

---

---

**НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ**  
**SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS**

---

---

УДК 537.868.4  
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-118-124

**РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОТРАЖЕНИЯ  
ПСЕВДОСЛУЧАЙНОГО СИГНАЛА ОТ ПОКРЫТИЯ  
С УПРАВЛЯЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

А. П. Алёшкин\*, В. М. Гусаков, В. Н. Цыкунов

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия*  
\* *vka@mail.ru*

**Аннотация.** Представлены результаты имитационного моделирования процесса отражения сигнала типа М-последовательность от однослойного покрытия с управляемыми параметрами. Разработанная модель позволяет получить сигнал на выходе коррелятора радиолокационной станции без учета среды распространения. Моделирование процесса отражения псевдослучайного сигнала от покрытия с управляемыми параметрами показывает принципиальную возможность создания ложных точек отражения для радиолокационной станции без использования активных средств модификации дальностных портретов объектов.

**Ключевые слова:** покрытие, радиолокационная станция, М-последовательность, управляемые параметры, коррелятор

**Ссылка для цитирования:** Алёшкин А. П., Гусаков В. М., Цыкунов В. Н. Результаты моделирования процесса отражения псевдослучайного сигнала от покрытия с управляемыми параметрами // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 2. С. 118—124. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-118-124.

**RESULTS OF MODELING A PSEUDORANDOM SIGNAL REFLECTION FROM  
A COATING WITH CONTROLLED PARAMETERS**

**A. P. Aleshkin\*, V. M. Gusakov, V. N. Tsykunov**

*A. F. Mozhaisky Military Aerospace Academy, St. Petersburg, Russia*  
\* *vka@mail.ru*

**Abstract.** Results of modeling the process of the "M-sequence" type signal reflection from a single-layer coating with variable parameters are presented. The developed model makes it possible to obtain a signal at the output of the radar correlator without excluding the propagation medium. Modeling the process of reflection of pseudo-random signal from a single-layer coating with variable parameters demonstrates the fundamental possibility of creating false reflection points for radar without using active means of signal re-emission.

**Keywords:** coating, radar, M-sequence, controlled parameters, correlator

**For citation:** Aleshkin A. P., Gusakov V. M., Tsykunov V. N. Results of modeling a pseudorandom signal reflection from a coating with controlled parameters. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 2. P. 118—124 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-118-124.

В современных радиолокационных станциях (РЛС) в параметрах зондирующих сигналов помимо линейной частотной модуляции (ЛЧМ) указывается и фазовая манипуляция. Использование псевдослучайных сигналов наряду с ЛЧМ, несмотря на сложность и трудоемкость их обработки, связано с требованиями повышения точности функционирования РЛС в режимах высокого разрешения, так как в этом случае ЛЧМ-сигналам присуща неоднознач-

ность по дальности из-за наличия нескольких корреляционных пиков при приеме отраженного сигнала от движущихся объектов [1].

В статье представлены результаты моделирования процесса приема сигнала типа М-последовательность, отраженного от однослойного покрытия с изменяемой диэлектрической проницаемостью на металлическом экране.

В качестве покрытий с переменной диэлектрической проницаемостью возможно применение тонких сегнетоэлектрических пленок, на которых уже создаются различные СВЧ-элементы [2, 3], ферритовых покрытий или материалов с отрицательной диэлектрической проницаемостью (метаматериалов) [4, 5]. Примеры покрытий в статье не приводятся, также не учитываются ослабление сигнала по трассе распространения и помеховая обстановка.

В качестве исходных данных для моделирования приняты:

- длительность одного импульса — 10 нс;
- число импульсов в сигнале — 63;
- стартовая последовательность — „11011110“;
- центральная частота — 10 ГГц;
- диапазон изменения диэлектрической проницаемости — 2—10;
- толщина покрытия 1—5 мм;
- покрытие расположено перпендикулярно распространению Н-поляризованной волны.

Моделирование процесса отражения псевдослучайного сигнала от покрытия с управляемыми параметрами происходит в несколько этапов. На первом этапе генерируется двоичная последовательность, необходимая для формирования зондирующего сигнала. Для генерации М-последовательности с периодом  $M=2^n-1$  используется примитивный полином степени  $n$ . Примеры полиномов приведены в таблице [6].

Примитивные полиномы

$n$	$M$	Полином	$n$	$M$	Полином
1	1	$x+1$	9	511	$x^9+x^4+1$
2	3	$x^2+x+1$	10	1023	$x^{10}+x^3+1$
3	77	$x^3+x+1$	11	2047	$x^{11}+x^2+1$
4	15	$x^4+x+1$	12	4095	$x^{12}+x^6+x^4+x+1$
5	31	$x^5+x^2+1$	13	8191	$x^{13}+x^4+x^3+x+1$
6	63	$x^6+x+1$	14	16383	$x^{14}+x^{10}+x^6+x+1$
7	127	$x^7+x^3+1$	15	32767	$x^{15}+x+1$
8	255	$x^8+x^4+x^3+x^2+1$	16	65535	$x^{16}+x^{12}+x^3+x+1$

Пример генератора для последовательности длиной 15 символов на основе примитивных полиномов представлен на рис. 1.

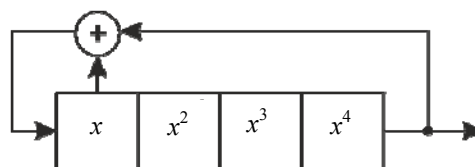


Рис. 1

Далее в соответствии с полученной последовательностью формируются дискретные отсчеты видеосигнала  $S(t)$  без постоянной составляющей и шкала времени с дискретностью, кратной двум. Дискретность выбирается таким образом, чтобы выполнялись условия теоремы Котельникова для сформированного на основе видеосигнала  $S(t)$  зондирующего радиосигнала с частотой  $f_0$ .

В ходе моделирования для сигнала с длительностью отдельного импульса 10 нс и длиной последовательности 63 символа на частоте 10 ГГц дискретность отсчетов составила 16384, при этом частота дискретизации превышала верхнюю частоту спектра в 2,5 раза.

На следующем этапе на каждый отсчет сформированной шкалы времени рассчитывается зондирующий фазоманипулированный сигнал [7]:

$$U(t) = U_0 \cos \left[ 2\pi f t + \frac{\pi}{2} S(t) \right].$$

На третьем этапе производится расчет параметров покрытия также на каждый момент времени.

В качестве лоцируемого объекта используется однослойное диэлектрическое покрытие на металлическом основании, для которого предусмотрена возможность управления диэлектрической проницаемостью. Электродинамическая модель покрытия представлена на рис. 2.

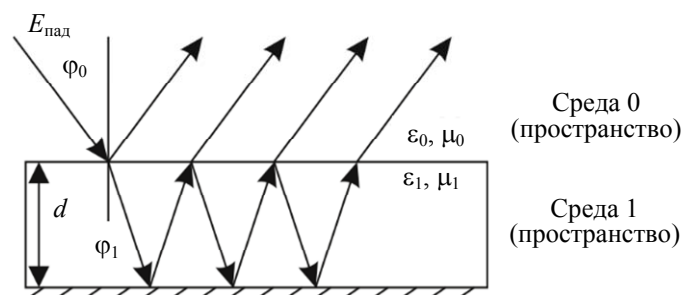


Рис. 2

Коэффициент отражения рассчитывается методом обобщенных матриц рассеяния и для случая нормального падения имеет следующий вид [8—10]:

$$R = R_0 + \frac{D_0 D_1 (\pm 1) e^{i2kd}}{1 - (\pm 1) R_1 e^{i2kd}}, \quad (1)$$

где  $D_0, D_1$  — коэффициенты прохождения из среды 0 в среду 1 и обратно;  $R_0, R_1$  — коэффициенты отражения из среды 0 в среду 1 и обратно;  $d$  — расстояние, которое проходит волна в диэлектрике между границами разделов сред;  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число.

Коэффициенты отражения рассчитываются с использованием аппарата волновых сопротивлений по формуле [8, 11]:

$$R = \frac{Z_{\text{ВХ}} - Z_{\text{ВЫХ}}}{Z_{\text{ВХ}} + Z_{\text{ВЫХ}}},$$

где  $Z_{\text{ВХ}}$  — волновое сопротивление среды, из которой распространяется волна;  $Z_{\text{ВЫХ}}$  — волновое сопротивление среды, в которую проходит волна.

Экспонента в формуле (1) характеризует фазовые набеги при прохождении в области 1.

Множитель „-1“ в формуле появляется в случае Е-поляризации (вектор  $\mathbf{E}$  параллелен плоскости слоя), так как для идеального проводника коэффициент отражения равен „-1“.

Так как ширина спектра излучаемого сигнала составляет 200 МГц, при анализе его отражения от покрытия дисперсия сигнала может не учитываться. В этом случае влияние характера изменения параметров покрытия на сигнал учитывается следующим образом:

— изменение модуля коэффициента отражения проявляется в виде амплитудной модуляции зондирующего радиосигнала;

— изменение набега фазы коэффициента отражения учитывается в виде фазовой модуляции исходного радиосигнала.

Таким образом, на каждый отсчет сформированной шкалы времени отраженный сигнал может быть представлен в виде [12]:

$$U_{\text{отр}}(t) = U_0 \times |K_{\text{покр}}(t)| \times \cos \left[ 2\pi f + \frac{\pi}{2} S(t) + \arg(K_{\text{покр}}(t)) \right],$$

где  $K_{\text{покр}}(t)$  — комплексный коэффициент отражения от покрытия.

Внешний вид взаимной корреляционной функции (ВКФ) зондирующего и отраженного сигналов в случае, когда управление параметрами покрытия отсутствует, представлен на рис. 3.

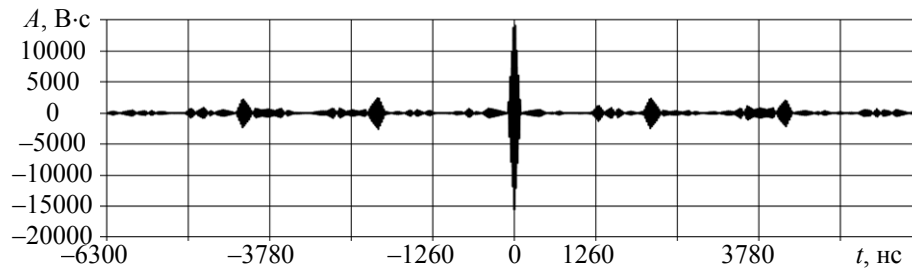


Рис. 3

Функция имеет один ярко выраженный корреляционный пик.

На рис. 4, а представлена ВКФ зондирующего и отраженного сигналов для случая управления диэлектрической проницаемостью покрытия по гармоническому закону с частотой 1 МГц и толщиной покрытия 1 мм.

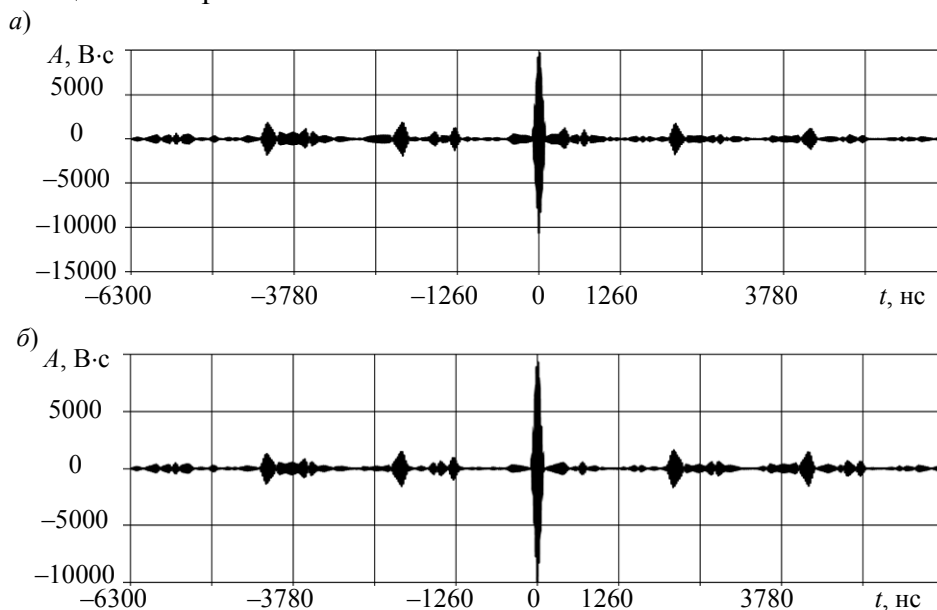


Рис. 4

Как видно из рисунка, высота пика уменьшилась на 30 % и появились дополнительные боковые всплески. В целом изменение параметров покрытия не повлияло на определение дальности до точки отражения. Увеличение частоты управления до 100 МГц (рис. 4, б) также не приводит к заметному изменению ВКФ.

На рис. 5 представлены результаты расчета ВКФ в случае управления диэлектрической проницаемостью покрытия по гармоническому закону с частотами 1 (а) и 100 МГц (б) и толщиной покрытия 5 мм.

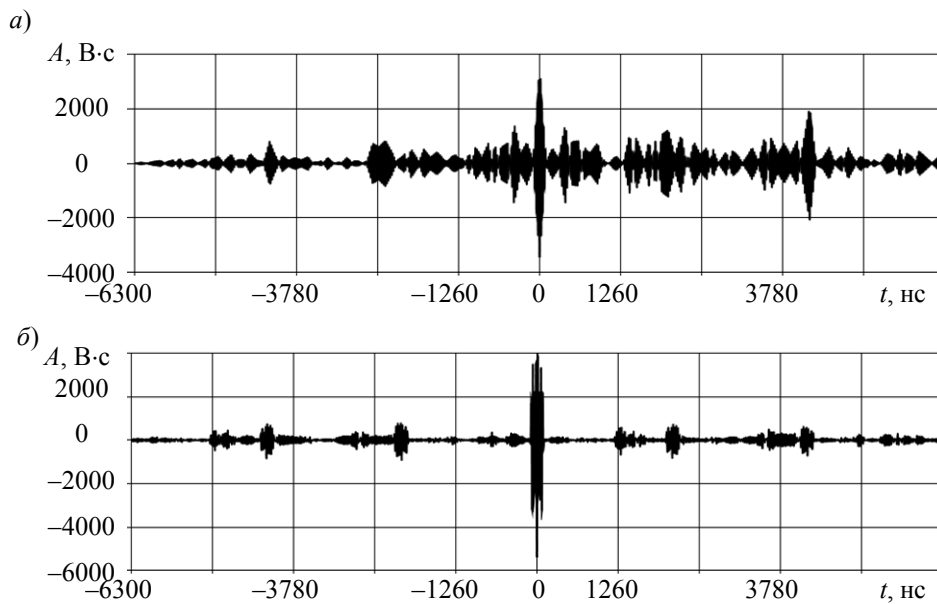


Рис. 5

В первом случае уровни боковых корреляционных всплесков соизмеримы с главным пиком. Во втором случае наблюдается размытие главного пика. В обоих случаях уровень главного пика уменьшился в пять раз относительно пика, представленного на рис. 3.

Полученные результаты соответствуют данным исследования фазоманипулированных сигналов, описанным в [1, 13]: М-последовательность имеет нулевую зону автокорреляции только при полном согласовании фильтра с эхо-сигналом по частоте, иначе вблизи основного пика автокорреляционной функции появляются боковые лепестки.

В рассматриваемом случае медленно меняющаяся по гармоническому или пилообразному закону диэлектрическая проницаемость покрытия приводит к смещению частоты заполнения отраженного радиоимпульса, что и вызывает появление боковых составляющих ВКФ. Уменьшение амплитуды основного корреляционного пика при этом можно трактовать как снижение уровня сигнала. При этом для эффективного управления параметрами покрытия частота управляющего сигнала находится в пределах 1—10 МГц, что реализуемо современными системами управления.

Таким образом, результаты моделирования процесса отражения сигнала типа М-последовательность от среды с управляемыми параметрами показывают принципиальную возможность создания мнимых точек отражения для РЛС в режимах высокого разрешения без использования активных средств модификации дальностных портретов объектов [14, 15].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баскаков А. И., Ипанов Р. Н., Комаров А. А. Фазокодоманипулированные радиолокационные сигналы для точного определения дальности и скорости малоразмерных космических объектов // Журнал радиоэлектроники. 2018. Вып. 12 [Электронный ресурс]: <<http://jre.cplire.ru/jre/dec18/7/text.pdf> DOI 10.30898/1684-1719.2018.12.7>.
2. Фирсенков А. И., Велькин Д. В., Сквородников С. В. и др. Электрически управляемые сэндвич-конденсаторы на многослойных сегнетоэлектрических плёнках // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2018. Т. 1. С. 34—38.
3. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты // Первая миля. 2010. Т. 18—19, № 3—4. С. 44—60.
4. Лагарьков А. Н., Кисель В. Н., Семененко В. Н. Радиопоглощающие материалы на основе метаматериалов // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57, № 10. С. 1122—1129.

5. Лагарьков А. Н., Кисель В. Н. *Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения // Энергия: экономика, техника, экология*. 2018. № 1. С. 10—20.
6. Захаров И. Д., Ожиганов А. А. Использование порождающих полиномов М-последовательностей при построении псевдослучайных кодовых шкал // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2011. Т. 54, № 6. С. 49—55.
7. Зернов Н. В., Юрков Ю. А., Джунь В. И. *Теория радиотехнических цепей и сигналов*. Л.: МО, 1990.
8. Бреховских Л. М. *Волны в слоистых средах*. М.: Наука, 1973
9. Гольдштейн Л. Д., Зернов Н. В. *Электромагнитные поля и волны*. М.: Советское радио, 1971. 664 с.
10. Алешкин А. П., Иванов А. А., Гусаков В. М., Семенов А. А. Результаты моделирования работы РЛС при отражении сигнала от покрытия с управляемыми параметрами // *Вестник метролога*. 2020. № 2. С. 21—23.
11. Гусаков В. М., Москалев В. М., Невзоров В. И. Обзор подходов к определению угла прохождения электромагнитной волны через границу воздух—диэлектрик с потерями // *СПбНТОРЭС: тр. ежегодной НТК*. 2020. № 1(75). С. 12—13.
12. Баскаков С. И. *Радиотехнические цепи и сигналы*. М.: Высшая школа, 2003.
13. Ипанов Р. Н. Полифазные когерентные дополнительные сигналы // *Журнал радиоэлектроники*. 2017. № 1 [Электронный ресурс]: <<http://jre.cplire.ru/jre/jan17/14/text.pdf>>.
14. Галеницкий А. В., Глущенко Л. А., Разжев А. В. и др. Экспериментальная обработка устройств модификации радиолокационных дальностных портретов объектов // *Специальная техника*. 2016. № 5. С. 2—6.
15. Перунов Ю. М., Фомичев К. И., Юдин Л. М. *Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием*. М.: Радиотехника, 2003. 416 с.

#### Сведения об авторах

- Андрей Петрович Алёшкин** — д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; E-mail: vka@mil.ru
- Виктор Михайлович Гусаков** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; докторант; E-mail: vka@mil.ru
- Владислав Николаевич Цыкунов** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, факультет радиоэлектронных систем космических комплексов; преподаватель; E-mail: vka@mil.ru

Поступила в редакцию 25.10.2021; одобрена после рецензирования 12.11.2021; принята к публикации 30.12.2021.

#### REFERENCES

1. <http://jre.cplire.ru/jre/dec18/7/text.pdf> DOI 10.30898/1684-1719.2018.12.7. (in Russ.)
2. Firsenkov A.I., Vel'kin D.V., Skovorodnikov S.V. et al. *Elektronika i mikroelektronika SVCH* (Electronics and Microelectronics Microwave), 2018, vol. 1, pp. 34–38. (in Russ.)
3. Slyusar V. *Pervaya milya*, 2010, no. 3-4(18-19), pp. 44–60. (in Russ.)
4. Lagar'kov A.N., Kisel' V.N., Semenenko V.N. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2012, no. 10(57), pp. 1122–1129.
5. Lagar'kov A.N., Kisel' V.N. *Energija: ekonomika, tekhnika, ekologiya*, 2018, no. 1, pp. 10–20. (in Russ.)
6. Zakharov I.D., Ozhiganov A.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2011, no. 6(54), pp.49–55. (in Russ.)
7. Zernov N.V., Yurkov Yu.A., Dzhun V.I. *Teoriya radiotekhnicheskikh tsepey i signalov* (Theory of Radio Circuits and Signals), Leningrad, 1990. (in Russ.)
8. Brekhovskikh L.M. *Volny v sloistykh sredakh* (Waves in Layered Media), Moscow, 1973. (in Russ.)
9. Gol'dshteyn L.D., Zernov N.V. *Elektromagnitnyye polya i volny* (Electromagnetic Fields and Waves), Moscow, 1971, 664 p. (in Russ.)
10. Aleshkin A.P., Ivanov A.A., Gusakov V.M., Semenov A.A. *Vestnik metrologa*, 2020, no. 2, pp. 21–23. (in Russ.)
11. Gusakov V.M., Moskaev V.M., Nevzorov V.I. *SPbNTORES*, Proceedings of the Conference, 2020, no. 1(75), pp. 12–13. (in Russ.)
12. Baskakov S.I. *Radiotekhnicheskiye tsepi i signaly* (Radio Circuits and Signals), Moscow, 2003. (in Russ.)
13. <http://jre.cplire.ru/jre/jan17/14/text.pdf>. (in Russ.)
14. Galenitsky A.V., Glushchenko L.A., Razhev A.V., Neyelov V.V., Terentyev A.M., Samorodov B.A., Fedorov M.A.

*Spetsial'naya tekhnika*, 2016, no. 5, pp. 2–6. (in Russ.)

15. Perunov Yu.M., Fomichev K.I., Yudin L.M. *Radioelektronnnoye podavleniye informatsionnykh kanalov sistem upravleniya oruzhiyem* (Electronic Jamming of Information Channels of Weapon Control Systems), Moscow, 2003, 416 p. (in Russ.)

**Data on authors**

- Andrey P. Aleshkin** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaisky Military Aerospace Academy, Faculty of Radioelectronic Systems of Space Complexes; E-mail: vka@mil.ru
- Viktor M. Gusakov** — PhD; A. F. Mozhaisky Military Aerospace Academy, Faculty of Radioelectronic Systems of Space Complexes; Doctoral Student; E-mail: vka@mil.ru
- Vladislav N. Tsykunov** — PhD; A. F. Mozhaisky Military Aerospace Academy, Faculty of Radioelectronic Systems of Space Complexes; Lecturer; E-mail: vka@mil.ru

The article was submitted 25.10.2021; approved after reviewing 12.11.2021; accepted for publication 30.12.2021.