комплексных отсчетов через период  $T_{п1}$  осуществляется посредством применения алгоритма дискретного преобразования Фурье (ДПФ) для каждой  $m$ -й строки буферной памяти (рис. 2). Если число  $L$  определяется степенью числа 2, вместо ДПФ можно использовать алгоритм быстрого преобразования Фурье.

Результаты работы алгоритма ДПФ записываются в выходной двумерный буфер памяти размером  $m_r \times L$  элементов (ОЗУ матрицы «дальность — скорость»), который содержит квадраты модулей комплексных амплитуд когерентно накопленных сигналов в элементах разрешения РЛС по дальности, что позволяет судить о радиальных скоростях обнаруженных в этих элементах дальности целей в диапазоне однозначной скорости (5). Примеры выбора параметров КН рассмотрены в [8—11].

Таким образом, КН результатов согласованной фильтрации в каждой  $m$ -й строке буферного ОЗУ (рис. 2) позволяет организовать обзор пространства радиолокационного наблюдения (РЛН) по дальности и радиальной скорости.

В модели в качестве ЗС была рассмотрена последовательность, состоящая из пяти взаимно ортогональных сигналов с ЗМ на основе моделирующей кодовой последовательности Голда. Автокорреляционные и взаимно корреляционные функции (АКФ, ВКФ) нескольких ЗС последовательности представлены на рис. 3.

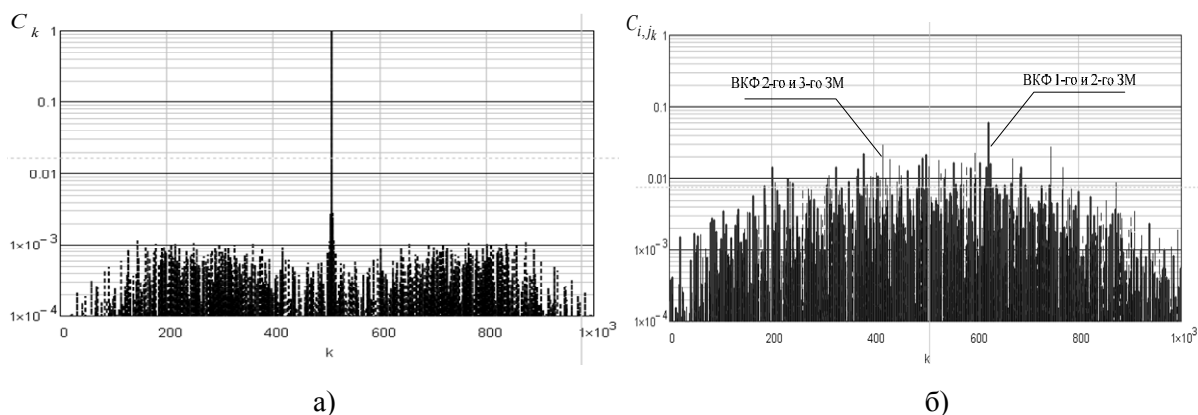


Рис. 3. АКФ (а) и ВКФ (б) для пяти сигналов с ЗМ на основе кодовой последовательности Голда

Принятый сигнал представляет собой аддитивную смесь ОС, МО и внутренних шумов приемника. Прохождение принятого сигнала через набор параллельных СФ устройства ВПО с импульсной характеристикой (б) дает отклик, представленный штриховой линией на рис. 4, а. КК МО реализуется путем согласования амплитудно-частотной характеристики устройства ЧПВ с амплитудно-частотным спектром МО (рис. 4, а). Частотная характеристика устройства КН совпадает с комплексно-сопряженным энергетическим спектром ОС. Сигнал на выходе устройства КН представлен на рис. 4, б.

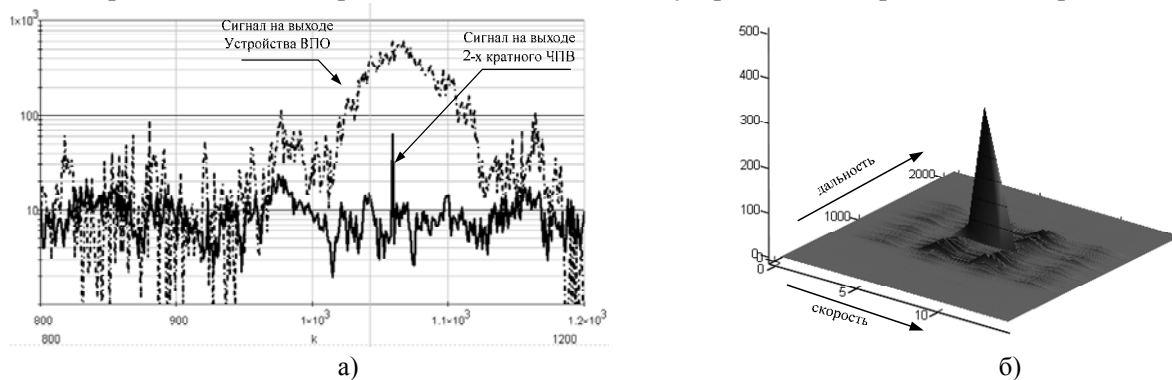


Рис. 4. Сигналы на выходе устройства ВПО и КК МО (а) и КН (б)

Результаты моделирования обработки принятого сигнала позволяют говорить о возможности применения в качестве зондирующего сигнала квазинепрерывной когерентной последовательности шумоподобных сигналов с изменением закона модуляции. При этом возможность подавления пассивных помех сохранятся. Подтверждением является проведенная согласованная обработка взаимно ортогональной моделирующей кодовой последовательности Голда с пятью ЗМ. Использование такой структуры ЗС позволило также расширить характеристики РЛС обзора (интервал однозначного определения дальности и радиальной скорости) [10].

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Pace P. E. Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar.— Boston-London, Artech House, 2004.
2. Wiley R. G., ELINT The Interception and Analysis of Radar Signals.— Canton Street Norwood, MA Artech House, 2006.
3. Lukin K. A. Noise Radar Technology: the Principles and Short Overview.— Applied Radio electronics.— Kharkov: IASARE, 2005, No 1.
4. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами.— Москва: Сов. радио, 1985.
5. Гантмахер В. Е., Быстров Н. Е., Чеботарев Д. В. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. С.-Петербург: Наука и Техника, 2005.
6. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / Под ред. Я. Д. Ширмана.— Москва: Радиотехника, 2007.
7. Ткаченко В.П. Комплексное решение проблемы обнаружения, опознавания, распознавания целей, помехозащищенности и живучести радиолокационного вооружения на основе синтеза шумоподобных сигналов.— С.-Петербург: МВАА, 2008.
8. Борисов В. И. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. – Москва: Радио и связь, 2000.
9. Седышев С. Ю., Воронцов М. Н. Расширение диапазона однозначного определения радиальной скорости в импульсно-доплеровских радиолокаторах // Четвертый Международный радиоэлектронный форум МРФ-2011. — Украина, г. Харьков.
10. Седышев С. Ю., Воронцов М. Н. Расширение интервала однозначного определения радиальной скорости в радиолокаторах обзора при заданном интервале однозначной дальности / Доклады БГУИР.— 2012.— № 6. — С. 76—81.
11. Патент 8233 Респ. Беларусь. Устройство обработки сигнала с однозначным определением дальности и радиальной скорости / С. А. Горшков, С. Ю. Седышев, М. Н. Воронцов. — 15.02.12.
12. Gorshkov S. A., Sedyshev S. Yu., Vorontsov M. N. Analysis of the characteristics of random probing signals to solve the problem of target detection on the background clutter // 3<sup>rd</sup> International Conference Noise Radar Technology, NRT-2012.— Yalta, Ukraine.— P. 68—69.
13. Котельников В. А. Сигналы с минимальной и максимальной вероятностями обнаружения / Радиотехника и электроника.— 1959.— № 3.— С. 354—358.
14. Ширман Я. Д., Орленко В. М. Широкополосная активная Радиолокация с сигналами различной степени хаотичности / Прикладная радиоэлектроника. Харьков.— 2009. — Т. 8, № 4.— С. 426—443.

---

S. A. Gorshkov, S. Y. Sedyshev, M. N. Vorontsov

#### **The detection of the moving target on the background clutter by the noise radar.**

The paper presents the results of mathematical modeling of sequences of pseudo-random signals and their processing device against the background of passive interference for surveillance radars.

Keywords: *LPI surveillance radar, noise-like signal, mutually orthogonal signals.*