

**Аналитическое решение  
для подавления уровня интегральных боковых лепестков АКФ  
псевдослучайных последовательностей в РСА**

*В.А. Козлов<sup>1</sup>, В.В. Чистюхин<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>АО «Центр Перспективных Технологий и Аппаратуры»,  
г. Москва, Россия*

*<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
г. Москва, Россия*

*ksl@miee.ru*

В радиолокации с синтезированной апертурой активно используется модулирование зондирующего сигнала с помощью псевдослучайных последовательностей. Это, как правило, вызвано стремлением к миниатюризации и упрощению аппаратуры.

Рассмотрена проблема повышения динамического диапазона радиолокационного изображения местности, получаемого радиолокатором с синтезированной апертурой. При использовании псевдослучайных последовательностей в качестве зондирующих сигналов динамический диапазон изображения определен уровнем боковых лепестков апериодических автокорреляционных функций (АКФ). Предложен оригинальный подход к уменьшению уровня боковых лепестков АКФ псевдослучайных последовательностей. Приведен аналитический вывод формулы для суммы АКФ псевдослучайной последовательности длины  $N$ , полученной путем циклического сдвига начальной последовательности, боковые пики периодической АКФ которой равны  $-1/N$ .

Полученный результат может быть использован в радиолокации для формирования ансамбля сигналов, обеспечивающих значительное подавление уровня интегральных боковых лепестков по сравнению с одиночной последовательностью.

*Ключевые слова:* РСА; псевдослучайная последовательность; периодическая АКФ; сумма апериодических АКФ<sub>Σ</sub>; циклический сдвиг.

*Для цитирования:* Козлов В.А., Чистюхин В.В. Аналитическое решение для подавления уровня интегральных боковых лепестков АКФ псевдослучайных последовательностей в РСА // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 5. – С. 487–490. – DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-5-487-490

## An Analytic Solution to Suppress Level of ACF Integral Sidelobes of Pseudo-Random Sequences in SAR

V.A.Kozlov<sup>1</sup>, V.V.Chistyuhin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC «Center of Perspective Technologies and Devices», Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

ksl@miee.ru

In radiolocation with the synthesized aperture the modulation of the probing signal using the pseudorandom sequences is actively used. This, as a rule, is due to tendency of the apparatuses miniaturization and simplification.

The problem of increasing the dynamic range of the radar image of a region, obtained with synthetic aperture radar, has been considered. While using the pseudorandom sequences as the probing signals the dynamic range of an image has been determined by the level of side lobes of aperiodic autocorrelation functions (ACF). An original approach to reduce the level of the ACF pseudorandom sequences has been proposed. An analytic derivation of the sum of ACFs of  $N$  length pseudorandom sequence, obtained with a cyclic shift of the initial sequence, which side peaks of periodic ACF are equal to  $-1/N$ , has been presented.

The obtained result can be used in a radar design to form an ensemble of signals to provide a significant suppression of the integral side lobes level in comparison with a single sequence.

**Keywords:** synthetic aperture radar; pseudorandom sequence; periodic ACF; sum of aperiodic ACFs; cycle shift.

**For citation:** Kozlov V.A., Chistyuhin V.V. An Analytic Solution to Suppress Level of ACF Integral Sidelobes of Pseudo-Random Sequences in SAR // Proc. of Universities. Electronics. – 2017. – Vol. 22. – № 5. – P. 487–490. – DOI: 10.214151/1561-5405-2017-22-5-487-490

В настоящее время в дистанционном зондировании, в частности в радиолокации с синтезированной апертурой, активно используется модулирование зондирующего сигнала с помощью псевдослучайных последовательностей. Как правило, это вызвано стремлением к миниатюризации и упрощению аппаратуры, связанным с использованием аппаратных решений, отработанных в цифровой связи.

Использование псевдослучайных последовательностей большой длины в радиолокации с синтезированной апертурой для повышения отношения «сигнал/шум», как справедливо отмечено в [1], может привести на радиолокационном изображении к появлению длинного «пьедала», создаваемого боковыми пиками аperiodической автокорреляционной функции (АКФ<sub>а</sub>), амплитуда которых пропорциональна  $\sqrt{N}$ , где  $N$  – длина последовательности.

В качестве средства подавления таких боковых пиков предлагается использование сложных ансамблей зондирующих сигналов, состоящих из некоторого набора последовательностей [2]. В этом случае суммирование при сжатии по азимуту (при правильном выборе последовательностей набора) позволит подавить боковые пики путем сложения АКФ<sub>а</sub> последовательностей набора. Одним из простейших и эффективных способов получения такого набора является циклический сдвиг (например, на единицу) используемой псевдослучайной последовательности при каждом следующем зондирующем импульсе.

Рассмотрим псевдослучайную последовательность (АКФ<sub>п</sub>) длины  $N$ , периодическая АКФ которой равна 1 при  $i = 0$  и  $-1/N$  при  $i \neq 0$  ( $i = 0, \dots, N-1$ ) ( $M$ -последовательность, последовательность Лежандра, последовательность Холла, последовательность Якоби [3]).

Формулу АКФ<sub>п</sub> такой псевдослучайной последовательности  $a(i, k)$  можно записать как

$$\text{АКФ}_\text{п}(l) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} a(i) a((i+l) \bmod N), \quad l = 0, \dots, N-1,$$

$$\text{АКФ}_\text{п}(l) = \begin{cases} 1, & l = 0, \\ -\frac{1}{N}, & l = 1, \dots, N-1, \end{cases}$$

где  $l$  – величина периодического (циклического) сдвига;  $\bmod$  – операция деления по модулю целого числа.

Функция АКФ<sub>п</sub> является четной, т.е.  $\text{АКФ}_\text{п}(l) = \text{АКФ}_\text{п}(-l)$ .

Формулу АКФ<sub>а</sub> этой же псевдослучайной последовательности, подвергнутой циклическому сдвигу, можно представить в следующем виде:

$$\text{АКФ}_\text{а}(l, k) = \frac{1}{N} \sum_{i=l}^{N-1} a((i+k) \bmod N) a((i+k-l) \bmod N), \quad k, l = 0, \dots, N-1,$$

где  $l$  – сдвиг автокорреляционной функции;  $k$  – величина периодического (циклического) сдвига последовательности.

Запишем формулу суммы АКФ<sub>а</sub> для всех возможных  $N$  циклических сдвигов:

$$\begin{aligned} \text{АКФ}_\Sigma(l) &= \sum_{k=0}^{N-1} \text{АКФ}_\text{а}(l, k) = \sum_{k=0}^{N-1} \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=l}^{N-1} a((i+k) \bmod N) a((i+k-l) \bmod N) \right] = \\ &= \sum_{i=l}^{N-1} \left[ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} a((i+k) \bmod N) a((i+k-l) \bmod N) \right] = \sum_{i=l}^{N-1} \text{АКФ}_\text{п}(-l) = (N-l) \text{АКФ}_\text{п}(l). \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\text{АКФ}_\Sigma(l) = \begin{cases} N, & l = 0, \\ -\frac{N-l}{N}, & l = 1, \dots, N-1. \end{cases}$$

После нормировки

$$\text{АКФ}_{\Sigma\text{норм}}(l) = \begin{cases} 1, & l = 0, \\ -\frac{N-l}{N^2}, & l = 1, \dots, N-1. \end{cases}$$

Таким образом, получено аналитическое выражение для суммы АКФ<sub>а</sub> циклически сдвигаемой псевдослучайной последовательности и показано, что использование циклического сдвига псевдослучайной последовательности позволяет резко снизить боковые пики суммарной АКФ. В этом случае амплитуда пиков нормированной суммарной АКФ меняется от  $\sim 1/N$  вблизи основного максимума до  $1/N^2$  на краю суммарной АКФ, что позволяет говорить о значительном улучшении подавления боковых пиков по сравнению с одиночной АКФ<sub>а</sub> без применения циклического сдвига, у которой величина бокового пика АКФ<sub>а</sub> пропорциональна  $\sqrt{N}$  [1–3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда перспективных исследований (договор № С01/2014).

### Литература

1. **Захаров А.И.** Методы дистанционного зондирования земли радаром с синтезированной апертурой: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Фрязино, 2012. – 370 с.
2. **Кудря А.И., Толстов Е.Ф., Четверик В.Н.** Расширение возможностей использования М-последовательности в РСА // II Всероссийские Арmandовские чтения «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред»: материалы V Всероссийской научной конференции (Муром, 26–28 июня 2012 г.). – Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2012. – С. 518–531.
3. **Варакин Л.Е.** Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 381 с.

Поступило после доработки 05.05.2017 г.; принято к публикации 13.06.2017 г.

**Козлов Вадим Александрович** – кандидат технических наук, руководитель ОКБ АО «Центр Перспективных Технологий и Аппаратуры» (Россия, 115230, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 42, стр. 2).

**Чистюхин Виктор Васильевич** – кандидат технических наук, профессор кафедры микроэлектронных радиотехнических устройств и систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), ksl@miee.ru

### References

1. Zaharov A.I. *Metody distancionnogo zondirovaniya zemli radarami s sintezirovannoj aperturoj*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Methods of remote sensing by synthetic aperture radars. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Fryazino, 2012. 370 p. (in Russian).
2. Kudrya A.I., Tolstov E.F., Chetverik V.N. Rasshiren timer vozmozhnostej ispol'zovaniya M-posledovatel'nosti v RSA [Increasing the capabilities of use of M-sequences in synthetic aperture radars]. *II Vserossijskie Armandovskie chteniya: Radiofizicheskie metody v distancionnom zondirovanii sred. Materialy V Vserossijskoj nauchnoj konferencii* [Increasing the capabilities of use of M-sequences in synthetic aperture radars [Proc. of the 5th All-Russia Scientific Conference on Radio-physical Methods on Environment Sensing]. Murom, IPC MI VIGU, 2012, pp. 518–531. (in Russian).
3. Varakin L.E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communications systems with noise-like signals]. Moscow, Radio i svyaz', 1985. 381 p. (in Russian).

Submitted 05.05.2017; accepted 13.06.2017.

**Kozlov Vadim A.** – PhD of technical sciences, head of the Experimental Design Office, JSC «Center of Perspective Technologies and Devices» (Russia, 115230, Moscow, Varshavskoe shosse, 42).

**Chistyukhin Victor V.** – PhD of technical sciences, professor of the Microelectronic Radio Devices and Systems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), ksl@miee.ru