УДК 621.382

Денис И. Сотсков¹, Алексей В. Зубаков², Николай А. Усачев³, Александр В. Ермаков⁴, Александр Ю. Никифоров⁵ ¹⁻⁵Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия ¹⁻⁴Акционерное общество «Экспериментальное научно-производственное объединение СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ», Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия ¹e-mail: disotskov@mephi.ru, https://orcid.org/0000-0003-2047-2008 ²e-mail: avzub@spels.ru, https://orcid.org/0009-0008-0926-2134 ⁴e-mail: avermakov@mephi.ru, https://orcid.org/0009-0003-6673-7494 ⁵e-mail: aynikiforov1@mephi.ru, https://orcid.org/0000-0002-2427-663X

ДОВЕРЕННЫЙ УВЧ ТРАКТ ПРИЕМНИКА СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ МАРКИРОВКИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ* <u>DOI: http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.4.07</u>

Аннотация. Представлены результаты проектирования сложно-функциональных блоков из состава УВЧ тракта приемника систем цифровой маркировки и идентификации – малошумящего усилителя, квадратурного демодулятора и видеоусилителя со встроенным фильтром нижних частот, предназначенных для изготовления по отечественной КМОП технологии 180 нм. Малошумящий усилитель выполнен с интегрированной схемой шунтирования входа и включает также два переключателя сигналов с одним входом и двумя выходами, реализованных на основе МОП-транзисторов. Применение данного подхода позволило увеличить значение верхней границы линейности по входу УВЧ тракта приемника на величину не менее 30 дБ при увеличении значения интегрального коэффициента шума. Квадратурный демодулятор выполнен по классической схеме построения – в качестве смесительного ядра использовано пассивное кольцо на МОП-транзисторах. Видеоусилитель с программируемым коэффициентом усиления реализован совместно с интегрированным фильтром нижних частот, построенным на основе биквадратных Сложно-функциональные блоки звеньев Тоу-Томаса. предназначены для разработки приемопередающих СБИС считывателей с чувствительностью не более -75 дБм и верхней границей линейности амплитудной характеристики по входу в режиме «Talk» не менее 10 дБм. Характеристики доверенности приемного тракта обеспечиваются за счет применения собственных схемно-топологических решений, предполагающих верификацию в ходе экспериментальных исследований и испытаний кристаллов. Значения электрических параметров рассматриваемого в настоящей работе приемного тракта соответствуют зарубежным аналогам, выполненным по КМОП технологиям со схожими проектными нормами. Таким образом, актуальным является создание на основе рассматриваемой приемопередающей СБИС отечественных считывателей стандарта ISO 18000-6С, предназначенных для применения на объектах критической инфраструктуры.

Ключевые слова: КМОП, сложно-функциональный блок, приемник, УВЧ, цифровая маркировка, радиочастотная идентификация.

<u>Для цитирования:</u> СОТСЌОВ Денис И. и др. ДОВЕРЕННЫЙ УВЧ ТРАКТ ПРИЕМНИКА СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ МАРКИРОВКИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ. Безопасность информационных технологий, [S.l.], т. 30, № 4, с. 114–127, 2023. ISSN 2074-7136. URL: https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1566. DOI: http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.4.07.

*Благодарности. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (код (шифр) научной темы «FSWU-2022-0019», рег. № НИОКТР 122121600004-3). Авторы выражают благодарность А.Ю. Резнику (АО «Микрон») за поддержку и ценные рекомендации и М.А. Новикову (НИЯУ МИФИ) за помощь в разработке программного обеспечения автоматизированного синтеза катушек индуктивности.

Denis I. Sotskov¹, Alexey V. Zubakov², Nikolay A. Usachev³, Alexander V. Ermakov⁴, Alexander Y. Nikiforov⁵ ¹⁻⁵National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoe sh., 31, Moscow, 115409, Russia ¹⁻⁴Joint Stock Company "Experimental Research and Production Association SPECIAL ELECTRONIC SYSTEMS", Kashirskoe sh., 31, Moscow, 115409, Russia ¹e-mail: disotskov@mephi.ru, https://orcid.org/0000-0003-2047-2008 ²e-mail: avzub@spels.ru, https://orcid.org/0009-0005-3188-1415 ³e-mail: nausach@spels.ru, https://orcid.org/0009-0008-0926-2134 ⁴e-mail: avermakov@mephi.ru, https://orcid.org/0009-0003-6673-7494 ⁵e-mail: avnikiforov1@mephi.ru, https://orcid.org/0000-0002-2427-663X

<u>The Trusted UHF Receiver for Radio Frequency Identification</u> <u>of Critical Infrastructure Objects</u>* <u>DOI: http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.4.07</u>

Abstract. Results of designing the low-noise amplifier, quadrature demodulator, and baseband amplifier with an integrated low-pass filter for the UHF radio frequency identification receiver are presented. IP-blocks are designed for implementation in the domestic CMOS 180 nm technology process. The low-noise amplifier is implemented with integrated single pole double throw switches based on the MOSFETs which are needed for bypass mode realization at the RF input. The benefits of this approach are increased input linearity of the receiver by no less than 30 dB with an increase of a noise figure. The quadrature demodulator is realized according to a typical design based on the passive MOSFET mixer core. The programmable-gain baseband amplifier is implemented with an integrated low-pass filter based on Tow-Thomas biquad architecture. IP-blocks designed for use in an RFID reader transceiver VLSI IC with sensitivity value no more than -75 dBm and input linearity value not less than 10 dBm in a «Talk» mode. The trustiness of the receiver is provided by the full-cycle design procedure and verification under experimental investigation. The electric parameters values of the proposed receiver correspond to foreign VLSIs implemented in a CMOS process with the same technology nodes. Thus, it is important to design the domestic ISO 18000-6C reader equipment intended for critical infrastructure.

Keywords: CMOS, IP-block, receiver, UHF, tagging, radiofrequency identification.

<u>For citation:</u> SOTSKOV Denis I. et al. The Trusted UHF Receiver for Radio Frequency Identification of Critical Infrastructure Objects. IT Security (Russia), [S.I.], v. 30, no. 4, p. 114–127, 2023. ISSN 2074-7136. URL: https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1566. DOI: http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.4.07.

*****Acknowledgement. This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (code of the scientific topic "FSWU-2022-0019", project registration number 122121600004-3). The authors express their gratitude to A.Y. Reznik (JSC "Mikron") for helpful discussion and support of the project and M.A. Novikov (MEPhI) for assistance in the development of software for automated synthesis of inductors.

Введение

Системы беспроводной (радиочастотной) маркировки и идентификации УВЧ диапазона широко применяются для задач автоматизации учета, управления складскими запасами, отслеживания технологических процессов в режиме реального времени, многих других, в т.ч. в составе объектов критической инфраструктуры. Подобные системы состоят из считывателя (одного или нескольких), задачей которого является излучение радиочастотного сигнала и детектирование отраженного от метки сигнала, и множества радиочастотных меток, которые обычно являются пассивными устройствами [1].

Считыватель является наиболее дорогостоящим и сложным компонентом системы и чаще всего реализуется на основе специализированных приемопередающих СБИС, которые изготавливаются по КМОП и SiGe БиКМОП технологиям. Отечественные

высокоинтегрированные приемопередающие СБИС, сочетающие УВЧ радиотракт, микропроцессор (МП), память, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (А/Ц), схему цифровой обработки сигналов (ЦОС) и управления (ИСУ) отсутствуют.

В результате анализа существующих решений (табл. 1) установлено, что подобные СБИС отличаются по сравнению с традиционными приемопередатчиками систем связи (WiFi, Bluetooth и др.) расширенным динамическим диапазоном по входу, что обусловлено необходимостью детектирования слабых сигналов, отраженных от меток (минус 70...минус 90 дБм) в присутствии мощного блокирующего сигнала передающего канала (10 дБм и более) при накладываемых ограничениях на потребляемую мощность, размер кристалла и стоимость.

Обозначение, разработчик	R2000, Impinj (CIIIA)	НИЯУ МИФИ (Россия)	Шанхайский Восточно- китайский унив. (КНР)	ST25RU3993, STMicroelectro nics (EC)	PR9200, PHYCHIPS (KHP)
Технология	SiGe БиКМОП 180 нм	SiGe БиКМОП 420/250 нм	КМОП 180 нм	н.д.	КМОП
Степень интеграции	УВЧ, НЧ, А/Ц, ИСУ, ЦОС	УВЧ, ИСУ	УВЧ, НЧ	УВЧ, НЧ, А/Ц, ИСУ	УВЧ, НЧ, А/Ц, ИСУ, модем, МК, память
Диапазон рабочих частот, МГц	860 - 960	860 - 960	835 - 930	840 - 960	840 - 960
Чувствительность приемника, дБм	-791) / -932)	-85 ²⁾	н.д.	-67 ¹⁾ / -90 ²⁾	-60 ¹⁾ / -85 ²⁾
Верхняя граница линейности амплитудной характеристики приемника по входу, дБм	-2-+6	+6 ¹⁾ /-23 ²⁾	н.д.	+9	-42 ¹⁾ / -2413 ²⁾
Выходная мощность, дБм	19	17	10	20	20

Таблица 1. Характеристики современных приемопередающих СБИС систем цифровой маркировки и идентификации стандарта EPC Class 1 Gen2 / ISO 18000-6C

Примечание:

1 – при наличии блокирующего сигнала на входе приемника (в режиме «Talk»);

2 – при отсутствии блокирующего сигнала на входе приемника (в режиме «LBT»).

В рамках настоящей работы рассмотрен приемный тракт СБИС приемопередатчика считывателя, предназначенного для изготовления по отечественной КМОП технологии 180 нм. Показатели доверенности обеспечиваются за счет полного цикла проектирования и верификации разработанных сложно-функциональных блоков в ходе экспериментальных исследований и изготовления в рамках отечественной технологии.

1. Архитектура УВЧ тракта приемника

Структурная схема УВЧ тракта приемника, выбранная для реализации в рамках настоящей работы, показана на рис.1. Представленный тракт выполнен на основе архитектуры с прямым преобразованием частоты и имеет несимметричный вход УВЧ-сигнала и дифференциальные квадратурные (*I/Q*) низкочастотные выходы. В состав УВЧ тракта приемника входят следующие сложно-функциональные блоки (СФБ):

– малошумящий усилитель (МШУ), необходимый для усиления входного радиочастотного сигнала с малым значением собственных шумов (что в большинстве своем определяет интегральный коэффициент шума (чувствительность) всего приемника);

– квадратурный демодулятор, осуществляющий преобразование спектра частот вниз / демодуляцию входного сигнала;

– видеоусилитель со встроенным фильтром нижних частот (ФНЧ-ВУ), выполняющий функции фильтрации побочных гармонических сигналов, поступающих с

выхода КД, и усиления сигнала до уровня, достаточного для дальнейшего аналогоцифрового преобразования (АЦП).



Puc. 1. Структурная схема УВЧ тракта приемника Fig. 1. Block diagram of the UHF receiver

Конструкция УВЧ тракта приемника предполагает применение внешнего серийновыпускаемого симметрирующего трансформатора импеданса (СТИ), обеспечивающего сопряжение МШУ с несимметричным выходом с КД, имеющим дифференциальный вход. Такой подход позволяет уменьшить занимаемую на кристалле площадь.

Проектирование представленных СФБ УВЧ тракта приемника осуществлялось в рамках отечественного КМОП технологического процесса с проектной нормой 180 нм с использованием разработанной ранее библиотеки СВЧ базовых элементов [2, 3].

2. Малошумящий усилитель

Упрощенная электрическая схема СФБ МШУ показана на рис. 2. СФБ МШУ выполнен на основе 2-х усилительных каскадов: 1-ый образован транзисторами VT5 и VT8 в каскадном включении [4, 5], 2-ой представляет собой истоковый повторитель на основе транзисторов VT4 и VT6. Потенциалы на выводах VB1 и VB2 формируются посредством внутренней цепи смещения. Резонансный контур, образованный конденсатором C3 и индуктивностью L1 в цепи стока транзистора VT5, ограничивает диапазон рабочих частот СФБ МШУ. С целью расширения/подстройки диапазона рабочих частот, в составе СФБ МШУ применяется матрица переключаемых конденсаторов (C1, C2, C4, C5) с двумя цепями управления (CBW0, CBW1) [6, 7].



Fig. 2. Simplified schematic of the proposed LNA



Рис. 3. Внешний вид интерфейса ПО автоматизированного синтеза катушек индуктивности сложной формы Fig. 3. Interface of the automated synthesis software for shaped form inductors

Проектирование интегральных катушек индуктивности L1 – L3 из состава МШУ СФБ осуществлялось С использованием реализованного программного обеспечения (ПO) автоматизированного синтеза катушек индуктивности сложной формы (рис. 3) [8].

Определение геометрических параметров катушек индуктивностей осуществляется использованием с выражения (1) [9]. Синтез топологий катушек индуктивности проводился для заданных диапазонов входных параметров: требуемое значение индуктивности (L), интервалы значений количества витков (N), зазоров между линиями (S), ширин линий (W).

$$L_{sp} = \left(\frac{\mu * n^2 * d_{avg} * c_1}{2}\right) * \left(ln\left(\frac{c_2}{\rho}\right) + c_3 * \rho + c_4 * \rho^2\right)$$
(1)

где c_1, c_2, c_3, c_4 – подгоночные коэффициенты, n – число витков, d_{avg} – средний диаметр, ρ – степень заполнения.

Уточненный расчет параметров интегральных катушек индуктивности проводился с использованием средств электромагнитного анализа, входящих в состав САПР Advanced Design System d. Keysight Tech. C целью снижения последовательного сопротивления (R_S) и увеличения добротности (Q) на рабочих частотах СФБ МШУ катушки индуктивности были выполнены с использованием всех 6-ти доступных слоев металлизации [10]. Ha рис. 4 приведены расчетные зависимости Rs и Q на частоте F = 1 ГГц для катушки индуктивности с L = 3 нГн от применяемых количества слоев металлизации.



Количество слоев металлизации, шт. Puc. 4. Расчетные зависимости последовательного сопротивления (Rs) и добротности (Q) для катушки индуктивности с L=3 нГн от количества применяемых слоев металлизации (F=1 ГГц) Fig. 4. Simulated dependences of the series resistance (Rs) and Q-factor (Q) for the inductor with L = 3 nH on the number of metallization layers

Обеспечение режима пониженной чувствительности и повышенной линейности (режим «Talk») УВЧ тракта приемника осуществляется посредством активации режима отключения («bypass») СФБ МШУ – УВЧ сигнал распространяется по шунтирующей цепи, подключаемой переключателями сигналов (ПС) 1 в 2; СФБ МШУ в данном режиме отключается от цепи питания [11]. ПС 1 в 2 выполнены по классической схеме построения на основе двух проходных и двух шунтирующих транзисторов [12]. С целью повышения

линейности СФБ МШУ в режиме «bypass», в составе ПС 1 в 2 применялись *n*-канальные МОП-транзисторы с «плавающим телом» и «плавающим» *n*-карманом [13].

Для лучшего согласования по входу СФБ МШУ требуется применение внешней индуктивности. С целью компенсации влияния данной индуктивности в режиме «bypass» используется подключаемый конденсатор *C*13 [11, 14].

Конструктивное исполнение СФБ МШУ предполагает его реализацию в виде отдельного кристалла с контактными площадками (рис. 5). На рис. 6 представлены типовые расчетные частотные зависимости коэффициента усиления (К_У) и коэффициента шума (К_Ш) СФБ МШУ в активном режиме. Расчетные значения основных параметров СФБ МШУ приведены в табл. 2.



Рис. 5. Внешний вид топологии СФБ МШУ Fig. 5. Layout photograph of the proposed LNA



Рис. 6. Расчетные зависимости коэффициента усиления (а) и коэффициента шума (б) СФБ МШУ в активном режиме

Fig. 6. Simulated gain (a) and noise figure (b) versus frequency for the proposed LNA in active mode

3. Квадратурный демодулятор

Структурная схема СФБ КД показана на рис. 7,а. СФБ КД состоит из двух пассивных двойных балансных смесительных ядер (*I*-CM и *Q*-CM), фильтра нижних частот (ФНЧ) в *I*- и *Q*-каналах, буферного усилителя сигнала гетеродина (*LO* БУ) и формирователя квадратурного сигнала гетеродина (0°/90°).

Денис И. Сотсков, Алексей В. Зубаков, Николай А. Усачев, Александр В. Ермаков, Александр Ю. Никифоров ДОВЕРЕННЫЙ УВЧ ТРАКТ ПРИЕМНИКА СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ МАРКИРОВКИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Наименование параметра, единица измерения	Обозна- чение	Расчетное значение	Номер пункта примеч.		
Малошумящий усилител	b				
Диапазон рабочих частот, ГГц	ΔF	0,860,96	_		
Коэффициент усиления / передачи, дБ	K_{Y}	>13 / минус 2	1 / 2		
Коэффициент шума, дБ	K _{III}	3 / < 2	1 / 2		
КСВН по входу/выходу, ед.	КСВН	2	—		
Верхняя граница линейности амплитудной характеристики по входу, дБм	<i>Р</i> _{ВХІдБ}	минус 19 / 13	1 / 2, 3		
Потребляемая мощность, мВт	Р ПОТР	22 / < 0,001	1 / 2		
Квадратурный демодулят	op				
Диапазон частот входного сигнала РЧ, ГГц	ΔF_{PY}	0,81,0	_		
Диапазон частот входного сигнала гетеродина, ГГц	ΔF_{Γ}	1,62,0	_		
Диапазон частот сигнала ПЧ, МГц	$\Delta F_{\Pi \Psi}$	0,022,0	_		
Мощность сигнала гетеродина, дБм	P_{Γ}	≥ 0	_		
Коэффициент преобразования по напряжению, дБ	K_{Π}	минус 4,5	4		
Коэффициент шума, дБ	K _{III}	9	4, 5		
Верхняя граница линейности амплитудной характеристики по входу, дБм	Рвхідб	11	4		
Потребляемая мощность, мВт	Рпотр	22	—		
Видеоусилитель со встроенным фильтро.	м нижних частот				
Коэффициент усиления по напряжению, дБ	K_{Y}	372	_		
Шаг регулировки коэффициента усиления, дБ	ΔK_{Y}	3	_		
Нижняя граница полосы пропускания (по уровню минус 3 дБ), кГц	F_H	< 3	_		
Верхняя граница полосы пропускания (по уровню минус 3 дБ), МГц	F_B	0,1/0,2/0,4/ 0,8/1,6	_		
Спектральная плотность приведенного ко входу шумового напряжения, нВ/√Гц	Sf	3,7	6, 7		
Амплитуда дифференциального напряжения на выходе при компрессии коэффициента усиления на 1 дБ, В	<i>V</i> _{выхідб}	1,49	6		
Потребляемая мощность, мВт	Р ПОТР	41	_		

Таблица 2. Основные параметры СФБ из состава УВЧ тракта приемника

Примечания:

1-значение приведено для активного режима;

2 – значение приведено для режима «bypass»; 3 – значение приведено для частоты *F* = 867 МГц;

4 – значение приведено для дифференциальной нагрузки 4 кОм;

5 – значение приведено для одной боковой полосы (SSB);

6 – при максимальном значении коэффициента усиления;

7 – в полосе пропускания 400 кГц.

Ядро смесителя выполнено по схеме построения «кольцо» на основе изолированных п-канальных МОП-транзисторов (рис. 7,б), что позволяет обеспечить высокое значение верхней границы линейности амплитудной характеристики данного СФБ [15].

Формирователь квадратурного сигнала гетеродина выполнен на основе статического делителя частоты на 2, который представляет собой *D*-триггер типа «Master-Slave», охваченный петлей обратной связи [16]. Буферный усилитель сигнала гетеродина представляет собой цепь самосмещенных инверторов, формирующих сигнал с размахом, равным напряжению питания, для снижения коэффициента шума и увеличения линейности СФБ КД [16].

Конструктивное исполнение СФБ КД предполагает его реализацию в составе СБИС приемника/приемопередатчика считывателя. На рис. 8 показаны внешний вид топологии и расчетная зависимость коэффициента преобразования по напряжению (К_П) от мощности входного сигнала спроектированного СФБ КД. Расчетные значения основных параметров СФБ КД приведены в табл. 2.



Рис. 7. Структурная схема СФБ КД (а) и упрощенная электрическая схема смесительного ядра (б)

Fig. 7. Block diagram of the I/Q demodulator (a) and simplified schematic of the mixer core (b)



Рис. 8. Расчетная зависимость коэффициента преобразования по напряжению от мощности входного сигнала (а) и внешний вид топологии (б) СФБ КД Fig. 8. Simulated conversion gain versus input RF power (a) and layout photograph (b) of the proposed I/Q demodulator

4. Видеоусилитель со встроенным фильтром нижних частот

Структурная схема СФБ ФНЧ-ВУ показана на рис. 9. СФБ ФНЧ-ВУ включает в своем составе четыре видеоусилителя (ВУ), три из которых (ВУ1, ВУ2 и ВУ3) фиксированное значение имеют максимального коэффициента усиления Кумакс = 18 дБ, а значение Кумакс оконечного ВУ (ВУ4) регулируется в диапазоне от 3 дБ до 18 дБ с шагом 3 дБ в соответствии с таблицей 3 посредством управляющих сигналов (G2, G3 и G4, см. рис. 10). Интегральное значение Кумакс СФБ ФНЧ-ВУ регулируется в диапазоне от 3 дБ до 72 дБ с шагом 3 дБ за счет подключения или отключения отдельных ВУ с фиксированным значением Кумакс в соответствии с таблицей 4 посредством управляющих сигналов (G0, G1).

Таблица 3. Регулировка значения коэффициента *vсиления* BУ4

yetatettat 20 f								
Логич								
упр	Кумакс							
	ВУ4, дБ							
G2	G3	G4						
0	1	0	3					
0	0	1	6					
0	1	1	9					
1	1	0	12					
1	0	1	15					
1	1	1	18					



Рис. 9. Структурная схема СФБ ФНЧ-ВУ Fig. 9. Block diagram of the proposed baseband amplifier with integrated LPF

					140	лици	i 7 . I	егули	робл	и зпи	чепи	л коэ	$\varphi \varphi \mu$ u	циспп	iu yeus	пенил	$U\Psi D$	$\Psi \Pi I^{-}DS$
Лс упр	огичео авлян	ский у	урове Э сигі	ень нала		Логическое состояние ¹⁾ переключателя (рис. 9)					Состояние ²⁾ ВУ				К _{Умакс} ФНЧ-			
G0	G1	G2	G3	G4	S 0	S 1	S2	S 3	S4	S5	S6	S 7	S 8	ВУ1	ВУ2	ВУ3	ВУ4	ВУ, дБ
0	0		п		1	0	0	1	0	0	1	0	0	off	off	off	on	318
0	1		В		0	1	1	1	0	0	1	0	0	on	off	off	on	2136
1	0	C001	блин	гвии ой 3	0	1	1	0	1	1	1	0	0	on	on	off	on	3954
1	1	C Ta	олиц	си Э	0	1	1	0	1	1	0	1	1	on	on	on	on	5772

a chulu i i ceynapoona sha tentar nooppinna yeanenar e i b i i i b t
--

Примечания:

1 – состояние «1»: переключатель замкнут; состояние «0»: переключатель разомкнут;

2 - состояние «оп»: ВУ подключен; состояние «off»: ВУ отключен.

ВУ1 реализован с целью обеспечения малого значения спектральной плотности шума СФБ ФНЧ-ВУ [17] и выполнен на основе классической дифференциальной пары с резистивной нагрузкой. Входные транзисторы ВУ1 обладают значительными размерами (эффективная длина затвора 4 мкм; эффективная ширина затвора 3 мм), что позволяет снизить фликкер-шум [18]. Расчетное значение спектральной плотности приведенного ко входу теплового шумового напряжения ВУ1 составило 1,4 нВ/Лц, а частота излома характеристики 1/f – 50 кГц.

ВУ2, ВУ3 и ВУ4 выполнены на основе широко используемой схемы дифференциального усилителя С последовательной отрицательной обратной связью по току и повышенным значением эффективной крутизны входных транзисторов (рис. 10) [17, 18]. Отличительными особенностями ВУ4 являются:

 наличие переключаемых резисторов в цепи истока входных транзисторов (резисторы *R*3 и *R*4) и в выходной цепи (резисторы *R*6 – *R*9), обеспечивающих возможность регулировки значения Кумакс;

– повышенное значение тока в выходном каскаде ВУ и приведенный к значению половины напряжения питания уровень постоянного выходного напряжения, совокупности позволяющие В повысить верхней границы линейности уровень амплитудной характеристики ВУ4 и ФНЧ-ВУ в целом.



Puc. 10. Упрощенная электрическая схема видеоусилителя с регулируемым значением коэффициента усиления Fig. 10. Simplified schematic of the programmable gain baseband amplifier

Компенсация напряжения смещения ВУ в ФНЧ-ВУ не предусмотрена. Между тем, производится исключение постоянной составляющей на входах ВУ посредством применения *RC* фильтров верхних частот (ФВЧ) с режимом быстрой установки выходного напряжения [17]. Аналогичным образом исключается постоянная составляющая, формируемая на выходе КД.

Дифференциальный активный *RC*-ФНЧ Баттерворта 4-го порядка с регулируемой частотой среза (*F*_{CP3}) из состава ФНЧ-ВУ выполнен на основе биквадратных звеньев Тоу-Томаса (рис. 11) [19]. Расчетные значения коэффициента усиления и частоты единичного усиления применяемого двухкаскадного полностью дифференциального операционного усилителя с коррекцией Миллера [19] составляют 74 дБ и 100 МГц соответственно.



Puc. 11. Упрощенная электрическая схема ФНЧ с регулируемой частотой среза Fig. 11. Simplified schematic of the proposed reconfigurable LPF

Денис И. Сотсков, Алексей В. Зубаков, Николай А. Усачев, Александр В. Ермаков, Александр Ю. Никифоров ДОВЕРЕННЫЙ УВЧ ТРАКТ ПРИЕМНИКА СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ МАРКИРОВКИ И ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Регулировка F_{CP3} с номинальными значениями 0,1 / 0,2 / 0,4 / 0,8 / 1,6 МГц осуществляется посредством перестройки значений всех RC-элементов в соответствии с таблицей 5.

Таблица 5. Регулировка значения частоты среза ФНЧ									
F _{СР3} , МГц	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6				
R _X , Ом	$4 \times R_{X0}$	$2 \times R_{X0}$	$2 \times R_{X0}$	R _{X0}	R _{X0}				
C_Y, Φ	$4 \times C_{Y0}$	$4 \times C_{Y0}$	$2 \times C_{Y0}$	$2 \times C_{Y0}$	C _{Y0}				
Примечание: R _X , C _Y – переключаемые RC-элементы из состава									

ФНЧ, R_{X0} , C_{Y0} – минимальные значения переключаемых RCэлементов

Для формирования напряжения смещения ФНЧ-ВУ применяется температурностабильный источник опорного напряжения [18] с расчетным значением температурного коэффициента менее 10 ppm/°C. На рис. 12 показан фрагмент топологии СФБ ФНЧ-ВУ. Расчетные амплитудно-частотные характеристики СФБ ФНЧ-ВУ показаны на рис. 13. Расчетные значения основных параметров СФБ ФНЧ-ВУ приведены в табл. 2.



Рис. 12. Фрагмент топологии СФБ ФНЧ-ВУ Fig. 12. Layout fragment photograph of the proposed baseband amplifier with integrated LPF



Рис. 13. Расчетная амплитудно-частотная характеристика СФБ ФНЧ-ВУ при различных значениях коэффициента усиления ($F_{CP3} = 0,4 M \Gamma u$) (a) и частоты среза ($K_y = K_{y_{MARC}}$) (б) Fig. 13. Simulated amplitude-frequency response for the proposed baseband amplifier with integrated LPF at different gains (at cutoff frequency 0.4 MHz) (a) and cutoff frequencies (at max gain) (b)

Заключение

Представлены результаты разработки комплекта сложно-функциональных блоков из состава УВЧ тракта приемника систем цифровой маркировки и идентификации, в т.ч. объектов критической инфраструктуры. Разработанный комплект сложнофункциональных блоков выполнен в рамках отечественного КМОП технологического процесса с проектной нормой 180 нм и включает малошумящий усилитель, квадратурный демодулятор и видеоусилитель со встроенным фильтром нижних частот. C использованием представленных сложно-функциональных блоков выполнено проектирование УВЧ тракта приемника, структурная схема которого приведена на рис. 1. Основные параметры УВЧ тракта приемника обобщены в табл. 6. Показатели доверенности обеспечиваются за счет полного цикла проектирования и верификации разработанных сложно-функциональных блоков в ходе экспериментальных исследований и изготовления в рамках отечественной технологии.

,	1 1	1	1
Наименование параметра, единица измерения	Обозначение	Расчетное значение	Номер пункта примеч.
Диапазон рабочих частот, ГГц	ΔF	0,860,96	_
Верхняя граница линейности амплитудной характеристики по входу, дБм	Рвхідб	12 / минус 20	1 / 2, 3
Чувствительность, дБм	S	минус 79 / минус 95	1 / 2, 3, 4
Потребляемая мощность, мВт	Рпотр	104 / 126	1 / 2

Таблииа 6. Основные параметры УВЧ тракта приемника

Примечания:

- 2-значение приведено для режима «LBT»;
- 3 значение приведено с учетом вносимых потерь СТИ, составляющих 1,5 дБ;
- 4 значение приведено для полосы пропускания 400 кГц, SNR = 12,6 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Usachev N.A., Elesin V.V., Nikiforov A.Y. and Telets V.A. Behavioral approach to design universal UHF 1. RFID reader transceiver ICs. 29th International Conference on Microelectronics Proceedings - MIEL 2014, Belgrade, Serbia. 2014, p. 405–408. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/MIEL.2014.6842176.
- Сотсков, Денис И. и др. Специализированная СВЧ библиотека для разработки приемопередающей 2. информационных доверенной ЭКБ. Безопасность технологий, [S.1.], т. 30, № 3. c. 104-115, 2023. ISSN 2074-7136. DOI: http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.3.07. - EDN FFKHYD.
- 3. Сотсков Д.И., Зубаков А.В., Усачев Н.А., Жидков Н.М., Ермаков А.В. Библиотека базовых элементов и функциональных блоков отечественных приемо-передающих БИС УВЧ-диапазона. Российский форум «Микроэлектроника 2023». 9-я Научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули». Сборник тезисов. 2023, с. 293-294. УДК 621.3.01/.09.
- 4. Gramegna G., Magazzo A., Sclafani C., Paparo M. and Erratico P. A 9mW, 900-MHz CMOS LNA with 1.05dBnoise-figure. Proceedings of the 26th European Solid-State Circuits Conference. 2000, p. 73-76. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/ESSCIR.2000.186457.
- Jie Li, S. M. Rezaul Hasan. A 12dB 0.7V 850W CMOS LNA for 866MHz UHF RFID reader. Active and 5. Passive Electronic Components. 2010, v. 2010, 5 p. DOI: http://dx.doi.org/10.1155/2010/702759.
- Hung Y.-T., Tsai S.-H., Chen Y.-C. and Huang Z.-Y. A 0.18µm 3.25–5.6GHz and 6–10.4GHz band switchable 6. low noise amplifier. IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Nanjing, China. 2010, p. 1-4. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/ICUWB.2010.5615270.
- Cui Y. et al. Process Variation Compensation of a 2.4GHz LNA in 0.18um CMOS Using Digitally Switchable 7. Capacitance. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, New Orleans, USA. 2007, p. 2562–2565. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/ISCAS.2007.377838.

^{1 –} значение приведено для режима «Talk»;

- Новиков М.А., Жидков Н.М., Усачев Н.А. Программные средства синтеза пассивных элементов технологических библиотек. Российский форум «Микроэлектроника 2023». 9-я Научная конференция «ЭКБ и микроэлектронные модули». Сборник тезисов. 2023, с. 297–298. УДК 621.3.01/.09.
- 9. Mohan S.S., Hershenson M. del Mar, Boyd S.P. and Lee T.H. Simple accurate expressions for planar spiral inductances. IEEE Journal of Solid-State Circuits. Vol. 34, no. 10, p. 1419–1424, Oct. 1999. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/4.792620.
- Ji Chen and Juin Jei Liou. On-Chip Spiral Inductors for RF Applications: An Overview, Journal of Semiconductor Technology and Science. Vol. 4, no. 3, 2004, p. 149–167. ISSN: 1598-1657. URL: https://www.researchgate.net/publication/228865439_On-
 - Chip_Spiral_Inductors_for_RF_Applications_An_Overview (дата обращения: 25.10.2023).
- 11. Patent. US10320350B1. System and method for bypassing a low noise amplifier. T. Leitner, D. Schroegendorfer, H.D. Wohlmuth. Опубл. 11.06.2019.

 UBL: https://wrtatic.google.gom/patent/US10220250B1/ap. (должа болоника)
- URL: https://patents.google.com/patent/US10320350B1/en (дата обращения: 25.10.2023).
- 12. Елесин В.В., Назарова Г.Н., Усачев Н.А., Чуков Г.В. Методика оптимизации малосигнальных параметров монолитных СВЧ-переключателей сигналов на МОП-транзисторах. Микроэлектроника. 2017, т. 46, № 5, с. 393–400. DOI: http://dx.doi.org/10.7868/S0544126917050106.
- Poh A. and Zhang Y.P. Design and Analysis of Transmit/Receive Switch in Triple-Well CMOS for MIMO Wireless Systems. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. V. 55, no. 3, 2007, p. 458–466. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.2006.890510.
- Schrögendorfer D. and Leitner T. Analysis and Design of a Broadband Output Stage With Current-Reuse and a Low Insertion-Loss Bypass Mode for CMOS RF Front-End LNAs. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. V. 68, no. 5, p. 1800–1813, May 2021. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TCSI.2020.3018407.
- Bao Kuan, Fan Xiangning, Li Wei, Wang Zhigong. A wideband current-commutating passive mixer for multistandard receivers in a 0.18 μm CMOS. Journal of Semiconductors. V. 34, no. 1, 2013. DOI: http://dx.doi.org/10.1088/1674-4926/34/1/015003.
- Jusung Kim, José Silva-Martínez. Low-Power, Low-Cost CMOS Direct-Conversion Receiver Front-End for Multistandard Applications. IEEE Journal of Solid-State Circuits. V. 48, no. 9, p. 2090–2103, 2013. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/JSSC.2013.2265781.
- Sun X.G., Chi B.Y., Zhang C., Wang Z.Q. and Wang Z.H. Ultrahigh-frequency radio frequency identification reader receiver with 10 dBm input P1 dB and -74 dBm sensitivity in 0.18μm CMOS. Circuits, Devices Systems, IET. V. 5, no. 5, p. 392–402, 2011. DOI: http://dx.doi.org/10.1049/iet-cds.2010.0291.
- Zhang X., Mirabbasi S. and Lampe L. A Temperature-stable 60-dB programmable-gain amplifier in 0.13-μm CMOS. IEEE International Symposium of Circuits and Systems (ISCAS), Rio de Janeiro, Brazil. 2011, p. 1009–1012. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/ISCAS.2011.5937739.
- 19. Zhang C.; Shang L.; Wang Y.; Tang L. A CMOS Programmable Fourth-Order Butterworth Active-RC Low-Pass Filter. Electronics. V. 9, no. 2, p. 204, 2020. DOI: http://dx.doi.org/10.3390/electronics9020204.

REFERENCES:

- [1] Usachev N.A., Elesin V.V., Nikiforov A.Y. and Telets V.A. Behavioral approach to design universal UHF RFID reader transceiver ICs. 29th International Conference on Microelectronics Proceedings MIEL 2014, Belgrade, Serbia. 2014, p. 405–408. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/MIEL.2014.6842176.
- [2] Sotskov Denis I. et al. The Specialized RF Elements Library for Trusted Transceiver VLSI Design. IT Security (Russia), [S.1.], v. 30, no. 3, p. 104–115, 2023. ISSN 2074-7136. DOI: http://dx.doi.org/10.26583/bit.2023.3.07 (in Russian). – EDN FFKHYD.
- [3] Sotskov D.I., Zubakov A.V., Usachev N.A., Zhidkov N.M., Ermakov A.V. The RF Elements Library and IP-blocks for domestic UHF transceivers. Proceedings of 9 Scientific Conference "Electronic components and microelectronics modules". 2023, p. 293–294. ISSN 621.3.01/.09 (in Russian).
- [4] Gramegna G., Magazzo A., Sclafani C., Paparo M. and Erratico P. A 9mW, 900-MHz CMOS LNA with 1.05dBnoise-figure. Proceedings of the 26th European Solid-State Circuits Conference. 2000, p. 73–76. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/ESSCIR.2000.186457.
- [5] Jie Li, S. M. Rezaul Hasan. A 12dB 0.7V 850W CMOS LNA for 866MHz UHF RFID reader. Active and Passive Electronic Components. 2010, v. 2010, 5 p. DOI: http://dx.doi.org/10.1155/2010/702759.
- [6] Hung Y.-T., Tsai S.-H., Chen Y.-C. and Huang Z.-Y. A 0.18μm 3.25–5.6GHz and 6–10.4GHz band switchable low noise amplifier. IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Nanjing, China. 2010, p. 1–4. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/ICUWB.2010.5615270.
- [7] Cui Y. et al. Process Variation Compensation of a 2.4GHz LNA in 0.18um CMOS Using Digitally Switchable Capacitance. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, New Orleans, USA. 2007, p. 2562–2565. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/ISCAS.2007.377838.

- [8] Novikov M.A., Zhidkov N.M, Usachev N.A. Software tools for synthesis of passive elements of technology libraries. Proceedings of 9 Scientific Conference "Electronic components and microelectronics modules". 2023, p. 297–298. ISSN 621.3.01/.09 (in Russian).
- [9] Mohan S.S., Hershenson M. del Mar, Boyd S.P. and Lee T.H. Simple accurate expressions for planar spiral inductances. IEEE Journal of Solid-State Circuits. Vol. 34, no. 10, p. 1419–1424, Oct. 1999. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/4.792620.
- [10] Ji Chen and Juin Jei Liou. On-Chip Spiral Inductors for RF Applications: An Overview, Journal of Semiconductor Technology and Science. Vol. 4, no. 3, 2004, p. 149-167. ISSN: 1598-1657. URL: https://www.researchgate.net/publication/228865439_On-Chip_Spiral_Inductors_for_RF_Applications_An_Overview (accessed: 25.10.2023).
- [11] Patent. US10320350B1. System and method for bypassing a low noise amplifier. T. Leitner, D. Schroegendorfer, H.D. Wohlmuth. Publication at 11.06.2019. URL: https://patents.google.com/patent/US10320350B1/en (accessed: 25.10.2023).
- [12] Elesin V.V., Nazarova, G.N., Usachev N.A., Chukov G.V. A technique for optimizing the parameters of the small signal of monolithic UHF signal switches on MOSFETs. Russ Microelectronics. 2017, v. 46, no. 5, p. 393–400. DOI:10.7868/S0544126917050106 (in Russian).
- [13] Poh A. and Zhang Y.P. Design and Analysis of Transmit/Receive Switch in Triple-Well CMOS for MIMO Wireless Systems. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. V. 55, no. 3, 2007, p. 458–466. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.2006.890510.
- [14] Schrögendorfer D. and Leitner T. Analysis and Design of a Broadband Output Stage With Current-Reuse and a Low Insertion-Loss Bypass Mode for CMOS RF Front-End LNAs. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers. V. 68, no. 5, p. 1800–1813, May 2021. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/TCSI.2020.3018407.
- [15] Bao Kuan, Fan Xiangning, Li Wei, Wang Zhigong. A wideband current-commutating passive mixer for multistandard receivers in a 0.18 μm CMOS. Journal of Semiconductors. V. 34, no. 1, 2013. DOI: 10.1088/1674-4926/34/1/015003.
- [16] Jusung Kim, José Silva-Martínez. Low-Power, Low-Cost CMOS Direct-Conversion Receiver Front-End for Multistandard Applications. IEEE Journal of Solid-State Circuits. V. 48, no. 9, p. 2090–2103, 2013. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/JSSC.2013.2265781.
- [17] Sun X.G., Chi B.Y., Zhang C., Wang Z.Q. and Wang Z.H. Ultrahigh-frequency radio frequency identification reader receiver with 10 dBm input P1 dB and -74 dBm sensitivity in 0.18µm CMOS. Circuits, Devices Systems, IET. V. 5, no. 5, p. 392–402, 2011. DOI: http://dx.doi.org/10.1049/iet-cds.2010.0291.
- [18] Zhang X., Mirabbasi S. and Lampe L. A Temperature-stable 60-dB programmable-gain amplifier in 0.13-μm CMOS. IEEE International Symposium of Circuits and Systems (ISCAS), Rio de Janeiro, Brazil. 2011, p. 1009–1012. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/ISCAS.2011.5937739.
- [19] Zhang C.; Shang L.; Wang Y.; Tang L. A CMOS Programmable Fourth-Order Butterworth Active-RC Low-Pass Filter. Electronics. V. 9, no. 2, p. 204, 2020. DOI: http://dx.doi.org/10.3390/electronics9020204.

Поступила в редакцию – 01 октября 2023 г. Окончательный вариант – 01 ноября 2023 г. Received – 01 October, 2023. The final version – 01 November, 2023.