

С. В. Виноградова¹, В. О. Чебачев²

¹ БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, ² АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОМЕТКИ СИСТЕМЫ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Рассматривается математическая модель радиометки системы радиочастотной идентификации (RFID) на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Математическая модель описана как импульсная характеристика электрической цепи. Проведен анализ факторов, влияющих на отклик радиометки на ПАВ. Разработана программа-симулятор приема отклика радиометки. Зондирование радиометки производилось простым сигналом и сигналом, фазоманипулированным кодом Баркера. Оценено влияние на прием таких факторов, как температурное воздействие, погрешность вносимого фазового сдвига в каждый кодовый символ, неравномерность амплитуд откликов каждого кодового символа. Приведены результаты влияния каждого фактора на прием. Выявлен оптимальный уровень порога для каждого вида зондирующего сигнала. Установлено, что неравномерность амплитуд откликов по-разному влияет на прием при зондировании простым и сложным сигналом. Приведены рекомендации по учету влияния каждого фактора при приеме и обработке сигнала.

Ключевые слова: модель, RFID, ПАВ, идентификация

Введение

При разработке систем RFID на ПАВ существует ряд задач, для решения которых необходима математическая модель радиометки [1]. Одной из таких задач является проблема коллизий, которую нецелесообразно решать экспериментально только с использованием макетных образцов, так как таковых потребуется слишком много.

Эффективным и наиболее популярным математическим аппаратом для создания моделей радиоэлектронных устройств являются S-матрицы. Их востребованность связана с простотой получения. S-параметры устройства измеряются с помощью векторного анализатора, после чего их используют в математической модели. Однако S-матрицы не учитывают информацию о физических процессах, которые влияют на передаточные характеристики устройств. При этом радиометка RFID имеет переменный параметр – идентификационный код, который невозможно задавать через S-параметры. Поскольку код метки задается во временной области, то и обработка сигнала метки всегда производится там же. Поэтому мы будем строить модель, используя импульсную характеристику метки – параметр, максимально точно характеризующий ее свойства именно во временной области [2].

Принцип работы системы RFID

Принцип работы системы RFID на ПАВ представлен на рис. 1.

Система состоит из считывателя, антенны считывателя и радиометки. Радиометка, в свою очередь, состоит из антенны и пьезоэлектрической подложки. Считыватель периодически генерирует высокочастотный сигнал опроса, который через антенну радиометки через электроды попадает на встречно-штыревой преобразователь (ВШП), нанесенный на поверхность подложки из пьезоэлектрического кристалла. ВШП преобразует электрический сигнал в ПАВ, которая распространяется

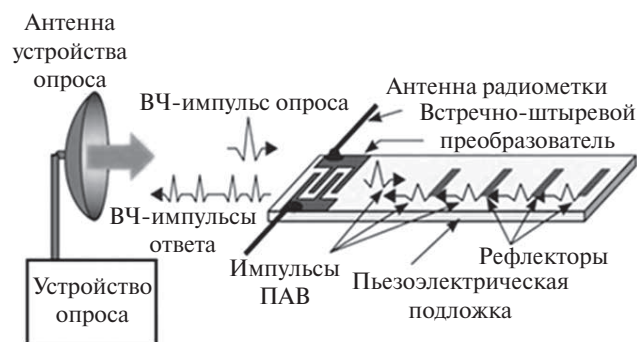


Рисунок 1. Конструкция системы RFID на ПАВ

по поверхности подложки. Таких ВШП на поверхность кристалла наносится несколько, и каждый из них формирует свой отклик на поступивший электрический сигнал. Сигнал, переизлученный ВШП, по поверхности подложки поступает обратно на антенну радиометки и излучается в эфир, откуда его принимает считыватель.

Поскольку на поверхность кристалла наносится несколько ВШП, то и сигналов они переизлучают несколько. При этом каждый ВШП на подложке располагается на разном расстоянии от антенны, вследствие чего переизлученный опросный сигнал считывателя от каждого ВШП доходит до антенны радиометки за разное время. Следовательно, в ответ на опросный моноимпульс считывателя радиометка излучает в эфир последовательность моноимпульсов, каждый из которых формируется своим ВШП. Расположив ВШП произвольным образом на подложке, мы можем получить последовательность импульсов, закодированную произвольным образом по параметру времени задержки. Такой код называется время-позиционным кодом. Каждая отдельно взятая радиометка кодируется собственным уникальным время-позиционным кодом, что обеспечивает возможность ее идентификации [3].

Модель радиометки

В идеальном случае отклик радиометки можно математически представить как сумму дельта-функций

$$h(t) = \sum_{k=1}^n \sigma(t - \tau_k). \quad (1)$$

Реальный отклик радиометки будет искажен относительно идеального. Факторы, искажающие отклик радиометки, могут быть отнесены к следующим категориям:

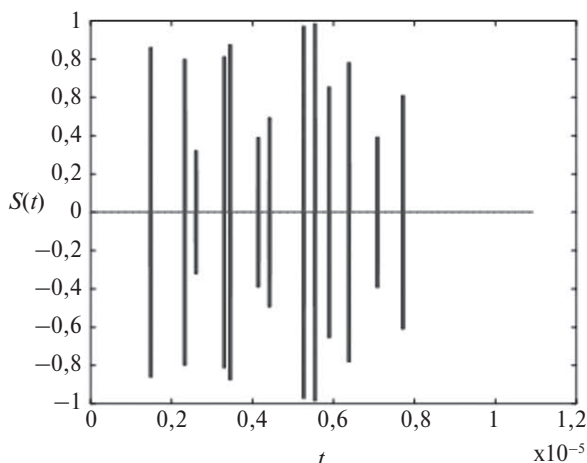


Рисунок 2. Отклик радиометки при неравномерности амплитуд 6 дБ

- конструктивные и технологические аспекты изготовления радиометок;
- влияние внешних воздействующих факторов (ВВФ);
- паразитные переотражения акустической волны.

Частотные характеристики радиометки при построении модели рассматриваться не будут.

Среди конструктивных факторов наибольшую значимость имеют неравномерность прозрачности ВШП и неидентичность вносимого фазового сдвига разными ВШП. Также может играть роль погрешность позиционирования ВШП на пьезоплате — она будет влиять на разброс временных задержек импульсов время-позиционного кода. Однако на практике технологией изготовления пьезоплаты предусмотрены допуски позиционирования элементов, которые не превышают 10 мкм. Скорость распространения акустической волны ПАВ имеет порядок 3000 м/с. Следовательно, отклонение положения ВШП от заданного значения на 10 мкм приведет к изменению положения импульса на временной оси в 3,3 нс. Поскольку длительность откликов от каждого ВШП составляет 60–70 нс, такое отклонение отклика радиометки от заданных характеристик не является проблемой для задачи радиолокационного приема. Следовательно, влияние данного фактора можно не рассматривать.

Неравномерность прозрачности ВШП влияет на разброс амплитуды откликов от каждого ВШП. На сегодняшний день реальный разброс амплитуды составляет около 6 дБ, то есть амплитуды откликов могут различаться в четыре раза. При заданном разбросе в 6 дБ отклик будет иметь вид, представленный на рис. 2.

Еще одним фактором является отклонение вносимого ВШП фазового сдвига от заданной величины. Рассматриваемая в исследовании конструкция радиометки предусматривает два варианта вносимого фазового сдвига: на значение фазы 0 и π . Тогда нормальным будет отклонение величины фазового сдвига на величину $\pi/6$. Таким образом, требуется учесть два конструктивных фактора: неравномерность амплитуды и вносимый фазовый сдвиг.

Неравномерность откликов приводит к фактическому уменьшению отношения сигнал/шум. Кроме того, чем больше неравномерность откликов, тем ниже требуется устанавливать порог в решающем устройстве. Если бы все отклики имели одинаковую амплитуду, то порог можно было бы установить на уровне 0,5–0,7 от максимального значения. А с неравномерностью откликов в 6 дБ амплитуда минимального отклика может составлять и 0,25 от максимального значения даже без учета влияния канального шума. Порог не может быть установлен на уровне выше 0,25 от максимального значения.

Температурное воздействие влияет на скорость движения акустической волны на пьезоплате, в результате чего весь отклик от метки на радиочастоте масштабируется по времени. Масштабирование отклика приводит к изменению длительности отклика и изменению частоты сигнала.

Рабочий диапазон температур возьмем, согласно ГОСТ Р 57367–2016, равным от –60 до 85 °С [4]. В реальности каждый RFID-чип имеет уникальную характеристику зависимости ухода частоты от температуры, что делает задачу учета влияния температуры на отклик нетривиальной. Воздействие прочих климатических факторов имеет тот же характер, что и влияние температуры, и, учитывая слабую предсказуемость последнего, рассматривать прочие факторы не имеет особого смысла.

Будем считать, что на сигнал, приходящий на приемное устройство, воздействует каналный шум, имеющий нормальную плотность вероятности с $\sigma = 1$. Используются два варианта зондирующего сигнала: простой (прямоугольный радиоимпульс) или сложный сигнал, фазоманипулированный кодом Баркера длиной 13 символов [5, 6]. Оба сигнала имеют центральную частоту 915 МГц. Отклик метки содержит 13 символов. Первый символ является стробом.

Моделирование приема отклика

Промоделируем типичное приемное устройство системы RFID. Программа, моделирующая прием, совершает 500 циклов зондирования и приема, после чего вычисляет соответствие кода облучаемой метки принятому коду. При этом допускается ошибка в одном символе. Изначально опыт проводился с простым сигналом. Порог был установлен на уровне 0,2 от максимального значения сигнала. Первой задачей опыта стояло определение погрешности, с которой программа сможет определить вероятность ошибки. Результаты измерений приведены в табл. 1.

Как видим, вероятность ошибки в каждом опыте отличается на единицы процентов, и для дальнейшего проведения эксперимента такая точность нас устраивает.

Рассмотрим, как каждый из вышеприведенных факторов влияет на процесс приема радиометки.

Первым фактором является неравномерность откликов. Как и любое искажение, он уменьшает отношение сигнал/шум. Помимо этого, влияние неравномерности откликов в 6 дБ означает, что некоторые отклики могут иметь уровень 0,25 от максимального значения полезного сигнала (по которому производилась нормировка). Это значит, что порог на решающем устройстве надо устанавливать не 0,5–0,7 от максимального значения, как это обычно делается, а существенно ниже – 0,2–0,3, причем даже такое значение близко к уровню шума. Подобная ситуация возникает, когда облучение радиометки производится простым сигналом. При использовании сложного сигнала его длительность оказывается большей, чем задержка между откликами от разных ВШП. Как следствие, отклики будут искажать друг друга. Это явление в совокупности с неравномерностью между откликами приводит к тому, что фактический их разброс по амплитуде становится еще выше, и чем больше база сигнала, тем сильнее усугубляется ситуация. Тогда порог приходится устанавливать еще ниже, и он еще больше захватывает шум.

На следующем шаге определяем оптимальный порог, на котором вероятность ошибки при заданном $\sigma = 1$ будет наименьшей для разных форм зондирующего сигнала. Использовались два разных зондирующих сигнала: простой и сложный, модулированный кодом Баркера длиной 13.

Результаты поиска оптимального порога приведены в табл. 2.

Таким образом, выявлен оптимальный уровень порога для каждого вида сигнала.

Из табл. 2 неочевидна необходимость применения сложного сигнала, и ситуация сильно изменяется при ухудшении отношения сигнал/шум (табл. 3).

Как видно из таблицы, увеличение σ не сильно влияет на вероятность ошибки при использовании кода Баркера, по крайней мере, в тех пределах, когда информацию с помощью простого сигнала еще в принципе можно считать. Ошибки при использовании простого и сложного сигналов имеют

Таблица 1. Определение погрешности вероятности символьной ошибки

Номер опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Вероятность ошибки	0,22	0,24	0,26	0,23	0,24	0,26	0,24	0,25	0,24	0,23

Таблица 2. Результаты поиска оптимального порога

Порог	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5
Простой сигнал	0,83	0,24	0,1	0,16	0,58	0,89
Код Баркера	0,53	0,1	0,18	0,35	0,82	0,92

принципиально разную природу. В случае простого сигнала на вероятность ошибки влияет непосредственно канальный шум, а на сложный сигнал влияют собственные переотражения от разных ВШП.

Следующий рассматриваемый фактор – это погрешность установки фазы каждого ВШП. Информация передается одним из двух значений фазы – 0 и π . В такой ситуации точность установления фазы в $\pi/6$ не приводит к аномальным ошибкам, но как любое искажение ухудшает отношение сигнал/шум. Вероятность ошибки с искажением фазы и без него отличается на величину до 5%.

Влияние температуры на отклик может быть проиллюстрировано с помощью таблиц исходного кода метки и декодированного кода. Исходный код приведен в табл. 4. Значения кода принятого отклика приведены в табл. 5.

Из табл. 5 видно, что все символы остались на своих местах. Однако символы с 7-го по 12-й изменили фазы на противоположные. Это говорит о том, что полезный сигнал имеет дополнительный фазовый набег, который не учтен в приемном

устройстве, и при достижении седьмого символа набег уже превышает величину π . Ситуация, приведенная в табл. 5, получается при относительном уходе частоты на величину $7 \cdot 10^{-5}$. В реальности уход частоты может превышать данную величину как минимум на порядок, а это означает, что фазовый набег в пределах кодового слова будет отличаться на несколько периодов синусоиды. Такую неоднозначность в измерении фазы не получится устранить просто учетом фазового набега. Кроме того, сам уход по температуре от образца к образцу столь сильно влияет на фазовый набег, что по температуре считыватель не может быть откалиброван, а уход частоты может быть только измерен.

Стоит отметить, что температурная нестабильность не обуславливает других факторов, усложняющих прием. Нет никаких проблем с позиционированием кодовых символов, а отклонение несущей частоты от номинальной не столь велико, чтобы выйти за рабочую полосу частот фильтров приемного устройства. Это значит, что если исключить фазовую модуляцию радиометки, то температура

Таблица 3. Влияние отношения сигнал/шум на вероятность символьной ошибки

σ	Простой сигнал		Код Баркера	
	Порог 0,20	Порог 0,25	Порог 0,20	Порог 0,25
1,0	0,24	0,10	0,10	0,18
1,2	0,61	0,24	0,13	0,15
1,5	0,95	0,68	0,12	0,17
2,0	–	0,99	0,22	0,17

Таблица 4. Исходный код радиометки

Слот/ячейка	Строб	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	–1	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	1	0	–1	0	0	0	–1	0	0	0	0	–1

Таблица 5. Значения кода принятого отклика

Слот/ячейка	Строб	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	–1	1	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0	–1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	–1	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	1	0	–1	0	0	0	1	0	0	0	0	1

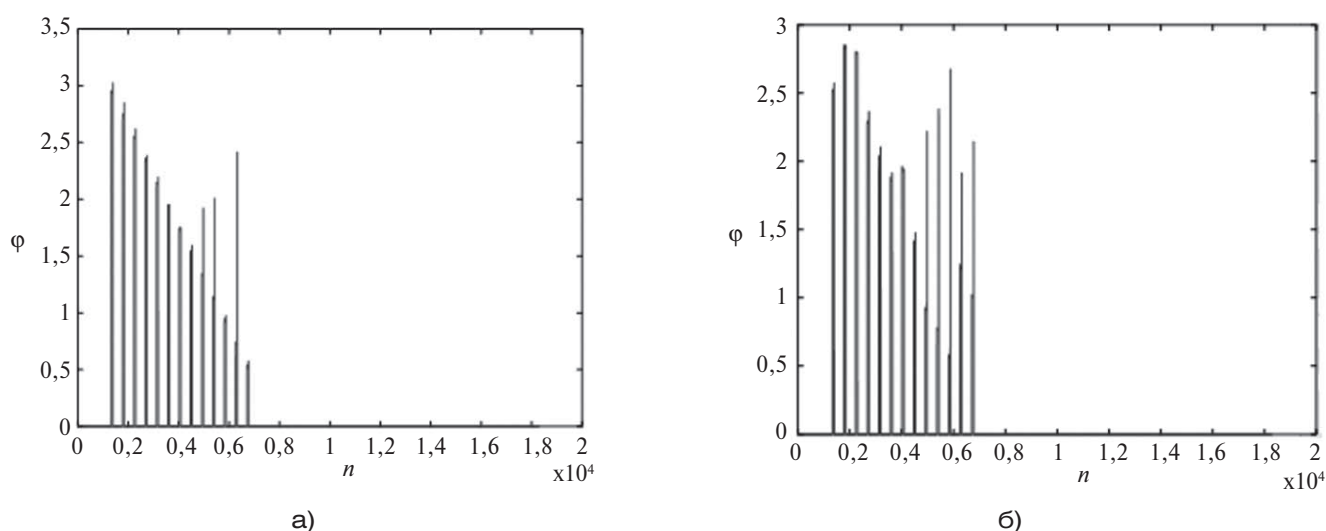


Рисунок 3. Фаза откликов при относительном уходе частоты 10^{-4} : а – без учета влияния погрешности установки фазы отклика; б – с учетом влияния погрешности установки фазы отклика

не будет влиять на процесс приема. Переход фазы через значение 2π происходит при относительном уходе частоты 10^{-4} от несущей, что соответствует изменению температуры в десятки градусов. Таким образом, в рабочем диапазоне температур фаза может несколько раз превысить 2π , что затрудняет ее определение.

На процесс измерения фазы влияет рассмотренная ранее погрешность ее установки. Насколько сильно влияет данный фактор, можно видеть на рис. 3 (приведен отклик радиометки с нулевым кодом, где все фазы одинаковы).

Выводы

Из рассмотренных факторов, искажающих идеальную импульсную характеристику радиометки, критически на алгоритм приема влияют два фактора: неравномерность амплитуды откликов и температура.

Для учета неравномерности амплитуды откликов необходимо внести следующие изменения в алгоритм приема: уменьшить порог до уровня

$0,20-0,25$ от максимального значения отклика; при зондировании сложным сигналом с базой 20 и более не допускать наложения откликов от ВШП друг на друга, передавая кодовые импульсы с паузами, равными длительности отклика радиометки на простой сигнал.

Что касается влияния температуры на принимаемый сигнал, то для корректной работы алгоритма его необходимо модифицировать так, чтобы измерялись не только уровень и фаза строка, но и возможно было измерить фазу других откликов. Для этого в конец последовательности можно добавить еще один импульс с фиксированной фазой и временным положением. Однако при реальных условиях получается, что в диапазоне температур фазовый набег может превышать 2π , а рассмотренная погрешность установки фазы в $\pi/6$ вносит погрешность в ее измерение.

Обе проблемы решаемы, но для измерения фазы необходимо вводить в последовательность дополнительные 4–5 проверочных импульсов с фиксированным фазовым набегом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чебачев В. О. Обработка сигналов в системах радиочастотной идентификации с помощью декоррелирующих преобразований // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 9. С. 35–40.
2. Malocha D., Kozlovski N., Santos B., Pavlina J., Belkerdid M., Mears T. Ultra wide band surface acoustic wave (SAW) RF ID tag and sensor // Military Communications Conference (MILCOM), 2009. IEEE. P. 1–7.
3. Malocha D., Gallagher M., Fisher B., Humphries J., Gallagher D., Kozlovski N. A Passive Wireless Multi-Sensor SAW Technology Device and System Perspectives // Sensors. 2013. Vol. 13. P. 5897–5922.
4. ГОСТ Р 57367–2016. Изделия акустоэлектронные на поверхностных акустических волнах. Метки идентификационные. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2017. 16 с.
5. Коренчук А. С., Дмитриев В. Ф. Применение сигналов с кодами Баркера для опроса радиометок на ПАВ в системах радиочастотной идентификации // Радиопромышленность. 2016. № 2. С. 29–35.
6. Коренчук А. С., Дмитриев В. Ф. Численное моделирование опроса радиометок на поверхностно-акустических волнах в системах радиочастотной идентификации с применением ЛЧМ-сигналов // Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 9. С. 28–34.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Виноградова Светлана Вячеславовна, магистрант, Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1, тел.: 8 (905) 205-65-35, e-mail: vanasa2008@yandex.ru.

Чебачев Вадим Олегович, инженер, АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс», Российская Федерация, 197375, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, д. 37, лит. А, тел.: 8 (911) 290-47-24, e-mail: chebachev_vo@radar-mms.com.

For citation: Vinogradova S. V., Chebachev V. O. Mathematical modeling of RFID tag by saw technology. Voprosy radioelektroniki, 2019, no. 1, pp. DOI

S. V. Vinogradova, V. O. Chebachev

MATHEMATICAL MODELING OF RFID TAG BY SAW TECHNOLOGY

The mathematical model of RFID SAW tag is under consideration. A model is defined as impulse response of electrical circuit. The factors which influence to tag's response are analyzed. A program which simulates RFID response receiver was produced. A single radio pulse and compound radio signal modulated by Barker code are used for flexing. The influence for receiving of such factors as temperature, phase uncertainty between SAW transducers and amplitude ripple between responses of different SAW transducers are estimated. The results of this estimation are displayed. Optimal threshold values are estimated for each of flexing signals. It was resulted that the influence of amplitude ripple factor for response is different using single or complex signal for flexing. Methods of compensation the influence of each factor during receiving and operating the signal are reviewed

Keywords: model, RFID, SAW, identification

REFERENCES

1. Chebachev V. The signal processing in RFID systems by using decorrelating transforms. *Voprosy radioelektroniki*, 2016, no. 9, pp. 35–40. (In Russian).
2. Malocha D., Kozlovski N., Santos B., Pavlina J., Belkerdid M., Mears T. Ultra wide band surface acoustic wave (SAW) RF ID tag and sensor. Military Communications Conference (MILCOM), 2009, IEEE, pp. 1–7.
3. Malocha D., Gallagher M., Fisher B., Humphries J., Gallagher D., Kozlovski N. A Passive wireless multi-sensor SAW technology device and system perspectives. *Sensors*, 2013, vol. 13, pp. 5897–5922.
4. GOST R57367–2016. *Acoustoelectronic products on surface acoustic waves. Identification marks. General specifications*. Moscow, Standartinform Publ., 2017, 16 p. (In Russian).
5. Korenchuk A. S., Dmitriev V. F. Interrogation of saw tags in RFID systems using barker encoded signals. *Radiopromyshlennost*, 2016, no. 2, pp. 29–35. (In Russian).
6. Korenchuk A. S., Dmitriev V. F. Numerical simulation of interrogation of saw tags in RFID systems using LFM signals. *Voprosy radioelektroniki*, 2017, no. 9, pp. 28–34. (In Russian).

AUTHORS

Vinogradova Svetlana, undergraduate student, Ustinov Baltic State Technical University «VOENMEH», 1, 1st Krasnoarmejskaja St., St. Petersburg, 190005, Russian Federation, tel.: +7 (905) 205-65-35, e-mail: vanasa2008@yandex.ru.

Chebachev Vadim, engineer, «NPP «Radar mms» JSC, 37A, Novoselkovskaya St., Saint-Petersburg, 197375, Russian Federation, tel.: +7 (911) 290-47-24, e-mail: chebachev_vo@radar-mms.com.