

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2021»

Обоснование характеристик радиопередающего и радиоприемного трактов малогабаритной РЛС

А.В. Леншин, В.В. Лебедев

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а
E-mail: andrey-lenshin@yandex.ru*

Рассмотрены особенности построения радиопередающего и радиоприемного трактов малогабаритной РЛС с непрерывным излучением. Проанализированы требования к параметрам зондирующих сигналов и к уровню фазовых шумов радиопередающего тракта, к динамическому диапазону радиоприемного тракта. Приведены возможности интерактивной программы ADIsimRF по проектированию трактов и анализу параметров интегральных микросхем радиоприемного и радиопередающего трактов малогабаритной РЛС L-диапазона.

Ключевые слова: малогабаритная РЛС, радиопередающий тракт, радиоприемный тракт, зондирующий сигнал.

Justification of the characteristics of the radio transmitting and receiving paths of a small-sized radar

A.V. Lenshin, V.V. Lebedev

Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin» (Voronezh)

The features of constructing the radio transmission and radio reception paths of a small-sized radar with continuous radiation are considered. The requirements to the parameters of probing signals and to the level of phase noise of the radio transmission path, to the dynamic range of the radio receiving path are analyzed. The possibilities of the ADIsimRF interactive program for designing paths and analyzing the parameters of integrated circuits of the radio receiving and radio transmitting paths of a small-sized L-band radar are presented.

Keywords: small-sized radar, radio transmitting path, radio receiving path, probing signal.

Введение

В вооруженном конфликте в Карабахе наблюдалось массовое целевое применение комплексов с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), которые продемонстрировали оперативное решение задачи формирования и выдачи данных для целеуказания и наведения, обеспечивающих эффективное нанесение ударов. В данном локальном конфликте подтверждается ожидаемая высокая боевая эффективность разведки, целеуказания и объективного контроля результатов ударов в реальном времени с использованием бортовых оптических и радиоэлектронных информационных систем. В ходе военного конфликта в Сирии ВС РФ применяли несколько моделей БПЛА российского и израильского производства для поиска объектов/отрядов боевиков и контроля результатов боевого применения средств поражения. Российская авиагруппа использовала БПЛА «Форпост» и «Застава», которые по лицензии и из комплектов израильской компании IAI собирает АО «Уральский завод гражданской авиации», «Орлан-10», «Гранат», «Элерон» и др. [1]. Оснащение БПЛА радиолокационными средствами высокого разрешения превращает их в системы, не утрачивающие свою функциональность в сложных условиях.

Особенности малогабаритных РЛС с непрерывным излучением

Малогабаритные РЛС, как правило, используют непрерывные линейно-частотно-модулированные (ЛЧМ) зондирующие сигналы [2, 3]. Синтезирование апертуры позволяет существенно повысить поперечную линейную разрешающую способность РЛС относительно направления диаграммы направленности антенны (ДНА) и улучшить детальность радиолокационного изображения (РЛИ) местности. В РЛС обзора земной поверхности (ОЗП) с синтезированием апертуры (РЛС СА) обеспечивается весьма малая величина линейной разрешающей способности δl как минимального значения вдоль путевого расстояния между наземными объектами А и В, при котором объекты А и В еще воспринимаются РЛС раздельно [4, 5].

По данным Министерства обороны США именно малые БПЛА, в силу их относительно невысокой стоимости, составят до 70 % численности всего парка БПЛА. Разработка малогабаритных РЛС и оснащение ими тактических БПЛА (массой 25...30 кг) обеспечит расширение круга решаемых задач для военно-воздушных сил и сухопутных войск, среди которых следует перечислить следующие:

1) ведение воздушной видовой радиолокационной разведки наземных и надводных целей, скоплений войск и техники, замаскированных командных пунктов, ракетных комплексов, селекция наземных (надводных) движущихся целей;

2) обеспечение действий бомбардировочной, штурмовой и армейской авиации, систем целеуказания;

3) контроль выполнения боевых задач, результатов нанесения ударов и оценка эффективности применения оружия;

4) оценка маскировки своих подразделений и командных пунктов, аэродромов, авиационной техники, позиции своих зенитных ракетных комплексов;

5) выявление демаскирующих в радиолокационном диапазоне признаков объектов;

6) определение направлений возможного продвижения подразделений противника, поиск экипажей, терпящих бедствие, оценка метеобстановки;

7) информационное обеспечение маловысотного полета;

8) картографирование местности в интересах составления базы данных цифровых карт в районе боевых действий [2, 6].

БПЛА тем самым могут оказывать существенную помощь пилотируемой авиации, в ряде случаев успешно заменять ее, а также решать задачи, которые не возлагались на пилотируемую авиацию, когда наращивание возможностей авиации принципиально невозможно, экономически нецелесообразно или из-за необеспечения условий безопасности экипажа пилотируемого летательного аппарата.

Малогабаритные РЛС с непрерывным излучением (НИ) обычно строятся по супергетеродинной схеме. На рисунке 1 представлена схема малогабаритной РЛС с непрерывным излучением.

На рисунке 1 обозначено: ИП – источники питания; ФС – формирователь зондирующего сигнала; НО – направленный ответвитель; УМ – усилитель мощности; РПрдУ, РПрмУ – радиопередающее и радиоприемное устройство; АС – антенная система; ФНЧ – фильтр нижних частот; ВУ – видеоусилитель с автоматической регулировкой усиления; СМ – смеситель; МШУ – маломощный усилитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦОС – система цифровой обработки сигналов; ЦВМ – цифровая вычислительная машина; НК – накопитель; ИНС – инерциальная навигационная система; СЧ – синтезатор частот; ОГ – опорный генератор; РМ – радиомодем [2].

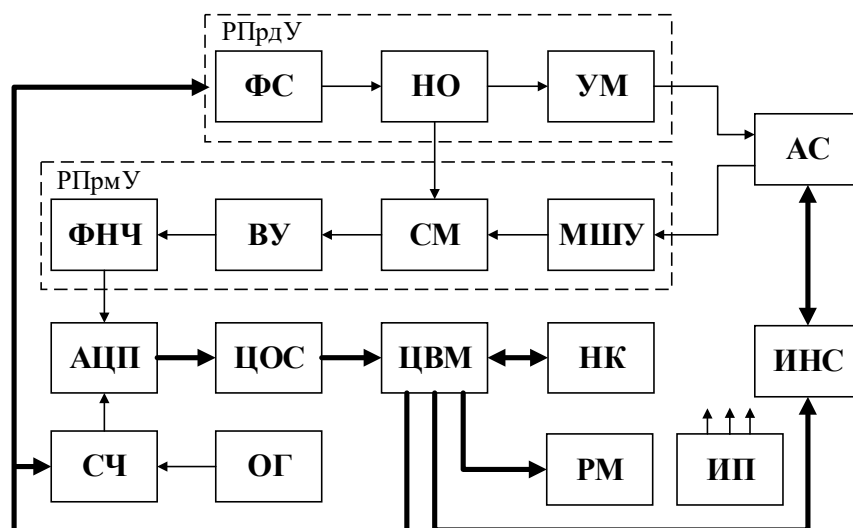


Рис. 1. Схема малогабаритной РЛС с НИ

Основным достоинством зондирующих сигналов с ЛЧМ-модуляцией является простота их формирования и демодуляции, при этом ширина спектра может достигать сотен мегагерц и даже единиц гигагерц, а после демодуляции – не превышает десятков мегагерц. На практике нашли применение сигналы с симметричной и несимметричной ЛЧМ-модуляцией, характеризующиеся периодом модуляции T_M , начальной частотой f_0 и шириной спектра (девиацией) Δf_c .

Обоснование параметров и формирование зондирующих сигналов РЛС

Несмотря на накопленный значительный опыт разработки и применения РЛС НИ, актуальной является обоснование параметров и формирование зондирующих сигналов при работе РЛС в различных режимах и соответствующих требований к характеристикам ее отдельных функциональных подсистем и устройств. При использовании сигналов с ЛЧМ-модуляцией дальность до цели связана с разностной частотой f_p ее эхосигнала соотношением

$$R_{ц} = \frac{c\tau_3}{2} = \frac{cf_p}{2\mu}, \quad (1)$$

где τ_3 – время задержки эхосигнала; $\mu = \Delta f_c / T_M$.

Максимальная разностная частота $f_{p \max}$, определяющая требования по частоте дискретизации к АЦП, пропорциональна максимальной дальности действия РЛС R_{\max}

$$f_{p \max} = 2\mu R_{\max} / c. \quad (2)$$

Разрешающая способность РЛС по наклонной дальности δR определяет ширину спектра зондирующего сигнала

$$\Delta f_c = c / 2\delta R. \quad (3)$$

Период повторения T_{Π} определяется из условия обеспечения однозначности измерения доплеровских частот в пределах зоны обзора

$$T_{\Pi} = T_M + T_{\text{III}} = \frac{1}{2f_{d \max}} = \frac{\lambda}{4V_{R \max}} = \frac{\lambda}{4V_H \sin(0,5 \cdot \Theta_{A3} + \varphi_{\text{ДН}})}, \quad (4)$$

где T_{III} – время переходных процессов; $f_{d \max}$ – максимальный доплеровский сдвиг эхосигнала отражателя с угловым смещением, равным половине ширины диаграммы направленности антенны (ДНА) по азимуту Θ_{A3} ; $V_{R \max}$ – максимальная радиальная скорость; V_H – скорость полета носителя; $\varphi_{\text{ДН}}$ – азимутальное смещение оси ДНА относительно перпендикуляра к вектору скорости носителя [2].

Учитывая, что путевая дальность R_H связана с наклонной дальностью по траверзе R_T соотношением $R_H = R_T \cdot \operatorname{tg} \varphi$, время синтезирования апертуры T_C зависит от условий применения РЛС (V_H и $R_{Ц}$) и требуемого разрешения по путевой дальности δL как

$$T_C = \frac{\lambda R_{Ц}}{2V_H \delta L \cos \varphi}. \quad (5)$$

При расчете мощности излучаемого сигнала следует учитывать требуемое отношение сигнал/шум $q_{ТР}$ на выходе системы обработки

$$q_{ТР} = \frac{2E_C}{N_0}, \quad (6)$$

где $E_C = T_M N_{П} P_C / 2$ – энергия принятого сигнала; $N_{П} = T_C / T_M$ – число периодов зондирования; $P_C = \frac{P_{ПРД} G_{ПРД} G_{ПРМ} \lambda^2 \sigma_{Ц}}{(4\pi)^3 R_{\max}^4 L}$ – мощность принятого сигнала; $P_{ПРД}$ – средняя мощность зондирующего сигнала; $G_{ПРД}$, $G_{ПРМ}$ – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн; $\sigma_{Ц}$ – эффективная площадь рассеяния цели; L – суммарные потери в антенно-фидерном тракте и на трассе распространения радиоволн; N_0 – спектральная плотность шума [2].

Обоснование параметров радиоприемного тракта РЛС

Спектральная плотность шума в приемном канале определяется суммарной спектральной плотностью внутренних (теплового N_T , дробового $N_{ДР}$, фазового N_{Φ} , дискретизации $N_{Д}$) и внешних $N_{\text{внеш}}$ шумов

$$N_0 = N_T + N_{ДР} + N_{\Phi} + N_{Д} + N_{\text{внеш}}. \quad (7)$$

Коэффициент шума последовательно соединенных каскадов определяется выражением

$$F_{Ш} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots + \frac{F_N - 1}{\prod_{i=1}^{N-1} G_i}, \quad (8)$$

где F_i – коэффициент шума i -го каскада; G_i – коэффициент передачи i -го каскада [7].

Формирователи зондирующих сигналов характеризуются нестабильностью частоты, обусловленной как медленными изменениями температурного режима работы радиоэлементов и питающих напряжений, так и быстрыми случайными флуктуациями теплового шума. «Медленная» нестабильность выражается, в основном, в расфокусировке радиолокационных изображений (РЛИ) (снижение амплитуды отметок и разрешающей способности), «быстрая» – в ухудшении отношения сигнал/шум на РЛИ (снижение вероятности обнаружения объекта с малой ЭПР). Зависимость уровня фазового шума $N_{\PhiШ}$, как правило, указывается изготовителем генераторов и формирователей, а также может быть измерена с помощью анализатора спектра. При значительном уровне его спектральной плотности он может проявляться на РЛИ в виде протяженных по путевой дальности шумовых полос в местах нахождения ярких точечных отражателей и протяженных объектов. Методика обоснования требований к передающему устройству РЛС НИ по уровню фазового шума приведена в работе [2].

Разработка и проектирование радиопередающих и радиоприемных трактов

При разработке и проектировании радиопередающих (РПРД) и радиоприемных (РПРМ) трактов применяют различные средства моделирования и отладки: компьютерное имитационное моделирование на языке VHDL, макетные платы и отладочные наборы,

прикладное программное обеспечение производителей по моделированию высокочастотных (ВЧ)РПрд и РПрм трактов. Одновременно с этим существует необходимость, еще на этапе проектирования, оценить влияние различных узлов на качество работы РПрм и РПрд трактов.

РПрм тракт предназначен для усиления принятых сигналов, их демодуляции, поддержания заданного уровня демодулированного сигнала и его частотной фильтрации для последующей оцифровки. Основными требованиями к РПрм тракту РЛС являются:

- 1) широкий динамический диапазон;
- 2) линейность;
- 3) низкий коэффициент шума.

Требования, предъявляемые к динамическому диапазону РПрм тракта РЛС НИ, являются более жесткими по сравнению с требованиями, предъявляемыми к РПрм тракту импульсных РЛС, что обусловлено, прежде всего, низкой развязкой между передающей и приемными антеннами. Недостаточная ширина динамического диапазона приводит к перегрузке входных малошумящих усилителей (МШУ) и преобразователей частот, что приводит к появлению паразитных частотных составляющих в спектре выходного сигнала, а также снижению чувствительности и дальности действия РЛС.

Назначение РПрд тракта – формирование зондирующего и опорного сигналов с требуемым периодом модуляции и выходной мощностью в заданной полосе частот. Основными требованиями при этом являются:

- 1) равномерность амплитудно-частотного спектра формируемого сигнала в широкой полосе частот;
- 2) малая длительность переходных процессов в момент начала каждого нового периода зондирования при достаточно малых массогабаритных показателях;
- 3) высокая линейность закона модуляции сигнала [2].

Интерактивная программа ADIsimRF компании «AnalogDevices» [8] существенно ускоряет проектирование и анализ параметров элементов РПрм и РПрд трактов. Проектирование РПрм и РПрд трактов заключается в выборе и наполнении звеньев конкретными элементами – интегральными микросхемами (ИМС). При выборе элементов (ИМС) схемы ключевыми становятся такие характеристики, как коэффициент усиления элемента (Power Gain), точки однодецибелной компрессии по входу элемента (IP1) и выходу (OP1), точки пересечения интермодуляционных искажений 3-го порядка по входу (IP3) и выходу (OP3) элемента, коэффициента шума (Noise Figure), напряжение питания (Voltage) и ток потребления (Current) [9].

После наполнения конкретными элементами проектируемого РПрм тракта пользователю становится доступным итоговый результат расчета основных характеристик:

- 1) отношение «сигнал/шум» (SNR);
- 2) чувствительность приемника (Input Rx Sensitivity);
- 3) точка пересечения интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу (OP3) и входу элемента (IP3);
- 4) уровень интермодуляционных искажений 3-го порядка (IMD);
- 5) отношение мощности интермодуляционных искажений в полосе сигнала к мощности сигнала (SFDR);
- 6) коэффициент шума (Noise Figure);
- 7) значение спектральной плотности мощности шума (Output NSD).

Программа ADIsimRF удобна в использовании и наглядно демонстрирует прохождение сигнала по цепи. Программа вначале предлагает выбрать количество элементов в тракте, а также какой тракт мы будем моделировать – передающий (Receive) или приемный (Transmit) (рисунок 2).

Для моделирования РПрм тракта РЛС НИ L-диапазона выберем следующие исходные данные:

1. Несущая частота – 1280 МГц [10].
2. Полоса частот радиосигнала (ширина спектра) – 160 МГц.
3. Мощность передатчика – 200 мВт.
4. Коэффициент усиления приемной и передающей антенн 10 дБ. Основными типами антенн, применяемыми на БПЛА, являются зеркальные и микрополосковые антенны. В последнее время более часто используются малогабаритные низкопрофильные (в том числе конформные) антенны, создаваемые на основе микрополосковой технологии [11].

Для оценки линейности тракта используется параметр «однодецибелная точка компрессии» P1dB (One-decibel Compression Point), определяемая как точка на амплитудной характеристике, в которой коэффициент усиления по мощности уменьшается на 1 дБ по сравнению с идеальным. Однодецибелная точка компрессии соответствует такой мощности сигнала на выходе, при котором отличие от асимптотической линейной характеристики составляет 1 дБ.

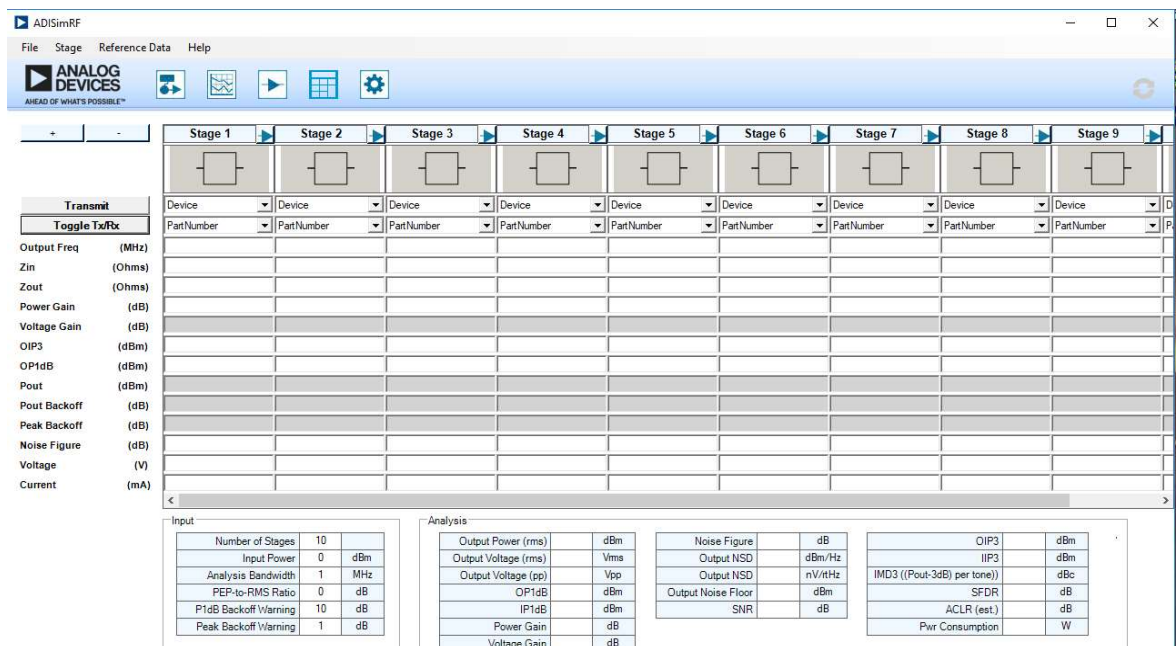


Рис. 2. Окно выбора моделируемого устройства ADIsimRF

Выделяют точки однодецибелной компрессии по входу элемента (IP1dB) и выходу элемента (OP1dB или P1dB). На практике принято считать, что область несущественной нелинейности лежит ниже точки P1dB на 6...10 дБ, т.е. оценка интермодуляционных искажений, изначально основанная на степенной аппроксимации передаточной функции, применима только в том случае, если уровень выходного сигнала лежит в этом диапазоне. В документации на ИМС часто приводят графики зависимости P1dB от частоты. Точку пересечения интермодуляционных искажений 3-го порядка по выходу элемента OIP3 (Output IP3) для двухтонального сигнала с частотами f_1 , f_2 и одинаковыми уровнями тонов называется такая аппроксимированная мощность тона выходного сигнала, при которой она равна мощности продукта нелинейности третьего порядка на частоте $(2f_2 - f_1)$ или $(2f_1 - f_2)$ [12].

После ввода исходных данных в программу ADIsimRF и выбора первого элемента РПрм тракта (полосового фильтра (BPF)), ввода рабочей частоты (InputFreq) и значения согласующего сопротивления (Z_{in}), программа ADIsimRF сама рассчитывает необходимые параметры и подбирает необходимый элемент (ИМС). Аналогичным образом выбираются последующие элементы РПрм тракта. В конечном итоге получаем схему, состоящую из 9 последовательно соединенных элементов с параметрами,

соответствующими заданным. На рисунке 3 представлены результаты моделирования РПрм тракта (без приемной антенны) малогабаритной РЛС НИ.

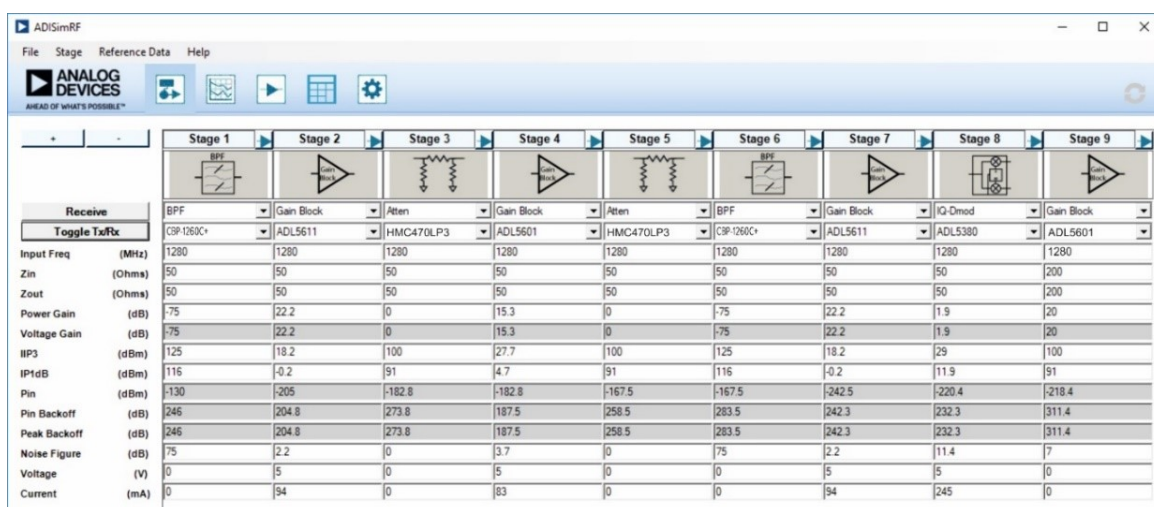


Рис. 3. Результаты моделирования РПрм тракта РЛС НИ

Итоговый результат расчета основных характеристик РПрд тракта:

- 1) выходная мощность (OutputPower (dBm));
- 2) среднеквадратическое значение выходного напряжения (OutputVoltage (rms));
- 3) пиковое значение выходного напряжения (OutputVoltage (pp));
- 4) точка однодецибельной компрессии по выходу тракта (OP1dB);
- 5) точка однодецибельной компрессии по входу тракта (IP1dB);
- 6) коэффициент усиления по мощности (PowerGain);
- 7) коэффициент усиления по напряжению (VoltageGain);
- 8) мощность шума на выходе тракта в полосе сигнала (OutputNoiseFloor);
- 9) мощность потребления (PwrConsumption).

На рисунке 4 представлены результаты моделирования РПрд тракта РПрдУ (без передающей антенны) малогабаритной РЛС НИ.

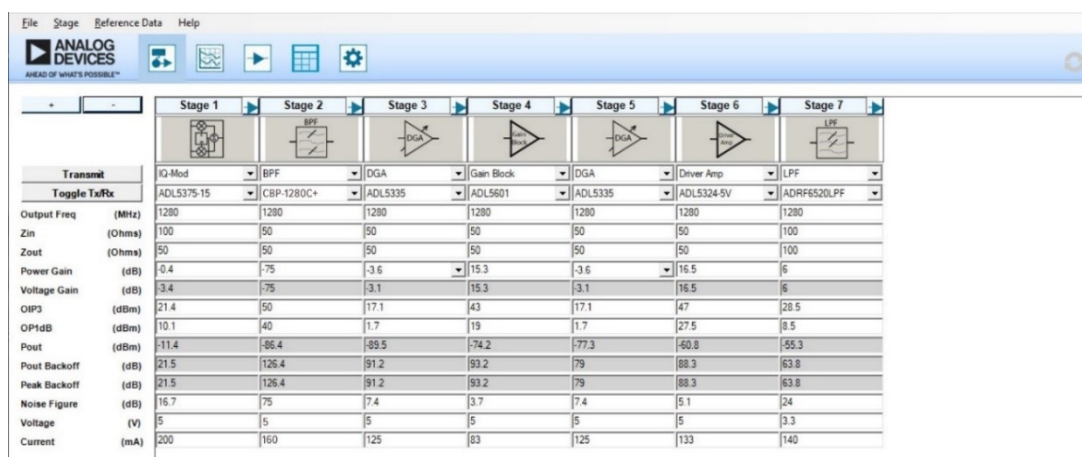


Рис. 4. Результаты моделирования РПрд тракта РЛС НИ

На рисунке 5 представлена структурная схема РПрд тракта РЛС НИ, соответствующая заданным параметрам.



Рис. 5. Структурная схема РПрд тракта РЛС НИ

На рис. 5 обозначено: ШКМ – широкополосный квадратурный модулятор (ADL5375-15), в качестве альтернативы можно использовать синтезаторы частот на основе систем ФАПЧ с дробным коэффициентом деления и функциями модуляции/формирования сигналов ADF4158[13] и ADF4159; ПФ – полосовой фильтр (CBP-1280C+); УЦУ – усилитель с цифровым усилением (ADL5335); ШЛУ – широкополосный линейный усилитель (ADL5601); УД – усилитель-драйвер (ADL5324-5V); ФНЧ – фильтр нижних частот (ADRF6520LPF)[14].

Выводы

В данном докладе были рассмотрены особенности построения радиопередающего и радиоприемного трактов малогабаритной РЛС с непрерывным излучением. Проанализированы требования к параметрам зондирующих сигналов и к уровню фазовых шумов радиопередающего тракта, к динамическому диапазону радиоприемного тракта. Приведены возможности интерактивной программы ADIsimRF по проектированию трактов и анализу параметров интегральных микросхем радиоприемного и радиопередающего трактов малогабаритной РЛС НИ L-диапазона. Интерактивная специализированная программа ADIsimRF постоянно обновляется, что позволяет рассчитать радиопередающие и радиоприемные тракты различных устройств в различных частотных диапазонах и при различных отношениях сигнал/шум, а также подобрать соответствующие микросхемы.

Литература

1. Новичков Н.Н., Федюшко Д.И., Костин В.В., Милованова Л.Р. Российское оружие в Сирии: анализ, итоги, выводы / Под общ. ред. и с предисловием В.Н. Половинкина. М.: ООО «Статус», 2018. 336 с.
2. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Малогабаритные РЛС с непрерывным частотно-модулированным излучением. Монография. М.: Радиотехника, 2020. 280 с.
3. Груздов В.В., Колковский Ю.В., Криштопов А.В., Кудря А.И. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса. М.: Техносфера, 2018. 482 с.
4. Купряшкин И.Ф., Лихачев В.П. Космическая радиолокационная съемка земной поверхности в условиях помех: монография. Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2014. 460 с.
5. Бортовые радиоэлектронные системы. Основы построения: учебное пособие / А.В. Леньшин, Н.М. Тихомиров, С.А. Попов; под ред. А.В. Леньшина. – 2-е изд., перераб. и доп. Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2021. 486 с.
6. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. В 2-х кн.: Кн. 1. Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА. Монография / Под ред. В.С. Вербы, Б.Г. Татарского. М.: Радиотехника, 2017. 512 с.
7. Раушер К., Йанссен Ф., Минихольд Р. Основы спектрального анализа: Пер. с англ. С.М. Смольского / Под ред. Ю.А. Гребенко. М.: Горячая линия–Телеком, 2006. 224 с.
8. ADIsimRF. – URL: https://form.analog.com/form_pages/rfcomms/adisimrf.aspx.
9. Леньшин А.В., Албу С.И. Особенности расчета радиопередающего устройства РЛС L-диапазона с использованием программы ADIsimRF // Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки: сб. науч. статей VII Международной научно-практической конференции «АВИАТОР». Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2020. С. 283–287.
10. Постановление Правительства РФ от 21.12.2011 N 1049-34. URL: <https://ppt.ru/docs/postanovlenie/pravitelstvo/n-1049-34-21041>.
11. Подстригаев А.С., Лихачев В.П., Рязанцев Л.Б. Технология настройки полосковых СВЧ-устройств // Измерительная техника. 2016. № 5. С. 66–68.
12. Белов Л.А., Кондрашов А.С., Петушков С.В. Корреляционная оценка уровня интермодуляционных искажений СВЧ-сигналов в усилителях мощности // Электросвязь.

2015.№ 5.C. 28–30.

13. ADF4158. URL: <https://www.analog.com/ru/products/adf4158.html#product-overview>.

14. Analog Devices. URL: <https://www.analog.com/ru/products.html>.