

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ КМОП-СХЕМЫ В СИСТЕМАХ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ: ОПЫТ РАЗРАБОТКИ

Д. Ахметов, к.т.н.¹, Е. Балашов, к.т.н.², В. Калинин, к.т.н.³, А. Коротков, д.т.н.⁴,
Д. Морозов, к.т.н.⁵, М. Пилипко, к.т.н.⁶, И. Пятак⁷, И. Румянцев⁸

УДК 621.382
ВАК 05.27.00

Системы радиочастотной идентификации (РЧИД) относятся к классу беспроводных сенсорных сетей и широко используются для мониторинга и контроля состояния различных объектов, в том числе для персональной идентификации, контроля доступа, управления производственными процессами и т.п. В статье представлены результаты разработки интегральной КМОП-схемы считывателя системы РЧИД для объектов транспортной инфраструктуры. Данная ИС предназначена для идентификации меток на основе резонаторов на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Разработка выполнена по заказу ОАО "Авангард". Статья продолжает цикл публикаций журнала "ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес", в которых рассказывается о результатах выполнения коллективом авторов наиболее интересных проектов в области разработки КМОП ИС для беспроводных систем связи [1, 2].

В состав системы РЧИД в общем случае входят два основных элемента: приемно-передающее устройство, которое называют считывателем, и метка. В зависимости от используемых технологий и решаемых задач метка является простейшим отражателем либо несложным приемно-передающим устройством, функция которого – передать сигнал отклика на входное воздействие считывателя [3, 4, 5]. Этот сигнал содержит информацию об уникальном номере метки в виде цифрового кода.

Разработанная интегральная схема считывателя включает в себя приемно-передающий тракт с диапазоном рабочих частот 2,40–2,48 ГГц. ИС обеспечивает когерентный прием отраженного сигнала метки и построена на основе синтезатора частот с дробным коэффициентом деления частоты. В синтезаторе используется петля фазовой автоподстройки частоты с программируемым делителем и цифровым дельта-сигма-модулятором в обратной связи. В качестве опрашивающего используется сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

ИС считывателя ориентирована на применение совместно с метками, выполненными в виде пассивного отражателя на ПАВ-резонаторе [6]. Метки данного типа обладают следующими преимуществами: высокой устойчивостью к воздействию неблагоприятных условий внешней среды и высокой защищенностью от помех и несанкционированной перезаписи кода.

Рассмотрим общую структуру модуля считывателя, в состав которого входят ИС и другие блоки. Отдельно

¹ СПбПУ, akhmetov@spbstu.ru.

² СПбПУ, АО "ВНИИРА", balashov_ev@mail.ru.

³ ОАО "Авангард", vl_kalinin@mail.ru.

⁴ СПбПУ, АО "ВНИИРА", korotkov@spbstu.ru.

⁵ СПбПУ, dvmorozov@inbox.ru.

⁶ СПбПУ, m_m_pilipko@rambler.ru.

⁷ СПбПУ, pyatak_im@spbstu.ru.

⁸ СПбПУ, i.a.rumiantsev@spbstu.ru.

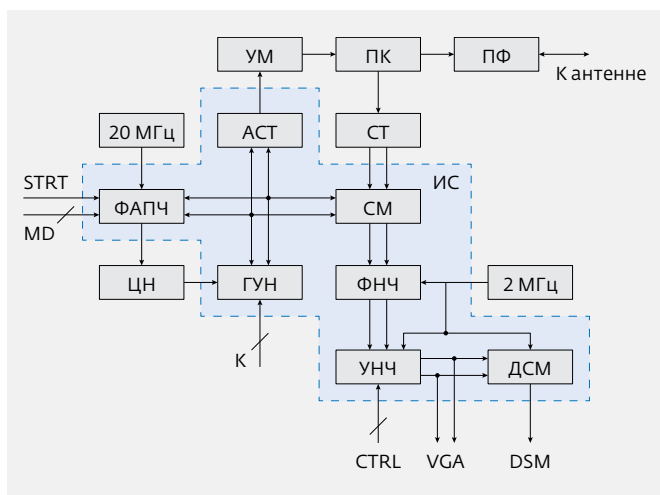


Рис.1. Структурная схема модуля считывателя

проанализируем особенности построения передающей и приемной частей считывателя, а также результаты экспериментальных работ по исследованию изготовленных образцов ИС считывателя.

СТРУКТУРА МОДУЛЯ СЧИТЫВАТЕЛЯ

Структурная схема модуля считывателя включает в себя: интегральную схему считывателя (ИС), усилитель мощности (УМ), переключатель (ПК), полосовой фильтр (ПФ), симметрирующее устройство (СТ), цепь накачки (ЦН) и два опорных кварцевых генератора на 2 МГц и 20 МГц (рис.1). К основным блокам интегральной схемы считывателя относятся синтезатор частот, состоящий из схемы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и генератора, управляемого напряжением (ГУН), активное симметрирующее устройство (АСТ), смеситель (СМ), фильтр нижних частот (ФНЧ), усилитель с регулируемым коэффициентом усиления (УНЧ) и дельта-сигма-модулятор (ДСМ).

В ходе предварительной калибровки с помощью цифровых управляющих сигналов, передаваемых по шине К, задается начальная частота ГУН. Цифровыми управляющими сигналами на шине MD устанавливается диапазон рабочих частот. По положительному фронту сигнала на входе STRT начинается формирование ЛЧМ-импульса, который с выхода интегральной схемы считывателя через усилитель мощности, переключатель и полосовой фильтр поступает на антенну. Отраженный от метки сигнал через полосовой фильтр, переключатель и симметрирующее устройство поступает на вход интегральной схемы считывателя. Выходные сигналы модуля снимаются с аналогового балансного выхода VGA и цифрового выхода DSM. С помощью цифровых сигналов на шине CTRL можно регулировать коэффициент передачи усилителя с переменным коэффициентом усиления.

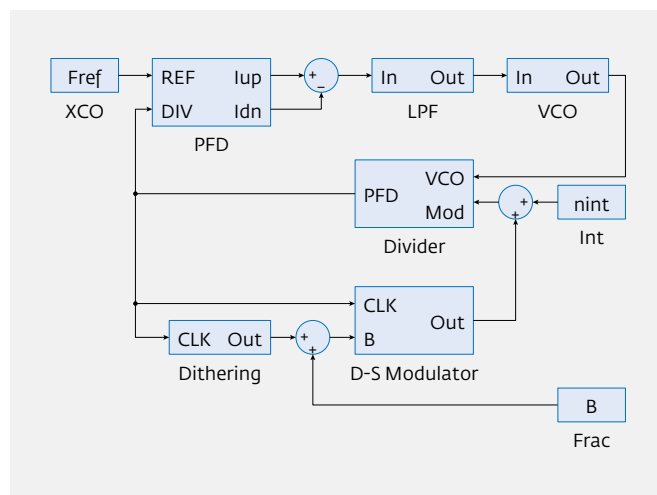


Рис.2. Структурная схема синтезатора частот в виде функциональной модели

ПЕРЕДАЮЩИЙ ТРАКТ

Основу передающего тракта составляет синтезатор частот. Параметрический синтез и расчет блоков синтезатора частот выполняется исходя из совокупности требований ко времени перестройки, уровню фазовых шумов и нелинейных искажений. Поэтому первым этапом разработки является функциональное моделирование синтезатора в целях формирования частных параметров основных блоков. Для этого в среде Simulink была разработана функциональная модель синтезатора частот в виде структурной схемы, состоящей из следующих блоков (рис.2): генератор, управляемый напряжением (VCO), опорный генератор (XCO), фазовый детектор и цепь накачки (PFD), делитель частоты (Divider), дельта-сигма-модулятор (D-S Modulator), фильтр нижних частот (LPF) и блок генерации случайного сигнала (Dithering) для уменьшения уровня побочных гармоник в спектре выходного сигнала VCO [7]. Блок Int имитирует регистр, задающий значение целой части формируемого коэффициента деления, а блок Frac – значение дробной части.

Особенностью функциональной модели является возможность учета паразитных (неидеальных) параметров блоков: задержек, различия фронтов и спадов импульсов, в том числе тока накачки и тока разряда, фазовых шумов генераторов, нелинейной характеристики ГУН. Так, модель генераторов включает источники белого, фликкерного шума и источники шума со спектральной плотностью мощности, обратно пропорциональной второй и третьей степени частоты. Шумовые сигналы формируются во временной области с помощью фильтрации и интегрирования исходного белого шума. Анализ паразитных гармоник, вносимых дельта-сигма-модулятором в петле обратной связи синтезатора, учитывает эффект периодичности выходного сигнала аккумулятора, в который записывается

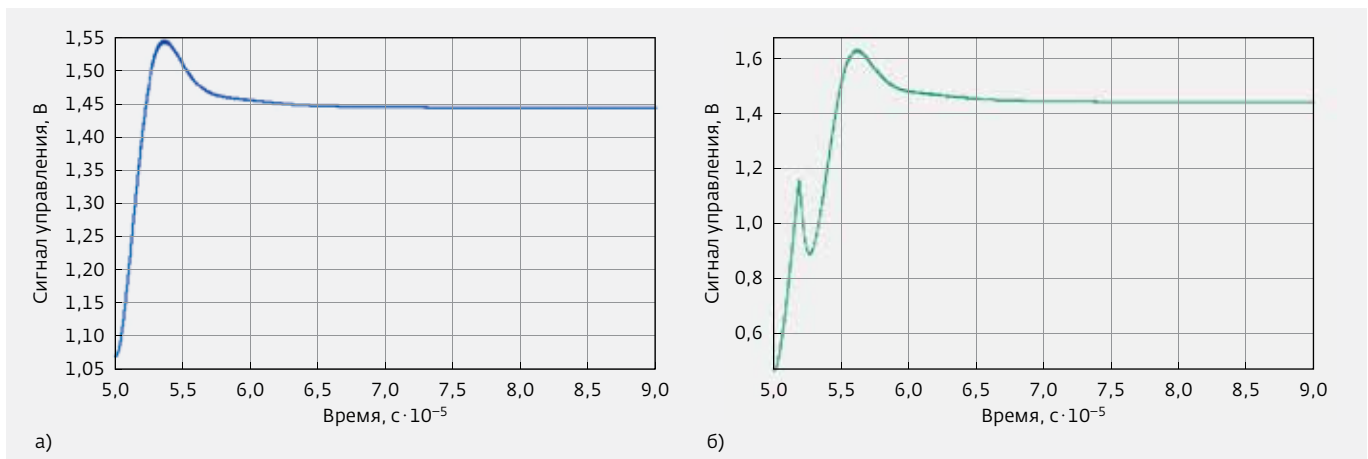


Рис.3. Зависимость сигнала управления ГУН от времени при перестройке частоты от 2,40 до 2,44 ГГц (слева) и от 2,40 до 2,48 ГГц (справа)

значение коэффициента деления на каждом такте выходного сигнала делителя частоты при формировании несущего колебания. Результаты моделирования позволяют оценить крутизну характеристики перестройки ГУН, ток цепи накачки, время перестройки, уровень фазовых шумов и нелинейных искажений синтезатора.

В ходе моделирования были сняты следующие зависимости: временная зависимость сигнала управления ГУН (рис.3), спектр выходного колебания (рис.4) и спектральная плотность средней мощности фазовых шумов на частоте 2,40 ГГц (рис.5). Отметим, что при перестройке частоты в диапазоне от 2,40 до 2,48 ГГц наблюдается сбой синхронизации, что является следствием нелинейности характеристик блоков синтезатора частот, в первую очередь блока ГУН. Использование линейной модели не позволяет

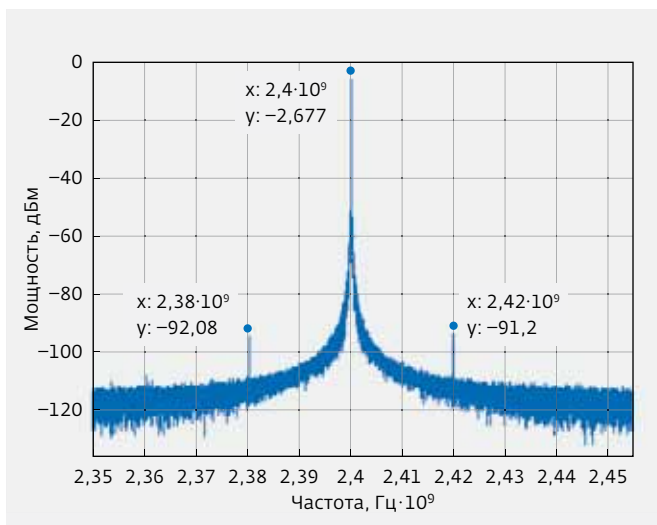


Рис.4. Спектр выходного колебания синтезатора частот на частоте 2,40 ГГц

определить наличие такого эффекта. Данный факт важен с практической точки зрения, так как время перестройки в этих случаях различается. Например, для варианта, представленного на левом рисунке, этот показатель составил 17,2 мкс, а на правом – 23,2 мкс (см. рис.3).

При формировании колебания на частоте 2,40 ГГц, кроме гармоники на основной частоте, выделяются две побочные гармоники, равноудаленные от основной частоты и кратные частоте сравнения, в данном случае частоте опорного колебания. Уровень паразитных гармоник составил $-91,5$ дБм, уровень основной частоты $-2,6$ дБм (см. рис.4).

Анализ фазовых шумов также показывает отличие от случая использования линейной модели. В частности, уровень фазовых шумов возрастает при уменьшении частоты отстройки, в то время как линейная модель предсказывает уменьшение. Значения уровня фазового шума при отстройке на 1 кГц, 100 кГц и 1 МГц составили -78 дБн/Гц, -88 дБн/Гц и -118 дБн/Гц, соответственно (см. рис.5).

Отметим, что по результатам моделирования в среде Cadence Virtuoso с вычислителем Spectre время перестройки в диапазоне от 2,40 до 2,44 ГГц составило 17,8 мкс (расхождение с моделированием на функциональном уровне в среде Simulink не более 4%), относительный уровень побочных гармоник – минус 88,6 дБн (расхождение не более 2 дБ).

В качестве источника задающего колебания использован внешний опорный генератор с частотой 20 МГц. Генератор синтезатора формирует сигнал с линейной частотной модуляцией. Он реализован на основе ГУН, построенного по балансной схеме с банком подстроечных конденсаторов в цепи управления. Разброс параметров элементов ГУН вследствие влияния допусков технологического процесса требует проведения процедуры калибровки

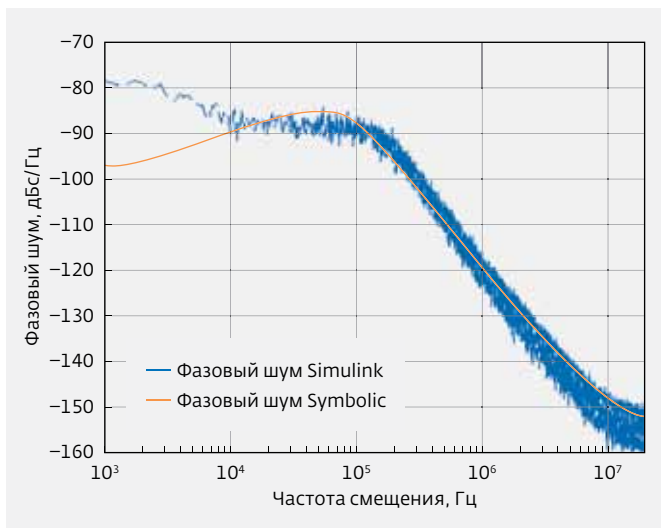


Рис.5. Спектральная плотность средней мощности фазовых шумов

с использованием банка конденсаторов. Предусмотрены следующие режимы работы передающего тракта: формирование одиночного импульса ЛЧМ-сигнала в диапазоне частот 2,40–2,44 ГГц, 2,44–2,48 ГГц, 2,40–2,48 ГГц и режим калибровки. Режимы устанавливаются путем задания управляющих сигналов на шине MD (см. рис.1). Для преобразования сигнала к небалансному виду использовано активное симметрирующее устройство на паре МОП-транзисторов.

ПРИЕМНЫЙ ТРАКТ

Приемный тракт схемы считывателя включает в себя двойной балансный смеситель по схеме Гильберта [8], фильтр нижних частот на переключаемых конденсаторах

(SC-фильтр) и операционных транскондуктивных усилителях (ОТУ), усилитель с регулируемым коэффициентом усиления и дельта-сигма-модулятор четвертого порядка.

SC-фильтр Чебышева пятого порядка с частотой среза 200 кГц и тактовой частотой 2 МГц реализован по балансной схеме методом операционной имитации лестничного прототипа (рис.6). Потребляемая мощность фильтра равна 14 мВт, уровень третьей гармоники на выходе фильтра на частоте среза при амплитуде входного сигнала 0,5 В составляет –62,7 дБ.

Операционный транскондуктивный усилитель построен по КМОП-схеме с использованием двух комплементарных входных каскадов, соединенных параллельно по одноименным входам и касодно включенных с выходными цепями на комплементарных транзисторах. Такое решение позволило расширить полосу рабочих частот и увеличить размах входного и выходного сигналов усилителя.

При использовании ОТУ в составе SC-фильтра не предполагается работа усилителя на резистивную нагрузку и, следовательно, не требуется малое выходное сопротивление. Поэтому в ОТУ отсутствует выходной каскад повторителя напряжения. Поскольку частотные характеристики ОТУ определяют полосу рабочих частот схемы, важно, чтобы ОТУ был достаточно широкополосным и обладал высоким коэффициентом усиления по напряжению в области низких частот. Реализованный SC-фильтр имеет возможность перестройки по тактовой частоте до 20 МГц, а по частоте среза до 2 МГц. При нагрузочных емкостях 10 пФ параметры реализованного ОТУ составили: полоса единичного усиления 128 МГц, коэффициент усиления по напряжению в области низких частот 60,3 дБ.

К выходу SC-фильтра подключен усилитель с регулируемым коэффициентом усиления (рис.7). Схема реализован

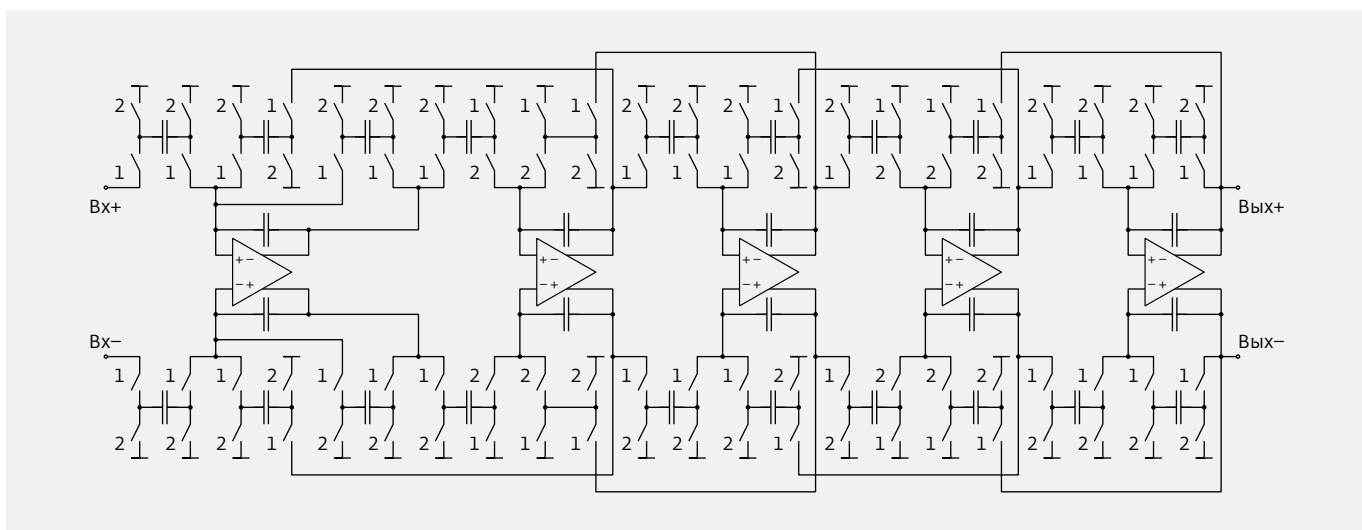


Рис.6. Фильтр нижних частот на переключаемых конденсаторах

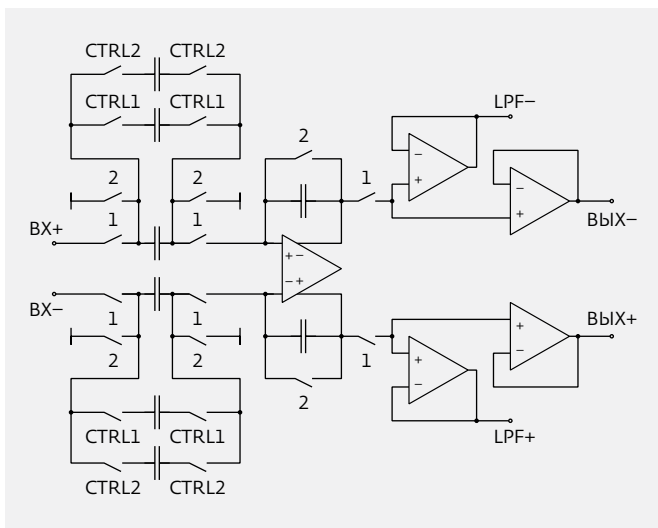


Рис.7. Низкочастотный усилитель на переключаемых конденсаторах

вана на ОТУ и переключаемых конденсаторах. При нулевом уровне управляющих сигналов CTRL1 и CTRL2 обеспечивается коэффициент усиления по напряжению, который компенсирует ослабление сигнала в полосе пропускания SC-фильтра. Когда CTRL1=CTRL2=1, то схема усиливает в 14 раз. В остальных случаях обеспечиваются промежу-

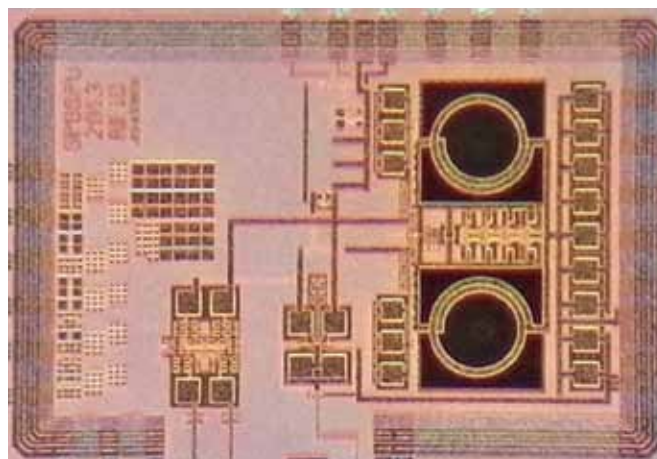


Рис.8. Кристалл ИС считывателя системы радиочастотной идентификации

точные значения коэффициента усиления. Потребляемая мощность усилителя составляет 14,0 мВт.

Для формирования выходного цифрового сигнала использован дельта-сигма-модулятор аналого-цифрового преобразователя (АЦП) следящего типа [9]. Такие АЦП отличаются низкой потребляемой мощностью при высоком разрешении, которое в зависимости от диапазона рабочих частот может составлять

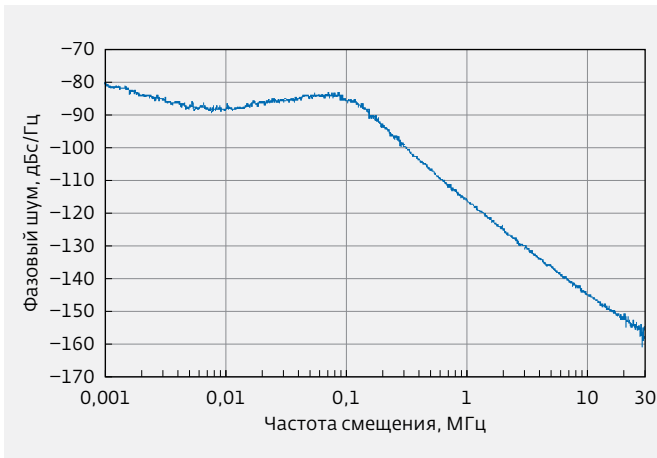


Рис.9. Результаты измерений спектра фазового шума синтезатора частот

от 8 до 16 разрядов. Свойства дельта-сигма АЦП главным образом определяются характеристиками дельта-сигма-модулятора, так как преобразование аналогового сигнала в цифровой осуществляется именно в модуляторе. По результатам эксперимента динамический диапазон модулятора составил 56,0 дБ, что обеспечивает АЦП разрешающую способность девяти разрядов при тактовой частоте 2 МГц. Потребляемая мощность не превышает 13,0 мВт.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ ИС

Спроектированная интегральная схема считывателя системы радиочастотной идентификации была изготовлена компанией UMC по КМОП-технологии с топологическими нормами 180 нм. Площадь кристалла составила 7 мм² (рис.8).

Исследования характеристик кристалла ИС проводились с использованием зондовой станции Cascade EP6RF и анализатора источника сигнала Rohde & Schwarz FSUP-8.

Сравнение характеристик разработанной ИС и зарубежных аналогов

Характеристика	RSSI GmbH (Германия)	CTR AG (Австрия)	RFSAW Inc. (США)	Данная разработка
Частотный диапазон, ГГц	2,40–2,48	2,40–2,48	2,40–2,48	2,40–2,48
Выходная мощность, мВт	30	10	10	30
Дальность считывания, м	3	3	10	3

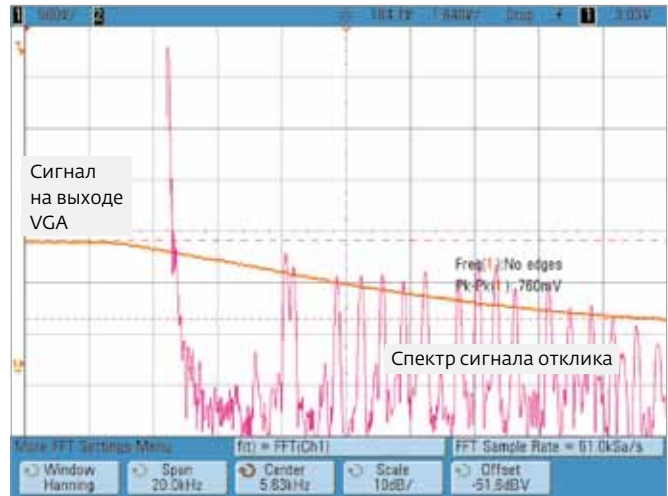


Рис.10. Результаты эксперимента: сигнал отклика метки на выходе VGA во временной области и спектр сигнала отклика

Измерения показали, что ИС обладает следующими характеристиками [10]:

- диапазон рабочих частот 2,40–2,48 ГГц;
- уровень выходной мощности –1,25 дБм;
- уровень фазового шума –80 дБн/Гц при отстройке 1 кГц от рабочей частоты;
- шаг перестройки по частоте 150 кГц;
- время перестройки по частоте не более 20 мкс;
- напряжение питания 1,8 В;
- потребляемая мощность 100 мВт.

В результате измерения зависимости фазового шума синтезатора частот при отстройке по частоте выяснилось, что отклонение реальных значений параметров от результатов моделирования не превышает 3 дБ (рис.9).

Были проведены экспериментальные испытания модуля считывателя с ПАВ-меткой. При использовании внешнего усилителя мощности типа ADL5602 дальность устойчивого считывания сигнала составила 3 м. В спек-

тре сигнала выделяются гармоники, частоты которых определяют идентификационный код метки (рис.10).

Сравнение разработанной интегральной схемы и зарубежных аналогов показало, что предложенное решение по характеристикам не уступает известным образцам и может применяться в отечественных системах РЧИД в качестве импортозамещающего изделия (см. таблицу).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Коротков А.С., Морозов Д.В., Пилипко М.М., Пятак И.М., Буданов Д.О.** Аналого-цифровые преобразователи для беспроводных систем связи: опыт разработки // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2016. № 2.
2. **Балашов Е.В., Коротков А.С., Румянцев И.А.** Интегральные КМОП-схемы диапазона СВЧ: опыт разработки // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2016. № 7.
3. **Григорьева А.** Тенденции развития RFID-технологии: обзор мирового и российского рынка // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2016. № 4.
4. **Коротков А.С.** Системы радиочастотной идентификации – обзор // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2016. Т. 59. № 3.
5. **Ахметов Д.Б., Коротков А.С.** Приемно-передающее устройство считывания информации радиочастотных меток для интегрального узла беспроводной сенсорной сети // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика, телекоммуникации, управление. 2010, 2(97).
6. **Калинин В.А., Строгонов К.А., Пащенко В.П.** Современное состояние акустоэлектронных устройств и их применение в микросистемотехнике // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2013, вып. 128, № 5.
7. **Ахметов Д.Б., Коротков А.С.** Функциональное моделирование синтезаторов частот в среде Simulink // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2013. Т. 56. № 11.
8. **Коротков А.С.** Двойной балансный смеситель на МОП-транзисторах // Микроэлектроника. 2011. Т. 40. № 2.
9. **Коротков А.С., Пилипко М.М., Морозов Д.В., Хауэр Й.** Дельта-сигма модулятор с частотой дискретизации 50 МГц на основе 0,18 мкм КМОП технологии // Микроэлектроника. 2010. Т. 39. № 3.
10. **Ахметов Д.Б., Балашов Е.В., Морозов Д.В., Пилипко М.М. и др.** СВЧ-приемопередатчик по 180 нм КМОП-технологии для идентификации транспортных средств // Твердотельная электроника. Сложные функциональные блоки РЭА: Материалы научно-технической конференции. – М.: ОАО "НПП "Пульсар", 2014.