

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.

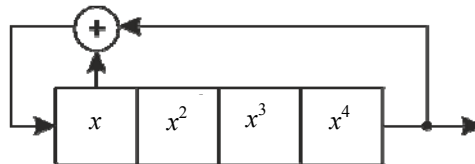


Рис. 1

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.

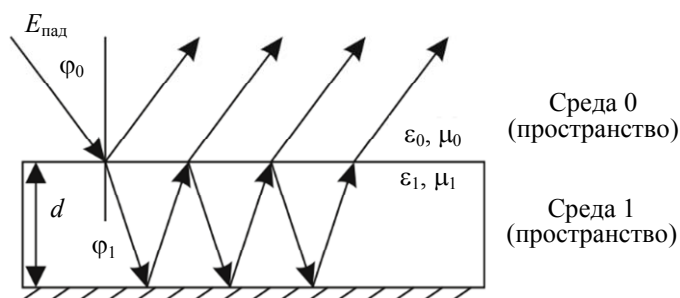


Рис. 2

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]:

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

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

Экспонента в формуле (1) характеризует фазовые набегі 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.

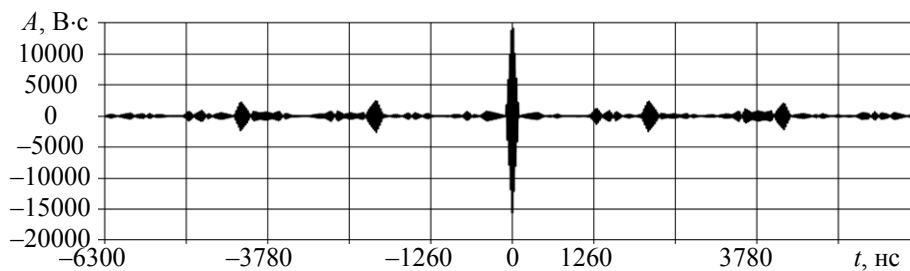
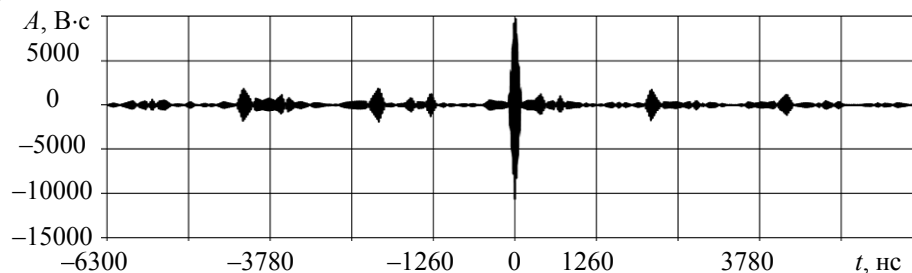


Рис. 3

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.

а)



б)

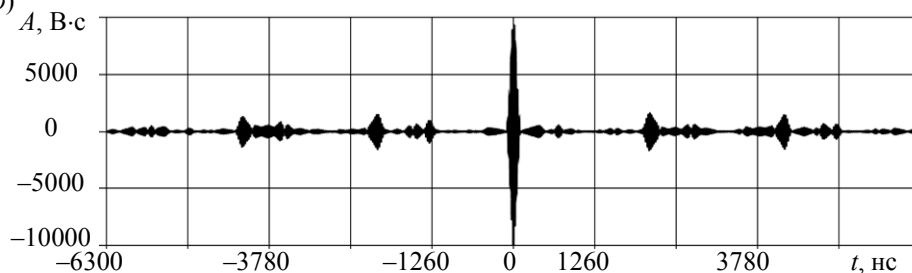


Рис. 4

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.

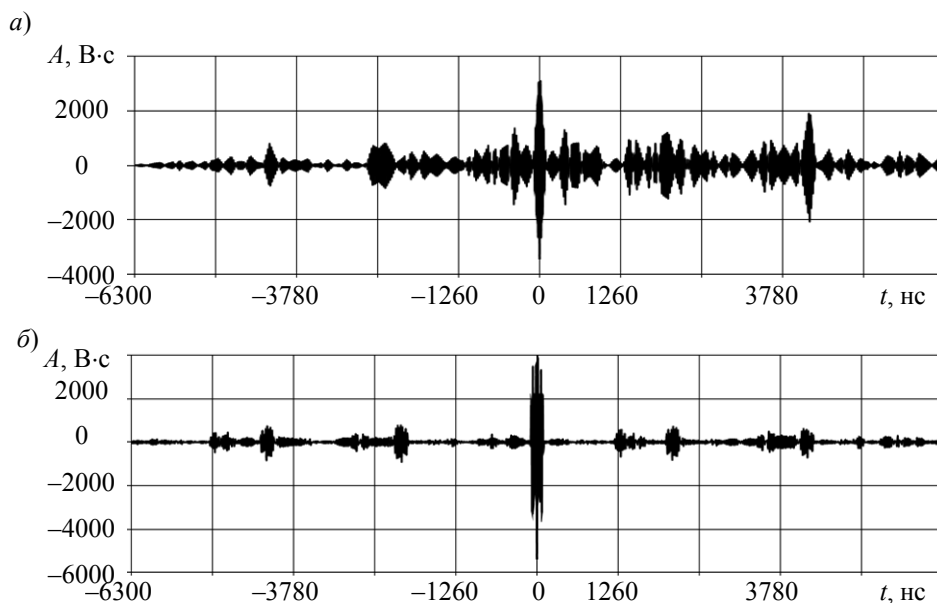


Рис. 5

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 отработка 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. Firsenskov 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. *Energiya: 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 sloistyykh 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. *Radioelektronnaye 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.