

А. С. Коренчук, В. Ф. Дмитриев

АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»», Санкт-Петербург, Россия

КОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОМЕТОК НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР

Представлены результаты численного моделирования температурного кода в виде пятисимвольного кода Баркера для компенсации искажений импульсной характеристики радиометки на ПАВ с время-позиционным фазоманипулированным кодом. Исследованы зависимости максимума ВКФ пятисимвольного кода Баркера от температуры для различных вариантов взаимного расположения отдельных импульсов, формирующих температурный код.

Ключевые слова: радиочастотная идентификация, поверхностные акустические волны, РЧИД, ПАВ, сложные сигналы, ФКМ, фазовая кодовая манипуляция, код Баркера.

Для цитирования: Коренчук А. С., Дмитриев В. Ф. Компенсация температурных искажений импульсной характеристики радиометок на поверхностных акустических волнах в широком интервале рабочих температур // Радиопромышленность. 2017. № 2. С. 18–24.

A. S. Korenchuk, V. F. Dmitriev

Joint-stock Company «Research and Production Enterprise «Radar mms»», Saint-Petersburg, Russia

COMPENSATION OF TEMPERATURE DISTORTIONS OF PULSE CHARACTERISTICS OF RFID ON THE SURFACE OF ACOUSTIC WAVES WITHIN A WIDE INTERVAL OF WORKING TEMPERATURES

The results of numerical simulation of the temperature code in the form of the five-symbol Barker code for compensation of distortion of the impulse characteristics of the RF tag on the SAW with the time-positioned phase-shift keyed code have been presented. The dependences of the maximum of the WCF of the five-symbol Barker code on the temperature for multiple options of the mutual arrangement of individual pulses forming the temperature code have been investigated.

Keywords: radio frequency identification, surface acoustic waves, RFID, SAW, complex signals, PCM, phase code keying, Barker code.

For citation: Korenchuk A. S., Dmitriev V. F. Compensation of temperature distortions of pulse characteristics of RFID on the surface of acoustic waves within a wide interval of working temperatures. Radiopromyshlennost, 2017, no. 2, pp. 18–24 (In Russian).

Введение

Одним из перспективных и активно 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: широкий диапазон рабочих температур, высокая радиационная стойкость, большая дальность действия, большой срок службы радиометок. Недостатком существующих радиометок на ПАВ является наличие зависимости импульсной характеристики (ИХ) радиометки или ее импульсного отклика от температуры окружающей среды. Этот недостаток обусловлен температурной зависимостью скорости ПАВ в материале чувствительного элемента радиометки [1]. В связи с этим диапазон рабочих температур, в котором возможно обеспечить устойчивую идентификацию кода радиометки на ПАВ без применения дополнительных мер, ограничен. Наиболее популярным материалом, используемым в радиометках на ПАВ, является ниобат лития (LiNbO_3), применение которого позволяет добиться приемлемых потерь сигнала в радиометке на ПАВ. При применении термостабильных материалов (например, пьезокварца) радиометка на ПАВ будет иметь недопустимо большие потери, что является существенным фактором, ограничивающим дальность действия системы РЧИД. Искажения ИХ или ответного кодированного сигнала радиометки на ПАВ при изменении температуры окружающей среды усиливаются при увеличении длины позиционного кода радиометки. В случае применения фазоманипулированных (ФМ) кодов, которые позволяют увеличить информационную емкость радиометок на ПАВ [2], а также частично решить проблему коллизий при одновременном приеме сигналов от нескольких радиометок [3], определение ее идентификационного кода становится практически невозможным без применения температурной коррекции.

В работе [4] предложена конструкция радиометки на ПАВ и метод коррекции температурных изменений импульсного отклика радиометки, основанный на корреляционной обработке части ответного сигнала радиометки, содержащего фиксированный код. Очевидно, что фиксированный код, используемый для компенсации температурных искажений импульсного отклика радиометки на ПАВ (далее – температурный код), должен удовлетворять следующим требованиям:

- Для формирования температурного кода должно использоваться минимальное пространство чувствительного элемента радиометки на ПАВ с тем, чтобы сохранить максимальную полезную информационную емкость и минимальные вносимые потери радиометки.
- Температурный код должен обеспечивать однозначное определение температуры радиометки на ПАВ в рабочем интервале температур.

В данной работе рассмотрена конструкция разрабатываемой радиометки на ПАВ с полезной информационной емкостью 32 бита, содержащей температурный код, габаритные размеры чувствительного элемента которой позволяют установить этот элемент в металлокерамический корпус типа DLCC22/22–1, а также представлены результаты численных исследований свойств подобранного температурного кода, позволяющего компенсировать температурные искажения ИХ радиометки в широком диапазоне температур: от -60 до 100 °С.

Структура время-позиционного фазоманипулированного кода радиометки на ПАВ с возможностью компенсации температурных искажений ИХ

Принцип действия радиометки на ПАВ представлен на рис. 1.

Радиометка на ПАВ состоит из антенны и пьезоэлектрической подложки (чувствительного элемента), который помещается в герметичный защитный корпус. Устройством опроса периодически генерируется 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

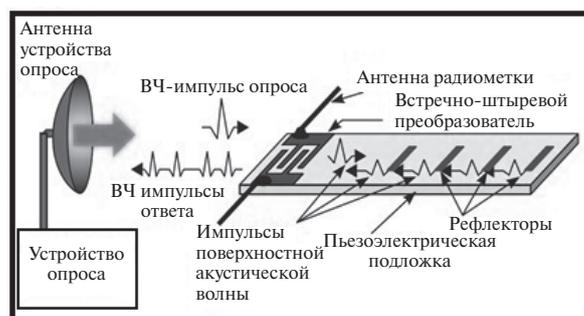


Рисунок 1. Принцип действия радиометки на ПАВ

акустическую волну, которая распространяется по поверхности пьезоэлектрической подложки. В радиометках на ПАВ [5], построенных по принципу отражательной линии задержки с набором рефлекторов, широко применяемых в настоящее время, 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.

На рис. 2 представлена структура время-позиционного ФМ-кода разрабатываемой радиометки на ПАВ с центральной рабочей частотой $f_0 = 915$ МГц, длительностью отдельного импульса в ответном сигнале $\tau_0 \approx 60$ нс, полосой рабочих частот $\Delta f \approx 26$ МГц и вносимой начальной задержкой ответного сигнала $t_3 = 2$ мкс, в качестве чувствительного элемента которой выступает пьезоэлектрическая подложка из ниобата лития с нанесенными на ней ВШП и группами рефлекторов.

Время-позиционный ФМ-код рассматриваемой радиометки на ПАВ (рис. 2) определяет положение импульсов в ее ответном сигнале при нормальной температуре окружающей среды ($T_0 = 20$ °С) и включает в себя:

- стартовый временной слот, в котором всегда располагается импульс ответного сигнала метки;
- 8 групп по 8 временных слотов в каждой группе, формирующих идентификационный код радиометки длиной 32 бита. Импульсы ответного сигнала, формирующие идентификационный код радиометки, могут располагаться только в одном из временных слотов каждой группы, при этом начальная фаза несущей каждого импульса

в ответном сигнале может принимать значения 0 или π относительно начальной фазы несущей стартового импульса;

- группу контрольной суммы, в одном из временных слотов которой, согласно определенному правилу, располагается импульс ответного сигнала, начальная фаза несущей которого также может принимать значения 0 или π относительно начальной фазы несущей стартового импульса;
- 4 группы по 6 временных слотов и одну группу с 4 временными слотами, предназначенные для формирования температурного кода радиометки.

Общая длительность ответного сигнала радиометки на ПАВ ($t_{общ} = 8,66$ мкс) определяется габаритными размерами подложки из ниобата лития, максимально допустимыми для ее установки в корпус DLCC22/22-1.

Ответный сигнал радиометки может быть искажен (растянут или сжат во времени) температурной вариацией скорости в пьезопластине радиометки. Величина растяжения или сжатия во времени ответного сигнала отклика радиометки определяется коэффициентом масштабирования ζ_i согласно соотношению

$$\zeta_i = 1 - (T_i - T_0)\alpha, \quad (1)$$

где T_i – текущая температура радиометки; $T_0 = 20$ °С, $\alpha = -94 \cdot 10^{-6}$ градус⁻¹ – температурный коэффициент задержки для ниобата лития YZ-среза.

Таким образом, если импульс в ответном сигнале радиометки находится в последнем временном слоте 5-й группы температурного кода, то при температуре радиометки $T_0 = 20$ °С его задержка составит 8,6 мкс, а при температуре $T = 100$ °С задержка составит 8,664 мкс, т.е. временное положение импульса сместится на 64 нс, что превышает длительность временного слота.

Выбор температурного кода радиометки на ПАВ и исследование его характеристик

В качестве температурного кода радиометки на ПАВ был выбран пятисимвольный код Баркера

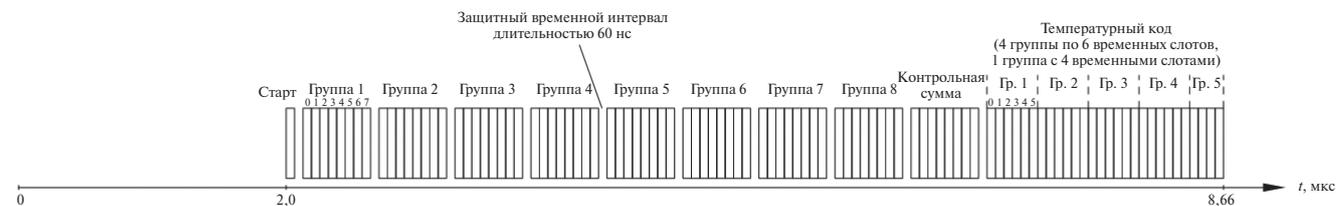


Рисунок 2. Структура время-позиционного ФМ-кода радиометки на ПАВ с возможностью компенсации температурных искажений ИХ

{1, 1, 1, -1, 1}, обладающий лучшими корреляционными свойствами по сравнению с другими ФМ-сигналами такой же длины.

Рассмотрим случай, когда все отдельные импульсы, формирующие пятисимвольный код Баркера, расположены в одной из групп, образующих температурный код ответного сигнала радиометки, как показано на рис. 3.

Исследование возможности применения представленного на рис. 3 температурного кода $S_{temp, T_0}(t)$ для температурной коррекции принятого сигнала от радиометки на ПАВ с использованием алгоритма, приведенного в [4], выполнялось на основе анализа изменения уровня максимума ВКФ исходного температурного кода с его отмасштабированными во времени копиями, которые соответствуют изменению температуры радиометки, следующим образом:

1. Вначале было получено семейство функций $S_{temp, T_i}(t)$, представляющих собой отмасштабированные во времени в соответствии с (1) копии исходного сигнала $S_{temp, T_0}(t)$ в диапазоне температур от -120 до 200 °С с шагом в 1 °С. Расширение температурного диапазона, в котором производились исследования, как минимум в два раза связано с необходимостью проверки наличия побочных температурных максимумов ВКФ, которые могут дать неверный результат определения температуры радиометки, в том числе когда температура радиометки достигает границ (или приближается к границам) рабочего диапазона, то есть принимает значения, близкие к -60 или 100 °С. В этом случае близко расположенные к интервалу рабочих температур побочные максимумы ВКФ не позволят однозначно определить температуру радиометки.



Рисунок 3. Расположение импульсов в отклике радиометки на ПАВ, формирующих температурный код в виде кода Баркера {1, 1, 1, -1, 1} (закрашенные области)

2. Вычислены взаимные корреляционные функции (ВКФ) $\xi_{Ti}(t)$ полученного семейства функций температурного кода радиометки на ПАВ $S_{temp, T_i}(t)$ с температурным кодом при нормальной температуре $S_{temp, T_0}(t)$:

$$\xi_{Ti}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{temp, T_0}(\tau) S_{temp, T_i}(\tau - t) d\tau. \quad (2)$$

3. На основе полученных зависимостей ВКФ $\xi_{Ti}(t)$ строится зависимость максимумов ВКФ $\xi_{Ti}(Ti)$ от температуры.

График зависимости максимума ВКФ $\xi_{Ti}(Ti)$ для температурного кода в виде кода Баркера {1, 1, 1, -1, 1}, состоящего из расположенных в одной группе импульсов, представлен на рис. 4.

Уровень побочных температурных максимумов в диапазоне температур от -120 до 200 °С составляет порядка -13,9 дБ относительно максимума ВКФ при истинной температуре радиометки, однако

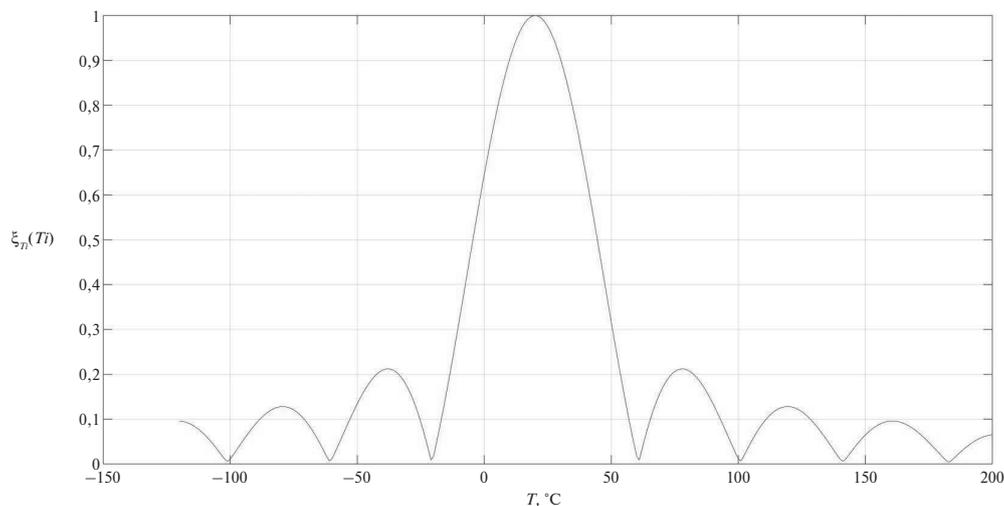


Рисунок 4. График зависимости максимума ВКФ от температуры $\xi_{Ti}(Ti)$ для температурного кода в виде кода Баркера {1, 1, 1, -1, 1}, состоящего из импульсов, расположенных в одной группе



Рисунок 5. Расположение импульсов в отклике радиометки на ПАВ, формирующих температурный код в виде кода Баркера {1, 1, 1, -1, 1} (закрашенные области)

ширина основного «лепестка» температурной зависимости по уровню 0,5 составляет приблизительно 50 °С (от -5 до 45 °С).

Анализ графика, приведенного на рис. 4, показывает, что температурный код, соответствующий рис. 3, позволяет однозначно определить температуру радиометки на ПАВ, однако из-за плавного изменения максимума ВКФ при изменении температуры радиометки точность определения температуры может оказаться недостаточной.

В связи с этим рассмотрим случай, когда отдельные импульсы, формирующие код Баркера {1, 1, 1, -1, 1}, расположены в одном и том же временном слоте каждой из групп, образующих температурный код ответного сигнала радиометки, как показано на рис. 5.

Зависимость максимума ВКФ $\xi_{Tl}(Ti)$ от температуры для варианта расположения импульсов в температурном коде радиометки в соответствии с рис. 5 представлена на рис. 6.

При расположении импульсов, формирующих температурный код радиометки в виде кода Баркера {1, 1, 1, -1, 1}, в одном временном слоте каждой группы проявляется периодический характер зависимости максимума ВКФ от температуры. Максимальный уровень побочных температурных максимумов в диапазоне температур от -60 до 100 °С составляет порядка -0,44 дБ, однако ширина основного «лепестка» температурной зависимости по уровню 0,5 составляет всего 8 °С (от 16 до 24 °С).

Анализ графика, приведенного на рис. 6, показывает, что температурный код, соответствующий рис. 5, не позволяет однозначно определить температуру радиометки на ПАВ, однако из-за наличия резкого спада максимума ВКФ при изменении температуры может быть обеспечена высокая точность определения температуры радиометки на ПАВ в очень узком диапазоне температур.

Для обеспечения температурной компенсации искажений ИХ радиометки на ПАВ необходимо подобрать такой температурный код, зависимость ВКФ которого от температуры обладала бы следующими свойствами:

- минимально возможным уровнем побочных температурных максимумов;
- максимально резким спадом ВКФ при изменении температуры.

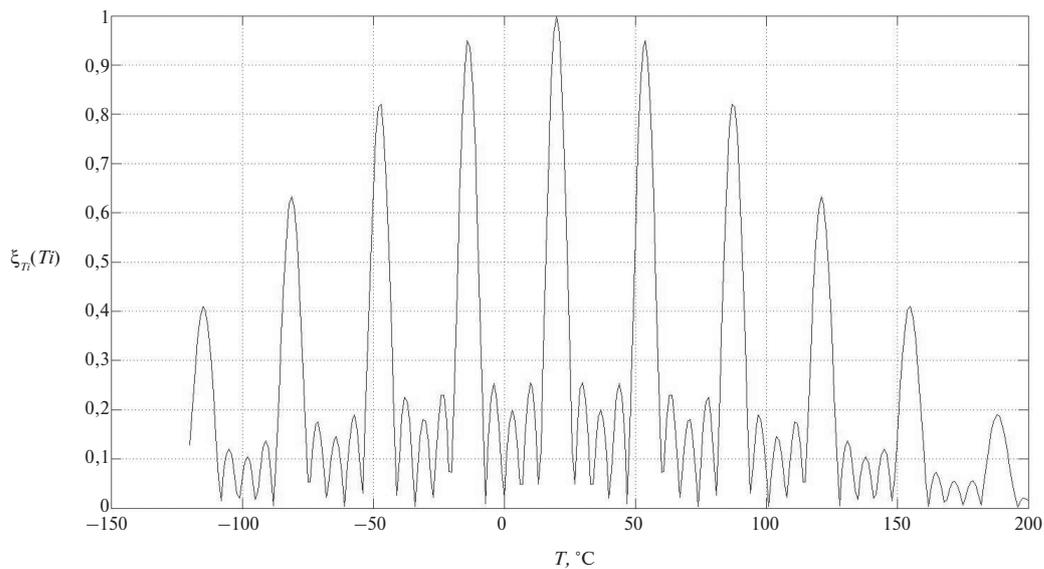


Рисунок 6. График зависимости максимума ВКФ от температуры $\xi_{Tl}(Ti)$ для температурного кода в виде кода Баркера {1, 1, 1, -1, 1}, состоящего из импульсов, расположенных в одном и том же временном слоте разных групп

Методом простого перебора был выполнен поиск температурного кода, зависимость ВКФ которого от температуры обладала бы желаемыми характеристиками. При этом поиск производился только для тех случаев, когда отдельные импульсы, формирующие температурный код в виде кода Баркера, находятся в разных группах, формирующих температурный код радиометки. На рис. 7 показаны временные слоты, в которых располагаются отдельные импульсы найденного температурного кода. На рис. 8 показана зависимость его ВКФ от температуры.

Максимальный уровень побочных температурных максимумов в диапазоне температур от -120 до 200 °С составляет порядка $-5,5$ дБ, однако ширина основного «лепестка» температурной зависимости по уровню $0,5$ составляет порядка 10 °С (от 15 до 25 °С).

Анализ графика, приведенного на рис. 8, показывает, что температурный код, соответствующий рис. 7, позволяет однозначно определить температуру радиометки на ПАВ в диапазоне температур от -60 до 120 °С, а наличие резкого спада максимума ВКФ при изменении температуры позволяет обеспечить более высокую точность определения температуры радиометки на ПАВ по сравнению с первым рассмотренным случаем в широком диапазоне рабочих температур.

Заключение

Результаты проведенного моделирования показывают, что для рассмотренной радиометки на ПАВ с время-позиционным ФМ-кодом, представленным на рис. 2, удалось подобрать температурный код, обеспечивающий возможность однозначно определить ее температуру в широком интервале от -60 до 120 °С. Для оценки точности определения температуры радиометки на ПАВ и, соответственно, точности температурной компенсации необходимо провести экспериментальные исследования.

Температурный код
(4 группы по 6 временных слотов,
1 группа с 4 временными слотами)



Рисунок 7. Расположение импульсов в отклике радиометки на ПАВ, формирующих температурный код в виде кода Баркера {1, 1, 1, -1, 1} (закрашенные области)

Увеличение точности температурной компенсации искажений ИХ радиометки на ПАВ может достигаться за счет применения следующих мер:

- использования в качестве температурного кода кодов Баркера большей длины или других ФМ-последовательностей, обладающих наилучшими корреляционными характеристиками;
- увеличения временного интервала между импульсами, формирующими температурный код, что обеспечит получение более узкого основного «лепестка» температурной зависимости ВКФ.

Однако выбор температурного кода и его длины всегда должен производиться с учетом необходимости обеспечения максимально возможной информационно-энергетической емкости радиометки, минимального уровня вносимых ею потерь, максимальной дальности действия системы РЧИД, а также имеющихся ограничений на габаритные размеры корпуса чувствительного элемента и антенны радиометки.

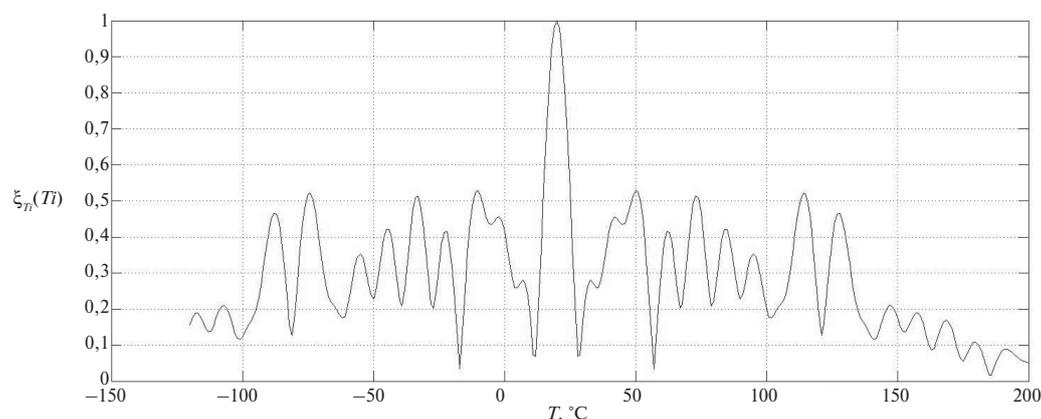


Рисунок 8. График зависимости максимума ВКФ для выбранного температурного кода

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Canabal A., Davulis P. M., Dudzik E., Pereira da Cunha M. CDMA and FSCW Surface Acoustic Wave temperature sensors for wireless operation at high temperatures. *IEEE Ultrason. Symp*, 2009, pp. 807–810.
2. Härmä S., Arthur W. G., Maev R. G. Inline SAW RFID Tag Using Time Position and Phase Encoding. *IEEE Ultrason. Symp*, 2007, pp. 1239–1242.
3. Дмитриев В. Ф., Койгеров А. С. Исследование радиоиентификаторов на ПАВ с заданными корреляционными свойствами // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56. № 10. С. 1268–1278.
4. Дмитриев В. Ф. Корреляционная обработка сигнала в системе радиочастотной идентификации на основе устройств на ПАВ // Радиотехника. 2012. № 5. С. 25–35.
5. Plessky V., Reindl L. Review on SAW RFID tags. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. IEEE Transactions on*, 2010, vol. 57, no. 3, pp. 654–668.

REFERENCES

1. Canabal A., Davulis P. M., Dudzik E., Pereira da Cunha M. CDMA and FSCW Surface Acoustic Wave temperature sensors for wireless operation at high temperatures. *IEEE Ultrason. Symp.*, 2009, pp. 807–810.
2. Härmä S., Arthur W. G., Maev R. G. Inline SAW RFID Tag Using Time Position and Phase Encoding. *IEEE Ultrason. Symp.*, 2007, pp. 1239–1242.
3. Dmitriev V. F., Koygerov A. S. Investigation of SAW radio identifiers with preset correlation properties. *Radiotekhnika i elektronika*, 2011, vol. 56, no. 10, pp. 1268–1278 (In Russian).
4. Dmitriev V. F. Correlation processing of signal in a radio frequency identification system on SAW devices. *Radiotekhnika*, 2012, no. 5, pp. 25–35 (In Russian).
5. Plessky V., Reindl L. Review on SAW RFID tags. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. IEEE Transactions on*, 2010, vol. 57, no. 3, pp. 654–668.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Коренчук Андрей Сергеевич, заместитель начальника отдела, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»», 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А, e-mail: korenchuk_as@radar-mms.com.

Дмитриев Валерий Федорович, д.т.н., доцент, начальник отдела, АО ««Научно-производственное предприятие «Радар ммс»», 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А, e-mail: dmitriev_vf@radar-mms.com.

AUTHORS

Korenchuk Andrey, deputy head of Department, Joint-stock Company «Research and Production Enterprise “Radar mms”», 37, lit. A, Novoselkovskaya st., Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, e-mail: korenchuk_as@radar-mms.com.

Dmitriev Valeriy, Dr., associate professor, head of Department, Joint-stock Company «Research and Production Enterprise “Radar mms”», 37, lit. A, Novoselkovskaya st., Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, e-mail: dmitriev_vf@radar-mms.com.