

А. С. Коренчук¹, В. Ф. Дмитриев¹¹ АО «НПП «Радар ммс»»

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПРОСА РАДИОМЕТОК НА ПОВЕРХНОСТНО-АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ В СИСТЕМАХ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛЧМ-СИГНАЛОВ

Представлены результаты численного моделирования работы системы радиочастотной идентификации с радиометками на поверхностных акустических волнах при использовании опросного ЛЧМ-сигнала. Особенностью рассмотренного принципа работы системы радиочастотной идентификации является использование сложного сигнала для опроса радиометки на поверхностных акустических волнах, формируемого в устройстве опроса, и применение корреляционной обработки при приеме сигнала-отклика радиометки, что позволяет повысить помехоустойчивость и дальность действия систем радиочастотной идентификации поверхностных акустических волн.

Ключевые слова: радиочастотная идентификация, поверхностные акустические волны, РЧИД, поверхностно-акустические волны (ПАВ), шумоподобные сигналы, сложные сигналы, линейно-частотная модуляция (ЛЧМ).

Введение

Одним из перспективных и бурно развивающихся направлений радиоэлектроники в последние годы является радиочастотная идентификация (РЧИД). Основными областями применения систем радиочастотной идентификации являются маркировка различных товаров (лекарственных препаратов, предметов одежды и т.д.), грузов, автомобильного и железнодорожного транспорта, а также системы инвентаризации и учета на складах и др.

Радиометки на поверхностных акустических волнах (ПАВ) обладают рядом преимуществ перед другими технологиями бесконтактной идентификации: отсутствие встроенных источников питания, широкий диапазон рабочих температур, высокая радиационная стойкость, большая дальность действия, большой срок службы радиометок, высокое быстродействие.

На сегодняшний день актуальной задачей является повышение дальности действия и помехоустойчивости систем РЧИД с радиометками на ПАВ. При решении ряда задач, таких как идентификация быстродвижущегося автомобильного транспорта в системах контроля и управления доступом, когда проезд транспорта через контрольно-пропускной пункт, оборудованный, например, шлагбаумом, должен обеспечиваться без снижения скорости движения, идентификация объектов с беспилотного летательного аппарата (например, поиск отбившихся от стада сельскохозяйственных животных) и др.,

необходимо обеспечить дальность считывания радиометок более 40–50 м.

В современных системах связи, например CDMA (Code Division Multiplexing Access), широко применяются шумоподобные сигналы (ШПС), называемые также «сложными сигналами». Они обеспечивают высокую помехозащищенность систем связи при воздействии мощных помех, а также лучшее использование спектра частот [1]. В радиолокации ШПС (например, фазокодоманипулированные) и сложные сигналы с линейной частотной модуляцией применяются для повышения разрешающей способности радиолокационных систем (РЛС) по дальности и повышения их помехоустойчивости [2].

В работах [3, 4] предлагалось использовать для опроса радиометок и датчиков на ПАВ сверхширокополосный (СШП) линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) сигнал с полосой 500 МГц. При этом сжатие опросного сигнала осуществлялось в линейно-частотно-модулированном встречно-штыревым преобразователе (ВШП) радиометки. Сжатый импульс распространялся по пьезоэлектрической подложке, отражался от рефлекторов, нанесенных на подложку, снова принимался ВШП, преобразовывался обратно в ЛЧМ-сигнал и переизлучался в сторону антенны устройства опроса. В устройстве опроса снова выполнялось сжатие сигнала-отклика радиометки и его обработка. Основными задачами, которые решались при использовании опросного

СШП ЛЧМ-сигнала, были уменьшение линейных размеров чувствительного элемента радиометки, уменьшение начальной задержки сигнала-отклика радиометки и борьба с эхо-сигналами от окружающих объектов.

Использование ЛЧМ ВШП значительно увеличивает потери, вносимые радиометкой. С точки зрения повышения помехоустойчивости систем РЧИД ПАВ, целесообразнее выполнять корреляционную обработку сигнала-отклика радиометок на ПАВ в считывающем устройстве без использования корреляционной обработки в самой радиометке. Поэтому в настоящей работе, в отличие от [3, 4], рассматривается принципиальная возможность реализации системы РЧИД с радиометками на ПАВ, использующей в качестве сигнала опроса радиометки ЛЧМ-сигнал, причем корреляционная обработка принятого сигнала-отклика радиометки выполняется только в устройстве опроса.

Принцип работы радиометки на ПАВ в составе системы радиочастотной идентификации

Принцип работы систем РЧИД на ПАВ представлен на рис. 1.

Система РЧИД состоит из устройства опроса (приемопередатчика), антенны устройства опроса и радиометок на ПАВ, каждая из которых состоит из антенны и пьезоэлектрической подложки. Устройство опроса периодически генерирует высокочастотный радиоимпульс опроса, который излучается посредством его антенны. Если радиометка на ПАВ попадает в область диаграммы направленности антенны устройства опроса, часть излучаемой энергии принимается антенной радиометки на ПАВ и поступает на встречно-штыревой преобразователь (ВШП), нанесенный на поверхность подложки из пьезоэлектрического кристалла. ВШП преобразует электромагнитный сигнал в поверхностную акустическую волну, которая распространяется по поверхности пьезоэлектрической подложки. В радиометках на ПАВ, широко применяемых в настоящее время [3]

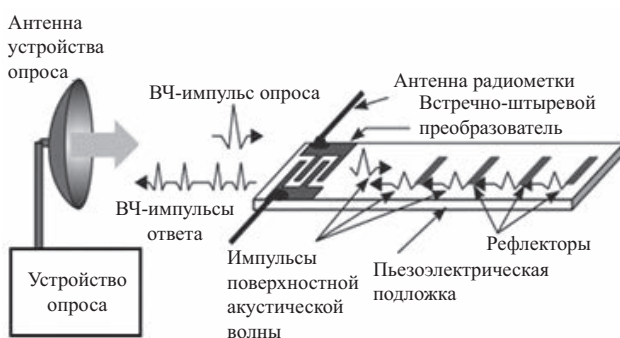


Рисунок 1. Принцип работы системы РЧИД на ПАВ

и построенных по принципу отражательной линии задержки с набором рефлекторов, часть энергии поверхностной волны отражается от каждого рефлектора и движется обратно к ВШП. Таким образом, из одного импульса опроса формируется несколько ответных импульсов, причем каждый рефлектор создает в ответном сигнале радиометки на ПАВ свой импульс. Эта последовательность импульсов, определяющая код радиометки, полученная входным ВШП и преобразованная в высокочастотную последовательность электромагнитных импульсов, переизлучается антенной радиометки и может быть принята устройством опроса. Число принимаемых импульсов соответствует числу рефлекторов, нанесенных на поверхность подложки.

Использование ЛЧМ-сигналов в системах РЧИД с радиометками на ПАВ

Радиометку на ПАВ в области частот вблизи некоторой частоты f_0 можно представить в виде фильтра, импульсная характеристика $h(t)$ которого представляет собой последовательность элементов импульсной характеристики (ИХ) в виде радиоимпульсов

$$h(t) \sim \sum_{k=0}^{N-1} A_0 c_k E(t - k\tau_0) \sin(2\pi f_0(t - k\tau_0 - t_3)), \quad (1)$$

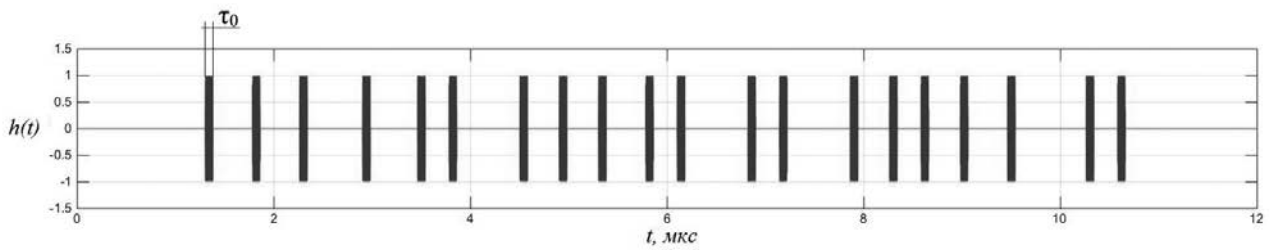
где N – число возможных позиций импульсов в ИХ радиометки, A_0 – амплитуда элемента ИХ, c_k – порождающая матрица ИХ размерности $1 \times N$, состоящая из элементов $\{1, 0\}$ и определяющая положение элементов в ИХ, $E(t)$ – функция огибающей элемента ИХ ($E(t) = 1$ при $k\tau_0 \leq t \leq (k+1)\tau_0$ – прямоугольная огибающая), f_0 – центральная рабочая частота радиометки, τ_0 – длительность элемента ИХ, t_3 – начальная задержка сигнала в радиометке.

В качестве примера будет рассмотрена радиометка с ИХ, представленной на рис. 2а. На рис. 2б представлена ее нормированная спектральная характеристика. Параметры радиометки на ПАВ следующие: центральная рабочая частота $f_0 = 915$ МГц, длительность элемента ИХ $\tau_0 = 80$ нс, полоса рабочих частот $\Delta f = 2 / \tau_0 \approx 25$ МГц, $t_3 = 1,3$ мкс, порождающая матрица ИХ размерности 1×120 $c_k =$

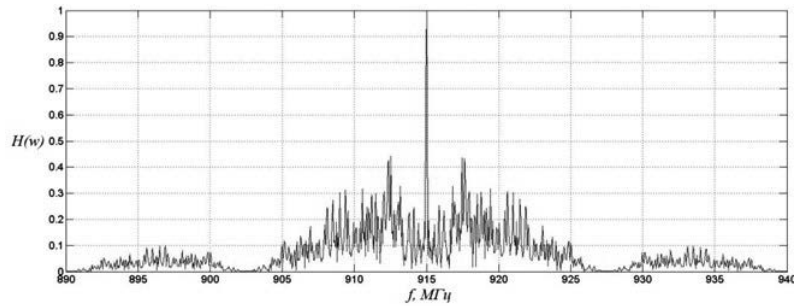
$$= \begin{pmatrix} 100000100000100000001000000100 \\ 010000000010000100001000001000 \\ 100000000100010000000010000100 \\ 010000100000100000000010001000 \end{pmatrix}.$$

Общая длительность сигнала $T_h = t_3 + N\tau_0 = 10,9$ мкс.

Параметры радиометки, ИХ которой представлена на рис. 2а, соответствуют параметрам систем РЧИД, работающих в разрешенном ISM-диапазоне 902–928 МГц.



а)



б)

Рисунок 2. Импульсная и нормированная спектральные характеристики радиометки на ПАВ

Исторически к числу первых открытых сигналов, обладающих эффектом временной компрессии при согласованной фильтрации, относится импульсный сигнал ЛЧМ. Как следует из названия, мгновенная частота этого сигнала линейно изменяется в течение его длительности [5].

Мгновенная частота ЛЧМ-сигнала $f(t)$ возрастает во времени по закону

$$f(t) = f_n + \frac{W_d t}{T}, 0 \leq t \leq T,$$

где W_d – девиация частоты, f_n – начальная частота сигнала, T – длительность сигнала.

Запросный ЛЧМ-сигнал описывается выражением

$$S(t) = A(t) \cos\left(2\pi f_n t + \frac{\pi W_d t^2}{T}\right), 0 \leq t \leq T, \quad (1)$$

где $A(t)$ – огибающая сигнала.

Полная ширина основного лепестка автокорреляционной функции (АКФ) ЛЧМ-сигнала с прямоугольной огибающей составляет $2\tau_c = 2/W_d$. При согласованной фильтрации происходит временная компрессия ЛЧМ-сигнала в $W_d T$ раз. Пиковая амплитуда сжатого ЛЧМ-импульса увеличивается в $\sqrt{TW_d}$ раз [5]. Уровень боковых лепестков АКФ ЛЧМ-сигнала имеет уровень, равный $2/3\pi \approx 0,21$ (–13 дБ) и не зависит от базы сигнала $W_d T$, $W_d T \gg 1$ [5].

На рис. 3а представлен график спектра ЛЧМ-сигнала с прямоугольной огибающей со следующими параметрами: $f_n = 902$ МГц, $W_d = 26$ МГц, $T = 5$ мкс, на рис. 3б представлена его АКФ

$$R(t) \sim \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau) S^*(t - \tau) d\tau, \quad (2)$$

где $S^*(t) = S(-t)$ – сигнал, согласованный с опросным ЛЧМ-сигналом.

Амплитуда сжатого ЛЧМ-сигнала увеличивается в $\sqrt{TW_d} = 11,4$ раза, что соответствует выигрышу от обработки 21,1 дБ.

Параметры сигнала выбраны с учетом разрешенного диапазона частот для систем РЧИД (ISM-диапазон).

Сигнал-отклик радиометки на ПАВ (рис. 4) в ответ на запросный сигнал ЛЧМ можно описать как

$$S1(t) \sim \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau) h(t - \tau) d\tau. \quad (3)$$

Выражение (3) с учетом (1) дает следующий результат:

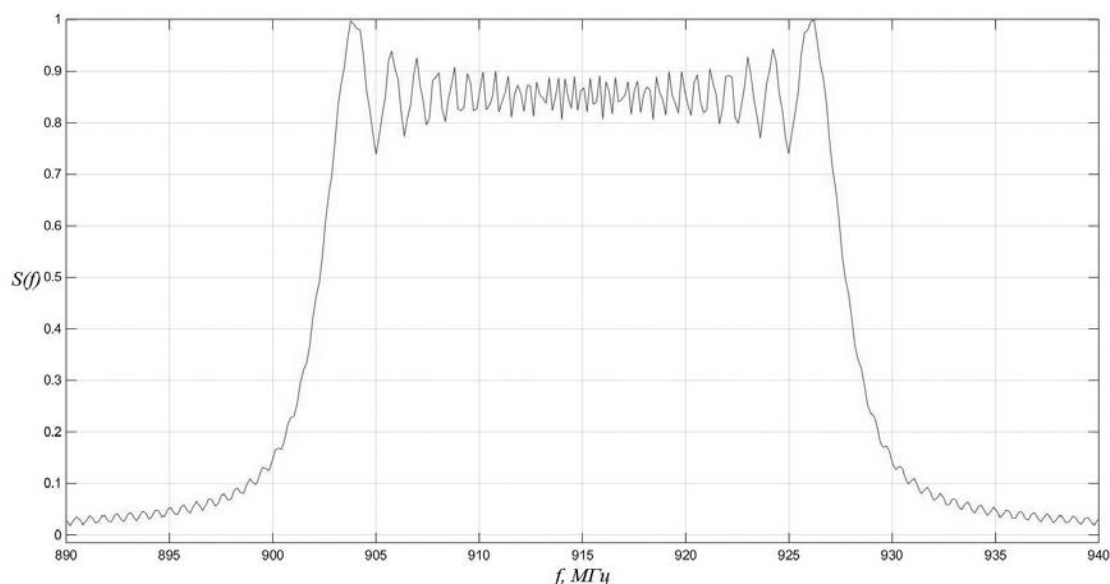
$$S1(t) \sim \sum_{k=0}^{N-1} A_0 c_k \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau) E(t - k\tau_0 - \tau) \sin[2\pi f_0(t - k\tau_0 - \tau)] d\tau. \quad (4)$$

В соответствии с (4) сигнал-отклик радиометки на ПАВ является суммой сверток запросного сигнала с каждым элементом ИХ радиометки.

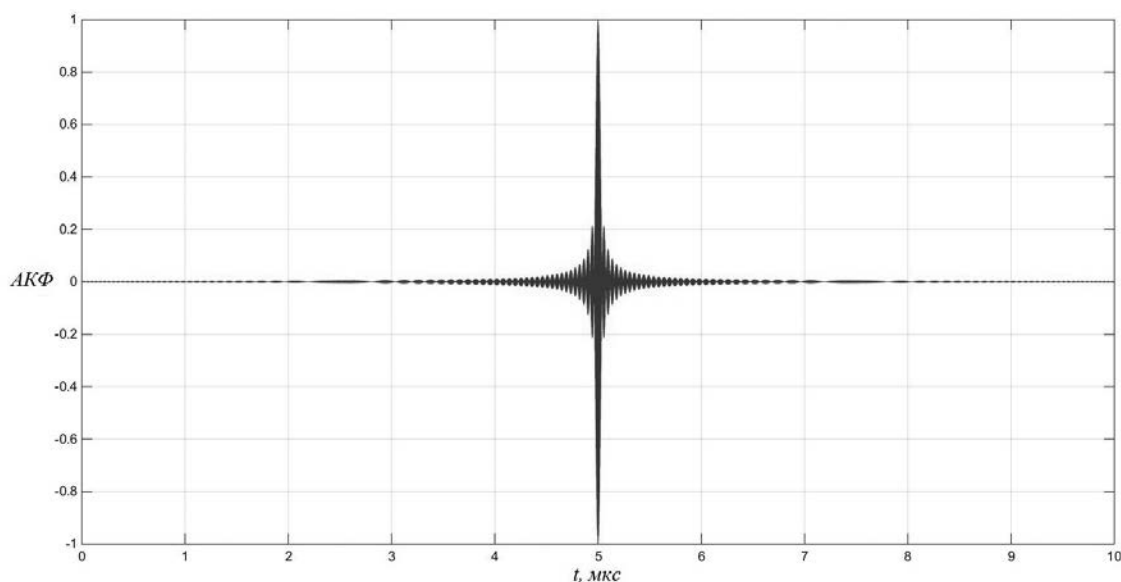
Результат корреляционной обработки сигнала-отклика радиометки в устройстве опроса может быть представлен как

$$S2(t) \sim \int_{-\infty}^{\infty} S1(\tau) S(\tau - t) d\tau. \quad (5)$$

Используя выражения (2), (3), (5) и теорему о свертке сигналов, легко показать, что результат



а)



б)

Рисунок 3. Нормированный амплитудный спектр и нормированная АКФ ЛЧМ-сигнала с параметрами $f_H = 902$ МГц, $W_d = 26$ МГц, $T = 5$ мкс

корреляционной обработки сигнала-отклика радиометки в устройстве опроса будет описываться следующим выражением:

$$S2(\tau) \sim \int_{-\infty}^{\infty} R(t)h(t-\tau)dt. \quad (6)$$

Таким образом, результат корреляционной обработки сигнала-отклика радиометки в устройстве опроса является сверткой корреляционной функции запросного сигнала и импульсной характеристики радиометки. Подставив выражение (1) в выражение (6), окончательно получим

$$S2(\tau) \sim \sum_{k=0}^{N-1} A_0 c_k \int_{-\infty}^{\infty} R(t)E(t-\tau-k\tau_0) \sin \times \quad (7) \\ \times [2\pi f_0(t-\tau-k\tau_0-t_3)] dt.$$

Выражение (7) показывает, что результирующий сигнал, полученный после корреляционной обработки сигнала-отклика радиометки в устройстве опроса (рис. 5), может быть представлен в виде суммы свертки корреляционной функции запросного ЛЧМ-сигнала с каждым элементом импульсной характеристики радиометки.

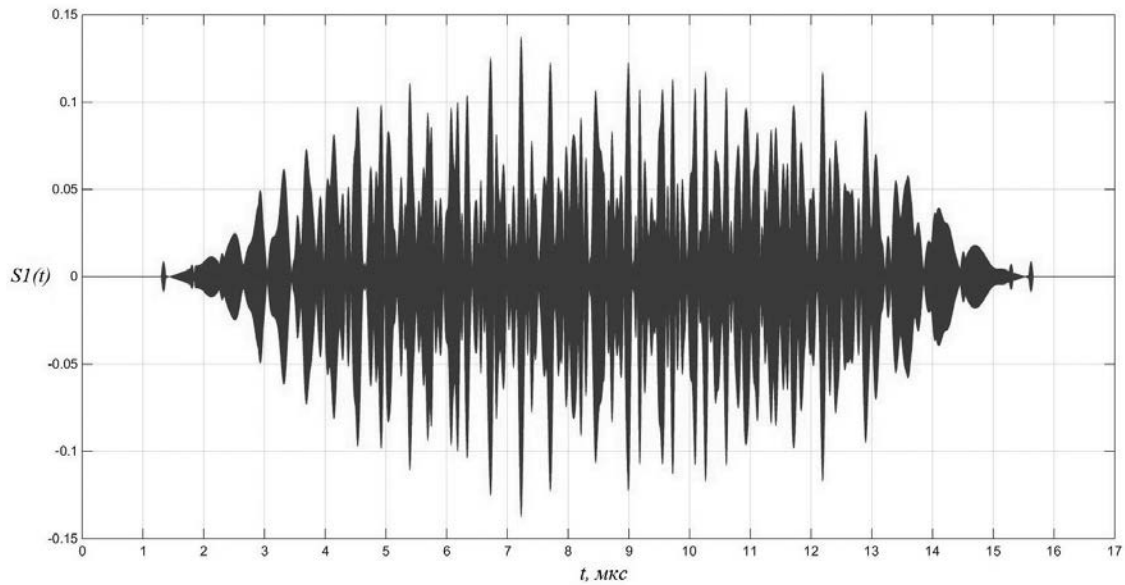


Рисунок 4. Сигнал-отклик радиометки на ПАВ

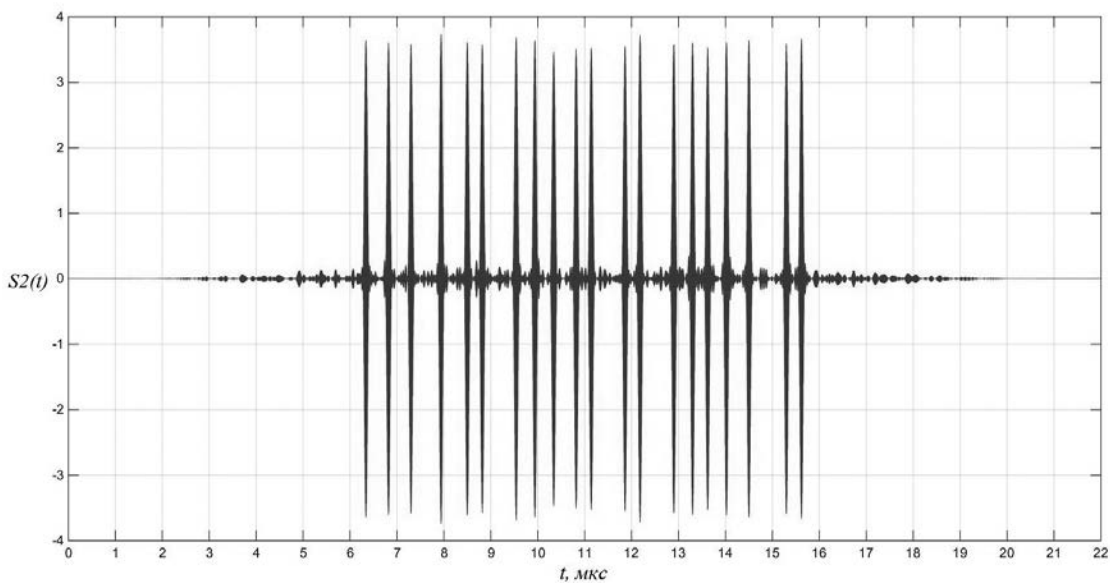


Рисунок 5. Результат корреляционной обработки сигнала-отклика радиометки

В рассмотренном примере амплитуда сжатых импульсов имеет неравномерность. Максимальное значение амплитуды сжатых импульсов составляет 3,74 отн. ед., минимальное значение – 3,46 отн. ед. Максимальный уровень боковых лепестков составляет не более 0,35 отн. ед. Уровень боковых лепестков после корреляционной обработки сигнала-отклика радиометки относительно сжатого импульса с минимальной амплитудой не превышает 0,094 (–20,5 дБ). На рис. 6 показано, что взаимное положение сжатых импульсов после корреляционной обработки сигнала-отклика радиометки полностью

соответствует положению элементов импульсной характеристики радиометки.

Неравномерность амплитуды сжатых импульсов связана с наложением боковых лепестков корреляционных функций при свертке с каждым элементом импульсной характеристики радиометки. Заметное снижение уровня боковых лепестков связано с тем, что огибающие амплитудного спектра ЛЧМ-сигнала (рис. 3а) и спектра радиометки на ПАВ (рис. 2б) имеют разную форму. Это приводит к весовой обработке огибающей амплитудного спектра запросного ЛЧМ-сигнала при его прохождении через

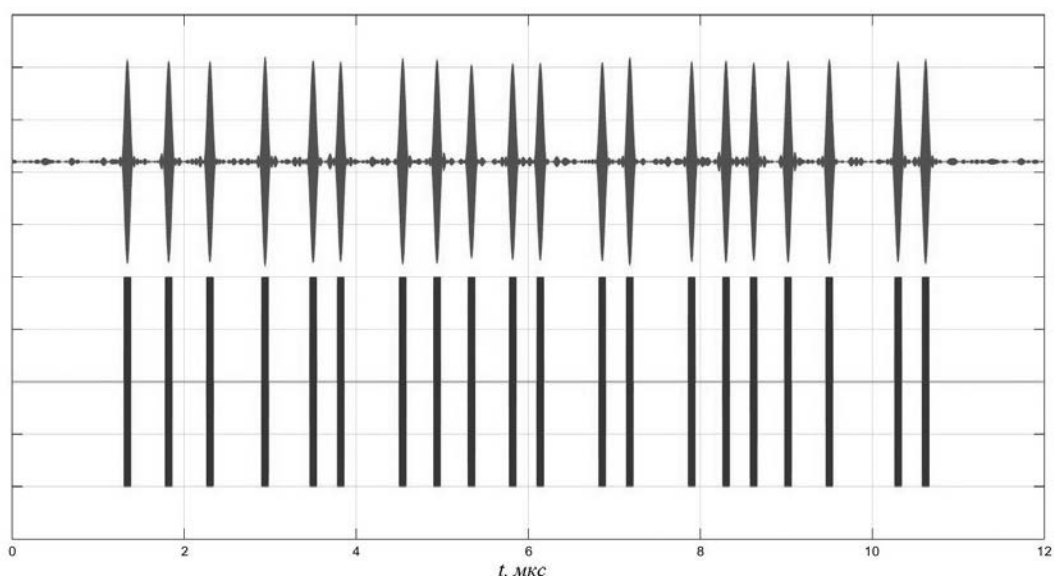


Рисунок 6. Взаимное положение сжатых импульсов относительно элементов импульсной характеристики радиометки

радиометку и, соответственно, весовой обработке сигнала во временной области.

Заключение

В статье показано, что ЛЧМ-сигналы могут быть использованы в системах РЧИД для опроса радиометок на ПАВ с применением корреляционной обработки принятого отклика в устройстве опроса. Применение согласованной фильтрации

обеспечивает увеличение амплитуды сжатых импульсов ответного сигнала радиометки. Увеличение амплитуды сжатых импульсов при корреляционной обработке ответного сигнала радиометки из-за различий в форме огибающей амплитудного спектра ЛЧМ-сигнала и спектральной характеристики радиометки на ПАВ будет меньше, чем при согласованной фильтрации ЛЧМ-сигнала, составляющей величину $\sqrt{TW_d}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
2. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. М.: Советское радио, 1971. 568 с.
3. Plesky V., Reindl L. Review on SAW RFID-tags. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. IEEE Transactions on ... 2010. Vol. 57. no. 3. pp. 654–668.
4. Plesky V., Lamothe V. Ultra-wide-band SAW RFID-sensors. European Frequency and Time Forum (EFTF). 2014. pp. 16–23.
5. Ипатов В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. М.: Техносфера, 2007. 488 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коренчук Андрей Сергеевич, заместитель начальника отдела, АО «НПП «Радар ммс»», 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, korenchuk_as@radar-mms.com.

Дмитриев Валерий Федорович, д.т.н., доцент, главный научный сотрудник, АО «НПП «Радар ммс»», 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, dmitriev_vf@radar-mms.com.

*For citation: Voprosy radioelektroniki. – 2016. – № 9. – P. 28–34.
A. Korenchuk, V. Dmitriev*

NUMERICAL SIMULATION OF INTERROGATION OF SAW TAGS IN RFID SYSTEMS USING LFM SIGNALS

The numerical simulation results of operating RFID system with SAW tags using LFM interrogation signal are presented. The particularity of the considered RFID system operation mode is the use of composite signal generated in the inquiry unit to interrogate SAW tag and the use of correlation processing when receiving tag response signal. This operation mode improves interference resistant and operating range of SAW RFID systems.

Keywords: radiofrequency identification, surface acoustic waves, RFID, SAW, noise-like signals, composite signals, LFM.

REFERENCES

1. Varakin L. E. *Sistemy svjazi s shumopodobnymi signalami* [Spread spectrum communications]. M.: Radio i svjaz', 1985. 384 p.
2. Kuk Ch., Bernfel'd M. *Radiolokacionnye signaly* [Radar signals]. M.: Sovetskoe radio, 1971. 568 p.
3. Plesky V., Reindl L. Review on SAW RFID-tags. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. IEEE Transactions on ...* 2010, Vol. 57, no. 3, pp. 654–668.
4. Plesky V., Lamothe V. Ultra-wide-band SAW RFID-sensors. European Frequency and Time Forum (EFTF), 2014, pp. 16–23.
5. Ipatov V. P. *Shirokopolosnye sistemy i kodovoe razdelenie signalov. Printsipy i prilozheniya* [Wideband communication system and signal code division. Principles and Applications]. M.: Tekhnosfera, 2007. 488 p.

AUTHORS

Korenchuk Andrei, Deputy Head of Department, «NPP “Radar mms”» JSC, 37, Novoselkovskaya st., Saint-Petersburg, 197375, korenchuk_as@radar-mms.com.

Dmitriev Valerii, Dr. Sc. in Technical Sciences, Associate Professor, Senior Research Fellow, «NPP “Radar mms”» JSC, 37, Novoselkovskaya st., Saint-Petersburg, 197375, dmitriev_vf@radar-mms.com.