## Пассивные УВЧ- и СВЧ-системы радиочастотной идентификации: архитектура и тенденции

## А.С.Мучкаев

Мартек Корпорейшн, Лас-Вегас, США

Приведен обзор современных систем радиочастотной идентификации (radio frequency identification) и перспективных направлений развития RFID-технологий. Представлены интегрированные решения пассивных УВЧ-тагов и ридеров RFID, применяемых в коммерческих приложениях, таких как логистика, контроль доступа, в мобильных приложениях и др. Рассмотрены проблемы повышения эффективности пассивных УВЧ-систем RFID и способы их решения, в частности предложен УВЧ-приемник ридера RFID на основе многополюсного рефлектометра, позволяющий устранить влияние паразитных сигналов на эффективность приема отраженного от антенны тага модулированного сигнала. Описаны преимущества использования CBЧ-диапазона в задачах радиоидентификации и новые разработки в CBЧ-технологиях RFID.

Ключевые слова: РФИД, таг, ридер, многополюсник, прямое преобразование.

This paper presents an overview of modern RFID systems and tendencies in further development of the RFID technologies. We consider novel fully integrated passive UHF RFID tags and readers for commercial applications such as supply chain management, access control, mobile applications, and many more. The paper describes efficiency improvement aspects of the passive UHF RFID systems and ways to achieve high RFID performances. In particular, a passive multiport UHF RFID receiver is proposed. In addition, we include novel prospective UWB RFID technologies.

Key words: RFID, tag, reader, multiport, homodyne receiver

**Введение.** В настоящее время области применения систем радиочастотной идентификации (radio frequency identification – RFID) стремительно расширяются, развитие RFID-технологий и успехи в создании новых интегральных микросхем взаимно дополняют и стимулируют собственные достижения. Растущие потребности индустрии в сверхминиатюрных дешевых тагах и мобильных ридерах стимулируют разработку новых решений в схемотехнике и методах обработки RFID-сигналов. Однако требования низкой стоимости, миниатюризации и большой дальности считывания RFID-систем ставят перед разработчиками сложные задачи, в решение которых вовлечены все производители RFID-технологий.

Стоимость и размеры RFID-компонентов можно уменьшить, используя КМОП-решения как наиболее эффективные в стоимостном плане технологии. Увеличение дальности считывания при ограничениях на мощность и частотную полосу передающего сигнала достигается за счет вынужденного повышения формфактора и стоимости конечного изделия. Поэтому некоторые результаты могут быть достигнуты за счет компромиссного решения, результаты которого не всегда удовлетворяют требованиям заказчиков.

Основными проблемами при решении задачи увеличения дальности считывания RFID являются повышение чувствительности приемника тага, увеличение эффективности антенной системы и снижение влияния блокирования слабого сигнала тага несущей передатчика в приемнике ридера.

В настоящей работе приводится обзор существующих решений рассматриваемых проблем. Описывается УВЧ-таг RFID, имеющий низкое энергопотребление и высокую чувствительность приемника, что позволяет существенно увеличить дальность действия. Обсуждаются новые технические решения, связанные с миниатюризацией и повышением эффективности УВЧ-ридеров RFID, при этом особое внимание уделяется проблеме блокирования входного сигнала несущей передатчика ридера. Рассматриваются преимущества СВЧдиапазона в ряде коммерческих приложений RFID-технологии.

1. Пассивные УВЧ-таги RFID. Большой интерес к УВЧ-тагам RFID, работающим в диапазоне 800÷900 МГц, обусловлен увеличением RFID-приложений с требованиями малых габаритов, высокой скорости передачи данных и большой дальности считывания информации. Подобные требования налагают также ограничения на выбор антенны и ее параметры. Пути удовлетворения совокупным ограничениям

включают оптимизацию согласования антенн и входных цепей, направленных свойств антенн, поляризации и т.д. Множество реализованных такими методами тагов коммерчески доступны.

Чувствительность приемника тага не зависит от физических характеристик окружающей среды или мощности, передаваемой ридером:

$$S_{tag} = G \cdot p \cdot \tau \cdot P_{th}$$

 $(G - коэффициент усиления антенны; <math>p - коэффициент поляризации; \tau$  - параметр согласования входных цепей и антенны тага;  $P_{th}$  – порог чувствительности микрочипа [1]). Однако параметры антенны тага могут существенно измениться при наличии проводников вблизи антенны, что влечет за собой потерю чувствительности тага. Таким образом, максимальная дальность считывания пассивных RFID-систем ограничивается чувствительностью тага и зависит от его энергопотребления.

Технологии КМОП позволяют создавать микрочипы для RFID-тагов, обладающие пониженным энергопотреблением, что дает им возможность функционировать на больших расстояниях. Например, таг, потребляющий примерно 150 мкВт, позволяет считывать информацию на расстоянии до двух метров с ненаправленной антенной при эффективной мощности сигнала 500 мВт [2], однако при тех же характеристиках антенны и передаваемой ридером мощности таг, потребляющий 60 мкВт, способен передавать данные на расстоянии, приблизительно равном 3,3 м [3].

Интегрированная микросхема для пассивного УВЧ-тага RFID стандарта EPC Class1 Gen2 и ISO-18000, разработанная специалистами компании "Атмел", позволила достичь эффективного расстояния в 4,5 м при мощности излучения 500 мкВт и 9,25 м при 4-ваттном сигнале ридера [3]. При создании микрочипа использовалась 0,5-микронная КМОП-технология, поддерживающая электрически перезаписываемые блоки памяти произвольного доступа и специально спроектированные диоды Шоттки с низким входным сопротивлением. В данном варианте тага мощность модифицированной петли антенны согласуется со средним импедансом входных цепей микрочипа. Интегральная схема содержит умножитель напряжения, модулятор, демодулятор, блок памяти, схему подкачки и цепи управления. Умножитель напряжения, преобразующий часть мощности входного сигнала для питания активных цепей чипа, и подкачивающая зарядная схема для генерирования постоянного тока, используемого для записи и чтения данных в блоке памяти, выполнены на диодах Шоттки и имеют почти идентичную архитектуру.

При модуляции отраженного сигнала модулятор вместо входного сопротивления изменяет входную емкость, что приводит к фазовой манипуляции отраженной волны вместо амплитудной. Это выполняется с помощью МОП-варактора и двух конденсаторов, которые позволяют менять полярность напряжения на полюсах варактора. При фазовой манипуляции достигаются высокая эффективность детектирования входного напряжения, большое значение отношения сигнал – шум передаваемого сигнала и низкая частота ошибок по битам.

2. УВЧ-ридеры RFID. Успехи в развитии технологии интегральных схем способствуют расширению областей применения RFID-систем, в частности в мобильных приложениях. Интеграция RFID-технологий с мобильными сетями связи позволяет пользователям мобильных телефонов получать данные из любой информационной RFID-системы. Уникальный сервисный код содержится в данных тага, и с помощью встроенного в мобильный телефон RFID-ридера можно получить информацию, например о продукции, различных сервисах или мероприятиях, используя инфраструктуру передачи данных систем сотовой связи.

В Институте микроэлектроники (Сингапур) с использованием КМОП-технологии (0,18 мкм) разработан пассивный УВЧ-микроридер RFID [4]. Высокая плотность интеграции позволила создать полнофункциональный RFID-ридер стандарта EPC Class1 Gen2 и ISO 18000 для работы в полосе частот 860 ÷ 960 МГц с размерами кристалла 6×6 мм. Ридер построен по стандартной схеме прямого преобразования с программируемым частотным синтезатором, обеспечивающим генерацию квадратурных сигналов во всей рабочей полосе с разрешением 50 кГц. Входные цепи ридера включают переключаемый аттеньюатор с возможностью выбора режимов LBT (listen-before-talk) и Talk. С выхода низкошумящего усилителя, состоящего из двух каскадов, сигнал поступает на балансные пассивные смесители, использование которых позволяет достичь высокой линейности преобразования и уменьшить размеры и энергопотребление ридера. Демодулятор оптимизирован для работы с 10-100 % АМ-сигналами.

Несмотря на то что измерения показали приемлемые показатели по дальности, а размеры кристалла позволяют использовать ридер во многих мобильных приложениях, энергопотребление ридера достаточно высокое: 300 мА при напряжении питания 1,8 В. Как отмечено выше, чувствительность приемника ридера определяется уровнем чувствительности тага и эффективностью антенны. Особенностью RFID-систем является полудуплексная связь без использования разделения по частоте или времени. Добавляя амплитудную (фазовую) модуляцию для передачи данных, RFID-ридер передает синусоидальную несущую и в то же время в той же полосе частот принимает при обратной связи отраженный модулированный сигнал от тага. Вследствие одновременной активации передатчика и приемника ридера во время считывания данных тага и ограниченной электрической изоляции между ними происходит проникание сигнала передатчика на вход приемника, вызывающее блокирование приемного сигнала. Поэтому главной проблемой при построении RFID-ридера, особенно для чипов низкой стоимости, является надежный прием сигнала тага (~ -82 дБм и менее) при наличии сильного сигнала передатчика (~ 10 дБм), смещенного в рабочей полосе частот на 40 – 250 кГц от полезного сигнала. Использование в качестве циркулятора для развязки передаваемого и принимаемого сигналов пассивного направленного ответвителя в принципе недостаточно, так как он обладает низкими параметрами изоляции (~ 15 dB). Это обусловлено различием фазовых скоростей в диэлектрическом материале, используемом в качестве микрополосковой подложки. Поэтому необходимо искать новые пути подавления паразитных сигналов в приемной части RFID-ридера.

В интегрированном RFID-ридере, спроектированном в Университете Калифорнии совместно с компанией "Броудком" (США), данная проблема решена путем усиления слабого сигнала тага с одновременной режекцией блокирующего сигнала, в результате чего последний подавляется более чем на 50 dB [5]. Мешающий сигнал подавляется путем комбинирования двух приемных ветвей – линейной и нелинейной. Линейная часть усиливает смешение полезного и мешающего сигналов, а нелинейная ограничивает как блокирующий, так и полезный сигнал. Такой фильтр сохраняет неизменными частоту и фазу сильного сигнала, после чего блокирующий сигнал вычитается из выходного сигнала приемника. Поэтому мешающий сигнал подавляется, а полезный усиливается в линейной части приемника. Микросхема ридера выполнена с использованием КМОП-технологии (0,18 мкм). Кристалл занимает площадь 21 мм<sup>2</sup> и потребляет 40 мА с отключенным подавителем и 56 мА с включенным (напряжение питания равно 3,3 В). Подобный вариант подавления проникающего в приемник сигнала передатчика применен в чипе мобильного УВЧ-ридера RFID [6].

Другое решение реализовано в микросхеме приемопередатчика 900 МГц RFID-ридера компании "Интел". Фильтрация паразитного сигнала достигается подавлением постоянной составляющей смеси сигналов в схеме прямого преобразования с помощью емкостных цепей дискретизации с запоминанием [7].

В компании "Самсунг Электроникс" разработана КМОП-микросхема приемопередатчика (трансивера) для УВЧ-ридера RFID, встраиваемая в мобильный телефон [8]. Ридер поддерживает стандарты ISO 18000-6 и EPC Class1 Gen2 в полосе частот 902 ÷ 928 МГц. Технические требования по регулированию параметров в радиокоммуникациях налагают жесткие радиочастотные ограничения на использование мобильных RFID-ридеров в радиоканалах сотовой связи, например подавление сигнала по соседнему каналу должно быть не менее 18 дБм в полосе ±200 кГц и 47 дБм в полосе ±400 кГц, что позволяет большому числу ридеров функционировать одновременно в одной зоне.

В приемной части трансивера использована схема прямого преобразования со сверхлинейными входными цепями и блоком подавления постоянного смещения, что ограничивает проникание паразитных сигналов. Передатчик построен по схеме прямого преобразования квадратурных каналов, поддерживающей SSBи DSB-модуляцию. Размеры кристалла составляют 4,5 × 5,3 мм включая контакты для электростатического разряда. Ридер потребляет 89 мА (исключая усилитель мощности) при напряжении питания 1,8 В. В силу недостаточной изоляции отраженного от антенны тага и проникающих со стороны передатчика сигналов в цепях приемника максимальная дальность считывания данных тага приблизительно равна 1 м при выходной мощности 500 мВт.

Характеристики циркулятора на базе направленного ответвителя, подавляющего сигнал передатчика, проникающий в приемные цепи ридера, улучшаются при использовании различных методов компенсации разности фазовых скоростей. Однако вследствие влияния входного импеданса антенны развязка полезного и паразитных сигналов может ухудшиться. В работе [9] предложен пассивный циркулятор на основе направленного ответвителя, обладающего высокими параметрами изоляции паразитных сигналов. Рассматриваемый метод основан на использовании обычного направленного ответвителя, три соответствующих порта которого присоединены к выходу передатчика, к выходу приемной антенны и ко входу линейного усилителя приемника, а сигнал с четвертого порта, как правило согласованного с пассивной нагрузкой, поступает на несогласованную нагрузку. Последняя обладает комплексным коэффициентом рассеяния, который позволяет компенсировать паразитные сигналы от передатчика и антенны, т. е. сигнал, отраженный от такой на-

грузки, имеет такую же амплитуду и противоположную величину фазы суммарного мешающего сигнала. Оптимальное значение комплексного коэффициента рассеяния рассчитывается с помощью матрицы *S*-параметров рассеяния направленного ответвителя и сигнальных уравнений, описывающих комплексные величины сигналов с антенны и несогласованной нагрузки. Результирующее уравнение, описывающее искомый комплексный коэффициент отражения, зависит от параметров направленного ответвителя и комплексного коэффициента отражения (ККО) антенны в предположении, что они известны точно. Однако ККО антенны может изменяться, так как зависит от параметров окружающей среды, например от наличия металлических предметов или жидкости вблизи антенны, что может нарушить оптимальность полученного решения.

Указанные выше недостатки преодолены в решении, основанном на измерении амплитуды и фазы сигнала тага методом многополюсника [10]. Использование метода двенадцатиполюсника в приемной части трансиверов связи в качестве метода, альтернативного обычному гетеродинному подходу, было предложено во многих работах (см., например, [11-14]). Данный метод позволяет осуществить прямое преобразование без применения смесителей, точнее, преобразование выполняется не как процесс перемножения приемного и опорного сигналов, а как их суммирование в пассивной цепи приемника. При этом аппаратная часть приемника существенно удешевляется, а рабочая частота может достигать 150 ГГц.

В работе [10] впервые предложено использовать метод многополюсника в приемной части RFID-ридера. В RFID-системе сигнал тага представляет собой отраженное от антенны тага модулированное колебание, параметры которого (амплитуда и фаза) могут рассматриваться в качестве переменного комплексного коэффициента отражения, значения которого необходимо определить в дискретные моменты времени.

Для RFID-приемника два входа пассивного двенадцатиполюсника, выполненного на микрополосковой подложке, соединяются с выходами направленного ответвителя таким образом, как показано на обобщенной схеме многополюсного ридера (рис. 1). Сигналы с остальных полюсов пассивного элемента поступают на квадратичные детекторы и затем после усиления преобразуются в цифровую форму для последующей обработки. Цифровые сигналы *u*<sub>i</sub> описываются уравнениями двенадцатиполюсника:

$$u_{i} = |A_{i}|^{2} |a|^{2} + |B_{i}|^{2} |b|^{2} + 2|A_{i}||B_{i}||a||b|\cos(\psi_{i} + \varphi) + \Delta_{i},$$
  

$$\psi_{i} = \arg\left(\frac{A_{i}}{B_{i}}\right), \quad \varphi = \arg\left(\frac{a}{b}\right),$$
(1)

где  $A_i$ ,  $B_i$  – комплексные коэффициенты усиления *i*-го канала, включающие параметры пассивного многополюсника; a, b – комплексные амплитуды падающей усиленной и отраженной от многополюсника волн;  $\Delta_i$  – ошибки измерения квадратичных детекторов, которые считаются распределенными по нормальному закону с нулевым средним и дисперсией  $\sigma^2$ .

После замены переменных



$$\begin{split} c_{1i} &= \left| A_{i} \right|^{2}, \\ c_{2i} &= \frac{1}{2} \left| B_{i} \right|^{2}, \\ c_{3i} &= 2 \left| A_{i} \right| \left| B_{i} \right| \cos \left( \Delta \psi_{i} \right), \\ c_{4i} &= -2 \left| A_{i} \right| \left| B_{i} \right| \sin \left( \Delta \psi_{i} \right), \\ x_{1} &= \left| a \right|^{2}, \\ x_{2} &= \left| b \right|^{2}, \\ x_{3} &= \left| a \right| \left| b \right| \cos \left( \Delta \varphi \right), \\ x_{4} &= \left| a \right| \left| b \right| \sin \left( \Delta \varphi \right), \end{split}$$

уравнения (1) можно преобразовать в следующую систему линейных уравнений с нелинейным ограничением:

Рис. 1. Блок-схема многополюсного RFID-ридера

$$\begin{cases} e(x_1, x_2, x_3, x_4) = \min \sum_{i=1}^{N} \left( y_i - \sum_{k=1}^{4} c_{ki} x_k \right)^2, \\ x_1 x_2 - x_3^2 - x_4^2 = 0. \end{cases}$$
(2)

Полученная система решается относительно переменных, включающих амплитуду и фазу приемного сигнала. При сделанных допущениях для ошибок измерений  $\Delta_i$  решение системы можно получить по ММП [15, 16]. При этом за оценки максимального правдоподобия неизвестных амплитуд a, b и фазы  $\varphi$  принимаются значения, которые минимизируют сумму квадратов ошибок измерения.

Таким образом, решение задачи (2) является результатом решения оптимизационной задачи при условии известных комплексных коэффициентов усиления  $A_i$  и  $B_i$ , которая сводится к решению задачи оценивания вектора  $X = (x_1, x_2, x_3, x_4)$  численными методами. При условии малых ошибок измерения  $\Delta_i << u_i$ , которое выполняется в рассматриваемом многополюснике, в качестве нулевого приближения можно использовать вектор оценок  $X_0$  из системы (2) без учета нелинейного ограничения. После разложения в ряд Тейлора в окрестности  $X_0$  нелинейное ограничение в (2) можно линеаризовать, и задача оценивания вектора X легко решается методом множителей Лагранжа [17].

Коэффициенты  $A_i$ ,  $B_i$  вычисляются при калибровке приемной системы с помощью передачи ридером известной последовательности данных – преамбулы сигнала ридера. В частном случае обобщенной схемы многополюсного RFID-трансивера с использованием согласованной и несогласованной нагрузок пассивной цепи приемника можно использовать только два цифровых канала, что приводит к снижению стоимости и размеров ридера [10].

Особенностью многополюсного приемника RFID-ридера является не подавление паразитных сигналов отражения от антенны и проникания со стороны передатчика, а использование их для аддитивного прямого преобразования и измерения непосредственно фазы и амплитуды приемного сигнала. При этом требования к методам модуляции отраженного сигнала тага могут быть ослаблены, что, в свою очередь, снижает стоимость тага.

**3.** СВЧ-системы RFID. Пассивные RFID-системы УВЧ-диапазона основаны на относительно простом принципе переотражения сигнала ридера антенной тага с модулирующей нагрузкой с использованием узкополосных колебаний. Однако такой подход имеет недостатки, в числе которых высокая чувствительность к помехам, многократному переотражению сигналов с затуханием, помехам со стороны других RFID-систем, а также проблемы коллизий и недостаточная защита от преднамеренного считывания или искажения третьей стороной передаваемой по радиоканалу информации [18-19].

В радиосвязи СВЧ-диапазон позволяет использовать сверхширокополосные сигналы, называемые также шумоподобными, так как уровень полезного сигнала в них настолько мал, что маскируется шумом, и детектирование данных практически невозможно без знания кодовой информации и наличия соответствующего оборудования. Например, данные можно закодировать в виде коротких импульсов, модулированных либо по амплитуде, либо по фазе, либо по временному положению. Секретность передачи данных также существенно повышается при применении того или иного метода сжатия последовательности импульсов.

В работе [18] предложен СВЧ-модуль RFID для использования в асимметричной RFID-связи с ридером. Связь в направлении от ридера к тагу осуществляется обычным путем: ридер питает таг и передает данные, модулируя несущую. В обратном направлении таг передает данные с использованием сверхширокополосных сигналов. Модуль состоит из блока питания, блока управления питанием, узкополосного приемника, маломощного импульсного передатчика, цифрового модуля и дипольной антенны. По результатам испытаний согласно [18] дальность считывания информации составила 10 м.

В отличие от пассивного УВЧ-тага RFID, который модулирует отраженный его антенной сигнал ридера, предложенный вариант транспондера использует короткие импульсы СВЧ-диапазона с модуляцией по положению импульса. Такие сигналы имеют естественную защиту от помех и несанкционированного считывания данных. Таким образом, необходимость в сложной цифровой криптографии и кодировании отпадает, что снижает стоимость и размеры модуля тага. При этом проблема коллизий (разрешения одновременной передачи данных несколькими тагами) решается значительно более просто, а также исчезает необходимость в обеспечении специального протокола связи и соответствующего технического решения. Дополнительная

возможность прецизионного определения местоположения тага существенно расширяет области применения таких тагов.

Одновременное использование двух технологий не является оптимальным для широкого применения и требует дополнительных усилий по снижению общей стоимости системы, так как необходимо совмещать цепи узкополосного и широкополосного диапазонов с использованием двух оптимизированных антенн как в таге, так и в ридере.

В лаборатории LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) создан пассивный СВЧ-таг RFID, непосредственно использующий для передачи данных стандартный принцип модуляции отраженного от антенны тага сигнала [20]. Создателями данного проекта ставилась цель использовать преимущества СВЧтехнологий для расширения функциональности RFID-систем, в частности для улучшения чувствительности тага, что приводит к увеличению дальности считывания информации, повышению надежности связи в условиях деградации сигналов и переотражений, увеличению степени секретности передачи информации, для создания простой процедуры разрешения коллизий, а также для исследования возможности высокоточного определения местоположения тага.

Ридер генерирует субнанометровые импульсы, которые фильтруются в приемной части тага. Низкочастотная часть энергии используется для питания тага, а высокочастотная несет информацию. Контроллер управления данными переключает нагрузку антенны, модулируя отраженный сигнал в соответствии с передаваемыми ридеру данными.

В работе [21] описана пассивная CBЧ-система RFID с полудуплексной связью, в которой данные также передаются импульсными сигналами. Ридер передает последовательности импульсов питания, которые



Рис. 2. Схема пассивной СВЧ-системы RFID

положению (рис. 2). Кодированные сигналы тага используют-

последовательности

в блоке

ся также для определения местоположения CBЧ-тагов RFID с помощью позиционных методов триангуляции или трилатерации.

Заключение. Описаны последние достижения в разработке пассивных RFID-технологий, области применения которых неуклонно расширяются. Возросшие требования к параметрам RFID-систем стимулировали разработку сверхминиатюрных RFID-ридеров и тагов с приемлемыми для коммерческого применения характеристиками. Развитие КМОП-технологий позволило создать ряд новых изделий, в частности мобильные пассивные УВЧ-ридеры RFID. Разработка многополюсного RFID-приемника обещает дать новый толчок развитию RFID-технологий. Преимущества СВЧ-диапазона также нашли свое применение в СВЧтехнологиях RFID и расширили горизонты RFID-приложений.

## Список литературы

- 1. NIKITIN P. V., RAO K. V. S. Antennas and propagation in UHF RFID systems // Proc. of the IEEE Intern. conf. on RFID, Las Vegas (USA), Apr. 2008. P. 277-288.
- 2. RAO K. V. S. An overview of backscattered radio frequency identification system (RFID) // Proc. of the IEE Collog. RFID technology, London (UK), Oct. 1999. P. 2/1-2/5.

- 3. UDO KARTHAUS, MARTIN FISHER. Fully integrated passive UHF RFID transponder IC with 16.7-uW minimum RF input power // IEEE J. Solid-State Circuits. 2003. V. 38, N 10. P. 1602-1608.
- PRADEEP B. KHANNUR, ET AL. An 860 to 960MHz RFID Reader IC in CMOS // Proc. of. the IEEE radio frequency integrated circuits symp., 2007. P. 269-272.
- 5. AMINGHASEM SAFARIAN, ET AL. An integrated RFID reader // Proc. of the IEEE Intern. solid-state circuits conf. 2007. P. 218.
- JEIYOUNG LEE, ET AL. A UHF mobile RFID reader IC with self-leakage canceller // Proc. of. the IEEE radio frequency integrated circuits symp. 2007. P. 273-276.
- 7. KIPNIS I., ET AL. A 900 MHz UHF RFID reader transceiver IC // IEEE Intern. solid-state circuits conf. 2007. P. 214.
- ICKJIN KWON, ET AL. A single-chip CMOS transceiver for UHF mobile RFID reader // IEEE J. Solid-State Circuits. 2008. V. 43, N 3. P. 729-738.
- WAN-KYU KIM, ET AL. A passive circulator for RFID application with high isolation using a directional coupler // Proc. of the 36th Europ. microwave conf., UK, 2006. P. 196-199.
- 10. Pat. USA. Multiport receiver / A. Muchkaev. 04.2008.
- 11. MORELOS-ZARAGOZA R., ET AL. A software radio receiver with direct conversion and its digital processing // IEICE Trans. Commun. (Japan). 2002. V. E85-B, N 12.
- HYYRYLAINEN J., ET AL. Six-port direct conversion receiver // Proc. of the 27th Europ. microwave conf. exibition, Jerusalem, Sept. 1997. P. 341-346.
- TATU S., ET AL. A new direct millimiter-wave six-port receiver // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2001. V. 49, N 12. P. 2517-2522.
- 14. TIM HENTSCHEL. The six-port as a communication receiver // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 2005. V. 53, N 3. P. 1039-1047.
- Львов А. А., Моржаков А. А., Кудряшов Ю. Ю., Галкина Л. В. Статистический подход к проблеме измерения параметров СВЧ-двухполюсников с помощью многополюсника // Электрон. техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1989. Вып. 8(422). С. 38-43.
- 16. L'VOV A. A., MUCHKAEV A. S. A new technique for measuring the scattering parameters of two-port junctions with a single multi-port reflectometer // Digest of the 47th conf. on the automatic RF techniques group, San Francisco (USA). P. 181-187.
- 17. Вучков И. Н., Бояджиева Л. Н., Солаков Е. Б. Прикладной линейный регрессионный анализ / И. Н. Вучков, Л. Н. Бояджиева, Е. Б. Солаков. М.: Финансы и статистика, 1987.
- MAJID BAGHAEI-HEJAD, ET AL. A novel passive tag with asymmetric wireless link for RFID and WSN applications // Proc. ISCAS-2007. P. 1593-1596.
- PENGYUAN YU., ET AL. Securing RFID with ultra-wideband modulation. http://events.iaik.tugraz.at /RFIDSec06/Program/papers/004%20 -%20Ultra%20Wideband%20 Modulation.pdf
- 20. Long-range ultra-wideband radio-frequency identification. Lawrence Livermore National Laboratory. https://www-eng.llnl.gov/pdfs/dist\_sys\_sensors-8.pdf.
- 21. Pat. 7385511 USA, Carrierless RFID system / A. Muchkaev.

Мучкаев Артем Санджиевич – канд. техн. наук, консультант "Мартек Корпорейшн" (Лас-Вегас, США); e-mail: artem.muchkaev@gmail.com