

УДК 621.396.96

БИСТАТИЧЕСКИЙ РАДИОЛОКАТОР С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ Р-ДИАПАЗОНА ДЛЯ МКА «АИСТ-2»

О.В. Горячкин, заведующий кафедрой ПГУТИ, д.т.н.; gor@psati.ru

Б.Г. Женгуров, аспирант ПГУТИ; loir47@rambler.ru

В.Б. Бакеев, заместитель директора НТЦ № 26 РСЧН филиала ФГУП НИИР – СониИР, к.т.н.; bwb@soniir.ru

А.Ю. Барабошин начальник лаборатории филиала ФГУП НИИР – СониИР; bay@soniir.ru

А.В. Невский, начальник НО-6 филиала ФГУП НИИР – СониИР, к.т.н.; nav@soniir.ru

Е.Г. Скоробогатов, начальник лаборатории филиала ФГУП НИИР – СониИР; eug@soniir.ru

Описан бистатический радиолокатор с синтезированной апертурой, работающий в Р-диапазоне частот и предназначенный для проведения экспериментов на малом космическом аппарате «АИСТ-2Д», запуск которого планируется в декабре 2015 г. с космодрома «Восточный». Рассмотрены принципы построения радиолокационной системы, подробно описаны технические решения, использованные при проектировании бортового радиопередающего устройства.

***Ключевые слова:** космические системы дистанционного зондирования Земли, радиолокатор с синтезированной апертурой, бортовое радиопередающее устройство.*

Введение. В настоящее время информация с космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) широко используется в различных отраслях деятельности человека — картографии, разнообразных геоинформационных системах, геодезии, мониторинга последствий стихийных бедствий и катастроф, экологического мониторинга, контроля и картографирования загрязнений водной поверхности, сельского хозяйства, археологии, военных приложений и пр. КА ДЗЗ позволяют вести наблюдение за поверхностью Земли в различных диапазонах электромагнитного спектра: видимом, инфракрасном, радио. Радиолокационные комплексы обеспечивают круглосуточность и всепогодность наблюдения при высоком пространственном разрешении и широкой полосе обзора.

В наши дни на орбите Земли находятся радиолокационные КА ERS, ENVISAT, SENTINEL (Европа), RADARSAT (Канада), ALOS (Япония), TERRASAR-X TANDEM-X, SAR-Lupe (Германия), COSMO Skymed (Италия), RISAT (Индия), Метеор-М, Кондор (Россия). В ближайшем будущем планируются запуски радиолокационных КА в России, Украине, Казахстане, Испании, Малайзии и Китае.

Сегодня радиолокационные КА используют X, C, S и L-диапазоны частот. Повышается интерес к применению космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) VHF или Р-диапазона для наблюдения подповерхностных, укрытых или замаскированных растительностью объектов, геологического картографирования, измерения биомассы растительности и других приложений.

Известно, что при реализации этих систем разработчики сталкиваются с проблемой разрушающего влияния ионосферы [1, 2], ограничениями регламента радиосвязи, развертыванием в космосе крупногабаритной антенной системы [3, 4], применением высокоскоростной радиолонии и запоминающего устройства большой емкости, мощ-

ного сосредоточенного передатчика, использования в РСА полного поляриметрического базиса и, в конечном итоге, весьма дорогостоящего КА и/или системы КА.

В [5, 6] было показано, что развитие технологий многопозиционного радиолокационного зондирования открывает возможности по созданию аппаратуры радиолокационного зондирования в VHF или Р-диапазонах частот, не сопряженной с вышеперечисленными затратами. Кроме того, особенность данного подхода к построению системы ДЗЗ позволяет организовывать непрерывное наблюдение объекта за наземными средствами приема и обработки радиолокационных сигналов. С другой стороны, необходимость наземной стационарной или мобильной станции на относительно небольшом расстоянии (до 20 км) от наблюдаемого объекта ограничивает области применения системы ДЗЗ.

Цель проводимых экспериментов — отработка технологии многопозиционного радиолокационного наблюдения поверхности Земли в радиодиапазоне, апробация технологии детального томографирования ионосферы Земли, создание технологического и конструктивного задела по созданию моностатического радиолокатора дистанционного зондирования в Р-диапазоне на базе малого КА.

Принципы построения многопозиционной РСА. Рассмотрим возможность реализации системы многопозиционного радиолокационного дистанционного зондирования Земли и околоземного пространства в VHF или Р-диапазонах частот на базе микро и малых КА.

По предварительным оценкам многопозиционный радиолокационный комплекс (МПРЛК) может включать несколько МКА, обеспечивающих радиолокационное наблюдение поверхности Земли в «телевизионном» режиме (квазинепрерывное наблюдение с периодичностью до нескольких минут) с пространственным разрешением 5–30 м в полосе до 6–10 км, протяженностью до 10 км (при использовании 1-го КА), точностью определения высоты до 5 м. При приеме на систему приемных пунктов МПРЛК позволяет реализовать томографирование ионосферы над контролируемым районом. Примерная схема работы системы одного МКА (бистатическая РСА) показана на рис. 1.

Импульсные сигналы бортового передатчика принимаются наземной аппаратурой (стационарного или мобильного исполнения) по двум каналам: «прямому» и «отраженному». Такая схема приема позволяет компенсировать искажения сигнала в ионосфере и обеспечивать когерентную обработку сигнала в РСА и получение пространственного разрешения до 5 м.

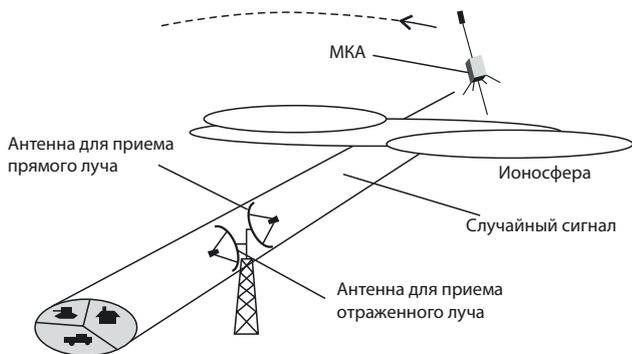


Рис. 1. Схема работы бистатической РСА для дистанционного зондирования Земли

В рамках программы создания МКА «АИСТ-2Д» предполагается отработка ключевой технологии МПРЛК в виде развертывания бистатического радиолокационного комплекса с синтезированной апертурой Р-диапазона (БиРЛК). Выбор Р-диапазона связан с необходимостью соответствия текущему регламенту радиосвязи.

Внешний вид МКА Аист-2Д приведен на рис. 2. Бортовая аппаратура БиРЛК представляет собой многорежимный импульсный передатчик, обеспечивающий широкую гамму стабильных сигналов на несущей частоте 435 МГц, в полосе до 6 (30) МГц с возможностью перестройки от 1 до 30 МГц. Типы используемых зондирующих сигналов: последовательность прямоугольных импульсов, последовательность ЛЧМ-импульсов, последовательность фазоманипулированных сигналов, кодируемых *M*-последовательностью.

Бортовая передающая антенна представляет собой антенну Уда-Яги, поляризация — линейная, коэффициент усиления 5 дБ. Наземная стационарная аппаратура представляет собой двухканальный приемник прямого усиления (до 110 дБ) с цифровой регистрацией и последующей обработкой сигналов в полосе до 400 МГц. Наземная приемная антенна «отраженного» канала представляет собой

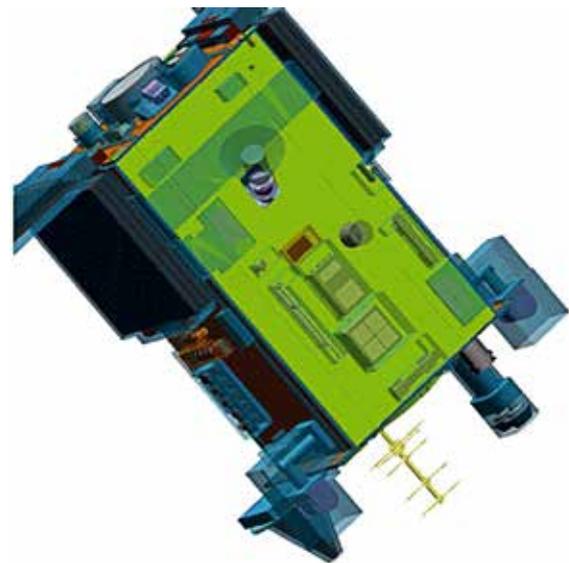


Рис. 2. Внешний вид МКА АИСТ-2Д с антенной БиРЛК

антенную решетку из двух антенн Уда-Яги, поляризация антенны — круговая, коэффициент усиления 18–20 дБ. При данных параметрах системы на расстоянии до 15 км от приемной позиции обеспечивается чувствительность БиРСА (σ_0) не хуже минус 20 дБ.

Особенности построения бортового радиопередающего устройства БиРЛК. Функциональная схема бортового радиопередающего устройства (БРПУ) представлена на рис. 3. В состав БРПУ входят модули коммутатора питания, источника питания, синтезатора/возбудителя, усилителя мощности (УМ), фильтрации, ВЧ-коммутации, компоненты мониторинга состояния модулей.

Одна из важных особенностей построения БРПУ — высокие требования к надежности его функционирования в условиях космического пространства на орбитах высотой порядка 500 км.

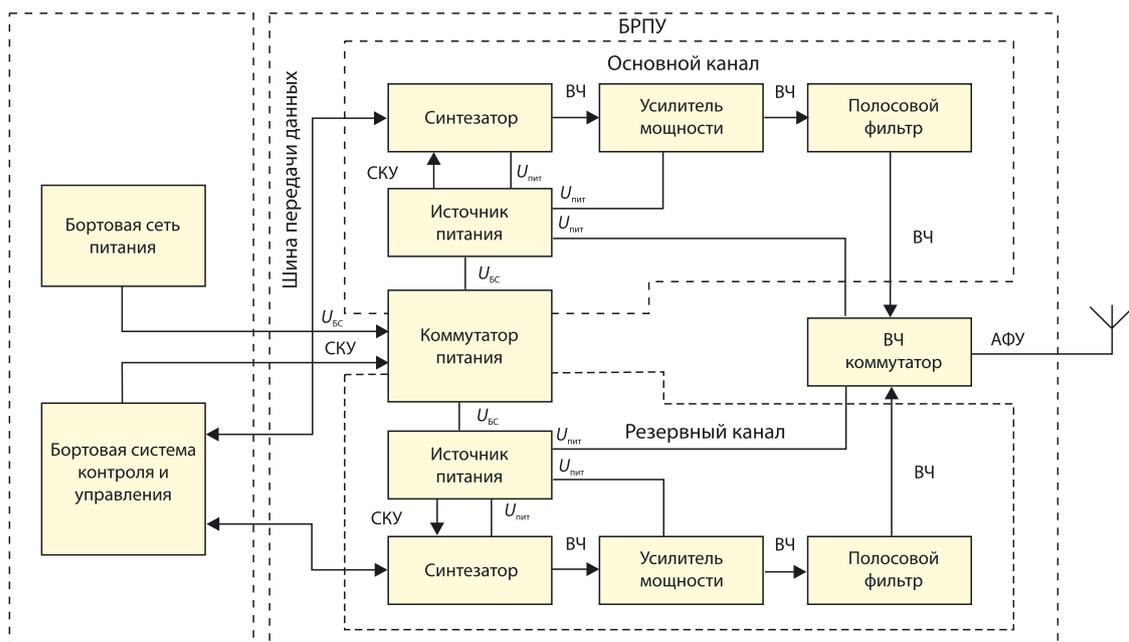


Рис. 3. Структурная схема БРПУ

Наличие достаточного рабочего объема, выделенного для БРПУ в общем объеме аппаратуры КА, позволило создать передатчик с двумя независимыми каналами, обеспечив тем самым практически стопроцентное резервирование всех узлов. Как видно из рис. 3, оба канала БРПУ полностью изолированы друг от друга и управляются бортовой системой КА по индивидуальным шинам последовательной передачи данных. Единственными не резервируемыми устройствами БРПУ являются ВЧ-коммутатор и антенно-фидерное устройство (АФУ).

Наиболее сложными в части схемотехнического и конструктивного проектирования оказались модули полосового фильтра, УМ и отчасти ВЧ-коммутатора. Эти же узлы определяют эффективность БРПУ в условиях имеющихся ограничений по энергопотреблению и выполнению требований по ЭМС в части внеполосных и побочных излучений. Технические характеристики передатчика представлены в таблице. На рис. 4 показана фотография БРПУ на этапе сборки.

Техническая характеристика	Значение
Импульсная выходная мощность, не менее, Вт	200
Средняя выходная мощность, не менее, Вт	20
Центральная частота рабочей полосы, МГц	435
Ширина рабочей полосы частот, МГц	30
Неравномерность АЧХ в рабочей полосе частот, не более, дБ	± 1
Виды излучения	ЛЧМ, фазовая манипуляция, кодируемая M -последовательностью, последовательность монохроматических импульсов
Коэффициент полезного действия, не менее, %	50
Волновое сопротивление ВЧ-тракта, Ом	50
КСВН на входе в рабочей полосе частот, не более	1,1
Максимально допустимый КСВН нагрузки выходного УМ, не более	10



Рис. 4. Внешний вид БРПУ на сборочном участке

Каждый из модулей БРПУ кроме массогабаритных ограничений должен удовлетворять ряду специфических технических требований. Например, модуль источника питания должен соответствовать примерно 20 требованиям, модуль усилителя мощности — 25. Столько же требований предъявляется и к другим модулям БРПУ. Высокие требования надежности накладывают дополнительные ограничения как на схемотехнические решения построения модулей БРПУ, так и на применяемую элементную базу.

Рассмотрим более подробно построение составных частей БРПУ. Оба канала БРПУ управляются бортовой системой контроля и управления (БСКУ) по индивидуальным шинам последовательной передачи данных. Коммутатор питания, обеспечивающий плавный старт, защиту источника питания от перенапряжений в бортовой сети и защиту последней от короткого замыкания в цепях передатчика, также выполнен двухканальным, хотя конструктивно и на одной печатной плате. Работа основного и резервного каналов БРПУ на общую нагрузку АФУ обеспечивается ВЧ-коммутатором, где в качестве ключей использованы переключаемые диоды с $p-i-n$ структурой.

Функциональная схема коммутатора представлена на рис. 5. Диод активного канала находится в прямосмещенном проводящем состоянии, диод другого канала запирается напряжением питания УМ. Диоды объединены одной контактной площадкой, с которой соединен выходной фидер АФУ. Очевидно надежность диодов и блокировочных конденсаторов, обеспечивающих развязку цепей смещения, должна быть максимально высокой.

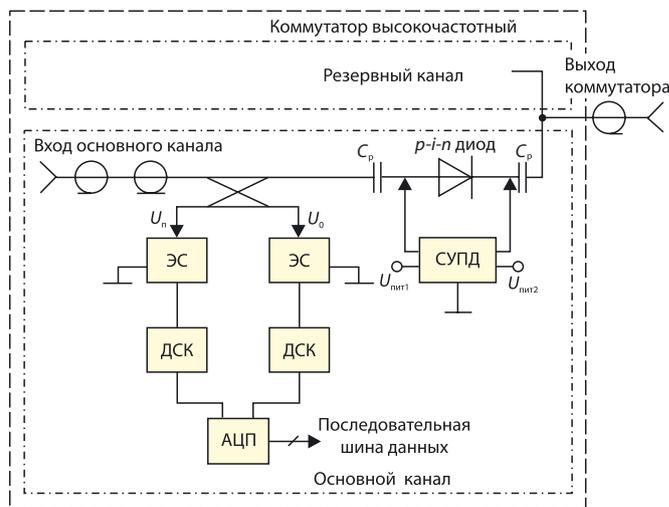


Рис. 5. Функциональная схема коммутатора

После подачи напряжения питания на основной или резервный канал БРПУ источник питания активируемого канала формирует, в числе прочих, два напряжения питания $U_{пит1}$ и $U_{пит2}$. Эти напряжения переводят схему управления переключаемым диодом (СУПД) соответствующего тракта коммутатора в активное состояние, характеризующееся подачей тока прямого смещения через $p-i-n$ переключаемый диод и запирающего напряжения на $p-i-n$ переключаемый диод, соответствующий не активному каналу передатчика. Для предотвращения попадания постоянного тока в ВЧ-тракт используются две разделительные емкости C_p .

В блоке ВЧ-коммутатора дополнительно измеряется падающая и отраженная мощность. Этой цели служит 40 дБ

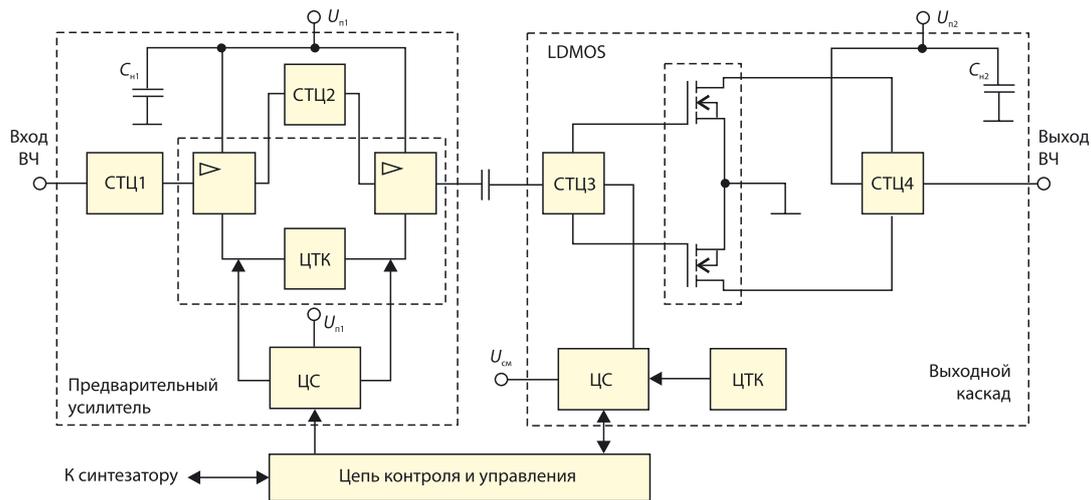


Рис. 6. Функциональная схема УМ

направленный ответвитель (НО), выполненный печатным монтажом. С выходов НО сигналы падающей и отраженной волн поступают на входы детекторов среднеквадратичного значения (ДСКЗ), где преобразуются в постоянное напряжение. Элементы согласования (ЭС) обеспечивают согласование входа ДСКЗ с импедансом связанной линии и тем самым минимизируют величину мощности, отраженную от входа ДСКЗ и попадающую в изолированное плечо НО. Сигналы с выходов ДСКЗ поступают на АЦП, который шиной последовательной передачи данных подключен к процессору синтезатора для вычисления выходной мощности и КСВН.

Экспериментально были измерены *S*-параметры коммутатора. Вносимые коммутатором потери не превышают 0,63 дБ, КСВН — не более 1,35 во всем диапазоне рабочих частот. Функциональная схема УМ представлена на рис. 6. В УМ используется режим АВ, поскольку именно такой режим возбуждения дал наиболее компактное решение.

Хотя эффективность работы УМ в режиме АВ ниже эффективности ключевого режима (теоретически для режима 1 дБ компрессии порядка 65%), особенности использованных транзисторов LDMOS структуры делают режим АВ более предпочтительным для заданного уровня мощности и частотного диапазона. Данное обстоятельство обусловлено необходимостью (при реализации ключевых режимов) дополнительных каскадов усиления, кроме этого ключевые схемы более узкополосны, имеют более сложную архитектуру и труднее согласуются с системным импедансом, 50 Ом.

Усилитель мощности выполнен по двухтактной схеме. Причина — более мягкие требования к цепям согласования и трансформации (СТЦ) в сравнении с несимметричной схемой той же мощности. Четырехкратный выигрыш в добротности для двухтактной схемы позволяет использовать более широкополосную структуру СТЦ.

Разработанный УМ имеет две особенности. Первая — усилитель состоит из двух каскадов с общим коэффициентом усиления 43 дБ: предварительного усилителя и выходного. Каждый каскад включает конденсаторы емкостного накопителя энергии, позволяющего снизить общую мощность источника питания благодаря импульсному характеру излучения с большой скважностью. Вторая особенность — реализация цепей СТЦ3 и СТЦ4, выполняю-

щих задачи симметрирования, трансформации импеданса и фильтрации.

Обычно подобные СТЦ делают на коаксиальной линии передачи, обеспечивающей симметрирование, и комбинации микрополосковой структуры, *LC*-секций и дополнительного трансформатора на связанных коаксиальных линиях. Однако такая конструкция СТЦ для используемого диапазона частот занимает много места и требует индивидуальной настройки. Поэтому была выбрана и спроектирована СТЦ в виде планарных компонентов — части конструкции печатной платы [7], представляющих пару связанных *LC*-резонаторов, расположенных по разные ее стороны. Такие резонаторы дают преимущество в ослаблении четных гармонических составляющих тока выходного каскада, связанного с достаточно низким импедансом выходного каскада для этих компонент, в сравнении с конструкцией на коаксиальных линиях, где импеданс для четных гармоник тока представляется ненагруженной линией.

На рис. 7 приведена измеренная нагрузочная характеристика LDMOS транзистора выходного каскада УМ. Нагрузка носит индуктивный характер, что соответствует максимальной мощности, поставляемой в нагрузку. Комплексная величина оптимального импеданса нагрузки получена экс-

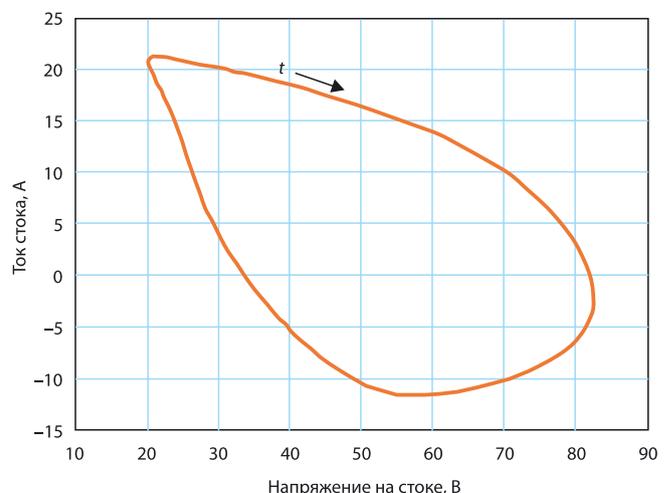


Рис. 7. Нагрузочная характеристика транзистора выходного каскада УМ

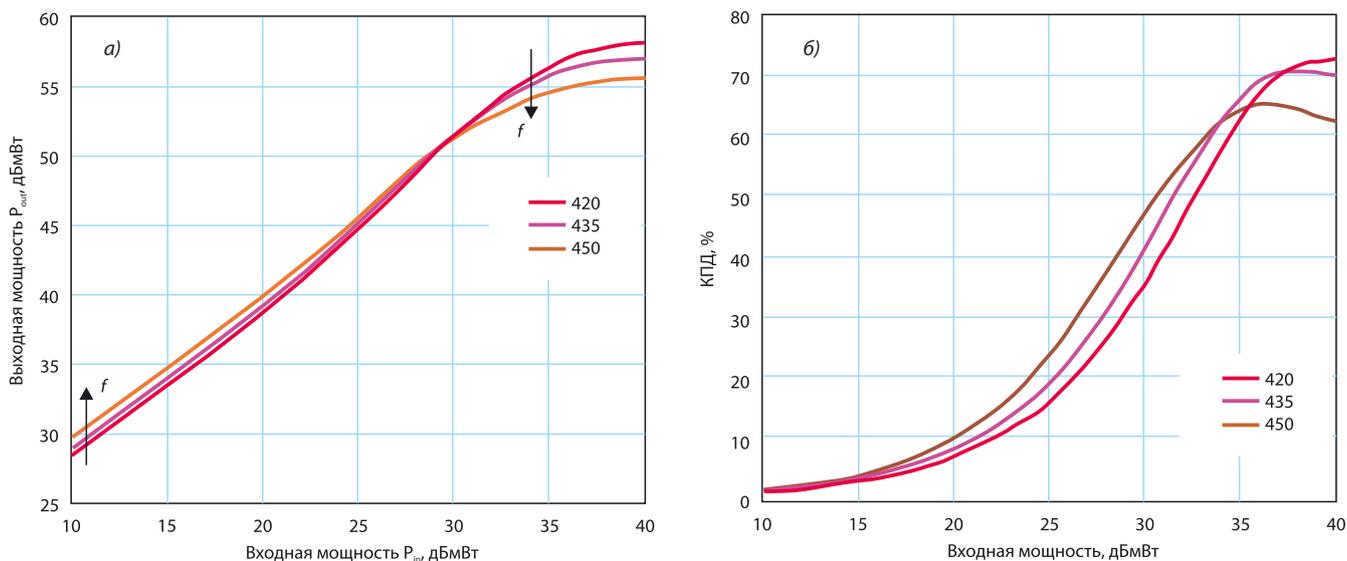


Рис. 8. Передаточная характеристика транзистора выходного каскада и КПД УМ

периментально методом согласования нагрузок, при котором транзистор оснащен цепями сопряжения с измерительным оборудованием.

На рис. 8, а представлена передаточная характеристика (ПХ) выходного каскада УМ, имеющая небольшой рост коэффициента усиления с увеличением частоты до $P_{in} \approx 30$ дБмВт. Однако точка 1 дБ компрессии на верхней граничной частоте 450 МГц на 1...2 дБ ниже. Линейность ПХ до $P_{out} = 50$ дБмВт остается вполне удовлетворительной (измеренный уровень интермодуляционных компонентов не превышает минус 27 дБн), что в дальнейшем позволит применить упрощенную цепь линеаризации ПХ. После точки $P_{in} = 35$ дБмВт (рис. 8, б) эффективность УМ остается постоянной, что соответствует 3 дБ компрессии (рис. 8. а).

На рис. 9 приведены зависимости спектральной плотности мощности формируемого БРПУ ЛЧМ-сигнала на выходе синтезатора и собственно на выходе самого БРПУ. Неравномерность на графике выходного спектра БРПУ обусловлена неравномерностью АЧХ восьмизвенного полосового фильтра на спиральных резонаторах с малыми потерями, установленного на выходе УМ каждого из каналов БРПУ. Фильтр необходим для обеспечения требований по внеполосным и побочным излучениям изделия.

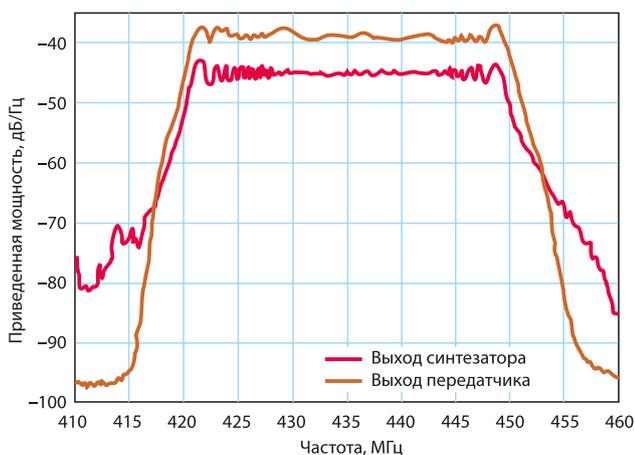


Рис. 9. Спектральная плотность мощности ЛЧМ-сигнала

В БРПУ в качестве цифрового синтезатора частоты (ЦВС) используется отечественная микросхема 1508ПЛ8Т производства ОАО НПЦ «ЭЛВИС». Микросхема имеет 10-разрядный ЦАП, работающий на частоте до 1 ГГц, обеспечивает формирование гармонических квадратурных колебаний и сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), амплитудно-фазовой (QAM), частотной и фазовой манипуляцией (ЧМ и ФМ). Кроме того, микросхема содержит генератор фазового и амплитудного шума и 64 профиля для хранения узловых значений параметров частотно-зависимой коррекции в режиме излучения ЛЧМ-сигнала [8].

Регулировка уровня входного сигнала БРПУ осуществляется с помощью цифрового аттенуатора, входящего в состав ЦВС. Его применение уменьшает количество уровней квантования, приводя к возникновению паразитной амплитудной модуляции. Для устранения нежелательных дискретных составляющих в спектре выходного сигнала используется аппаратная рандомизация амплитуды (стандартная функция микросхемы 1508ПЛ 8Т).

Для коррекции неравномерности АЧХ-усилителя, фильтра и высокочастотного коммутатора в ЦВС в режиме формирования ЛЧМ-сигнала применяется частотная коррекция методом кусочно-линейной интерполяции.

Формирователь модулирующей псевдо-случайной последовательности (ПСП) построен на микросхеме программируемой логики (ПЛИС) семейства Spartan 3 компании XILINX по классической схеме, основой которой служит сдвиговый регистр переменной разрядности [9]. Минимальное количество разрядов регистра — 5 (длина последовательности — 31), максимальная разрядность регистра — 12 (длина последовательности — 4095). Длительность сигнального элемента ПСП может изменяться в дискретном диапазоне значений с шагом 66,6 нс. Для повышения надежности в формирователе используется схема троирования с мажоритарным принятием решения. Внешний вид БРПУ в сборе показан на рис. 10.

Основными направлениями по дальнейшему повышению основных технических характеристик БРПУ являются: улучшение массогабаритных характеристик, снижение энергопотребления и уменьшение нелинейности каждого УМ каждого из каналов. Немаловажно и расширение но-



Рис. 10. Внешний вид БРПУ

менклатуры отечественной базы, применяемой при построении БРПУ.

Заключение. Реализация БРСА в Р-диапазоне на МКА «АИСТ-2Д» открывает возможность реализации системы МПРЛК и, соответственно, решения задач наблюдения не только поверхности Земли, но и мониторинга околоземного пространства, наблюдения воздушных целей [10], причем в сроки, сопоставимые с принятыми в соответствующих программах других стран.

Успешное решение указанных задач стало возможным благодаря:

- созданию БРПУ, обеспечивающего формирование широкого ансамбля сигналов высокой мощности (от 130 до 180 Вт в импульсе), и успешным его испытаниям, выполненным филиалом ФГУП НИИР–СОНИИР;
- разработке наземной антенной решетки из кросс-поляризованных элементов типа Уда-Яги с коэффициентом усиления до 20 дБ в полосе до 30 МГц на несущей частоте 435 МГц и успешным ее испытаниям, выполненным ФГБОУ ВПО ПГУТИ (Самара);
- наличию всех необходимых предпосылок успешного проведения намеченного на январь 2016 г. эксперимента по

регистрации сигналов в прямом канале БирЛК. Это позволит получить реализации случайных амплитудных и фазовых флуктуаций сигнала на трассе спутник-земля с последующим проведением статистической идентификации искажений сигнала, необходимой для построения эффективных алгоритмов синтеза апертуры в Р-диапазоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ishimaru A., Kuga Y., Liu J. et al. Ionospheric effects on synthetic aperture radar at 100 MHz to 2 GHz // Radio Science (USA). — 1999. — Vol. 34. — № 1. — P.257–268.
2. Goriachkin O.V. Azimuth Resolution of Spaceborne P, VHF-Band SAR // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. — 2004. — Vol.1. — № 4. — P. 251–254.
3. Akhmetov R.N., Belokonov I.V., Goriachkin O.V. et al. Space-based juxtaposition Earth and Circumterrestrial radar monitoring system based on micro-satellites technologies / in Book of abstracts of the First Specialized International Symposium, Limassol, Cyprus. — 2009. — November 2–7.
4. Ramongassie S., Valle P., Orlando G. et al. P-band SAR instrument for BIOMASS// EUSAR. — 2014 — P.1156–1159.
5. Akhmetov R., Goriachkin O., Ivachenko E. et al. Multi-Positional VHF-Band SAR System for Earth Observation on the Basis of Microsatellites / URSI-F Training Workshops 7th March 2011 in Garmisch-Partenkirchen, Alpine-Bavaria, Germany. — 2011. — P. 78–80.
6. Borisenkov A.V., Goriachkin O.V., Dmitrenok V.I. et al. Bistatic P-band SAR for spacecraft AIST-2 // Procedia Engineering. — 2015. — Vol. 104. — P. 1–162.
7. Jaisson D. Planar impedance transformer // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. — May 1999. — Vol. 47, № 5.
8. Микросхема интегральная 1508ПЛ1 8Т. Техническое описание. — ОАО НПЦ «ЭЛВИС» 2012. — 31с.
9. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. — 2-е изд.: Пер с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2003. — 1104 с.
10. Горячкин О.В. Пути развития радиолокационных космических систем дистанционного зондирования Земли // Вестник СГАУ. — 2010. — № 2. — С. 92–104.

Получено 13.07.15

ИНФОРМАЦИЯ

РОСПАТЕНТ ВЫДАЛ ФГУП НИИР — СОНИИР НОВЫЕ ПАТЕНТЫ

Филиал ФГУП НИИР — СОНИИР, признанный в России научно-техническим центром, активно продвигает инновации в области создания современных радиотехнических систем и комплексов.

СОНИИР входит в состав Технического комитета по стандартизации «Связь» и является базовой организацией подкомитета ПК4 «Системы и оборудование радиосвязи и звукового вещания в НЧ, СЧ, ВЧ, ОВЧ и УВЧ диапазонах».

Филиал ФГУП НИИР — СОНИИР является получателем более 260 патентов, из которых поддерживает 18. 16 июля 2015 года на изобретения филиала ФГУП НИИР — СОНИИР выданы новые патенты:

- «Компактная вертикальная антенная решетка из вертикальных вибраторов, пространственно совмещенных с опорой». Авторы: **Д.В. Лучин, А.В. Невский, А.М. Плотников, А.П. Трофимов, В.В. Юдин.**

- «Способ передачи сигналов через всенаправленную кольцевую логопериодическую антенную решетку вертикальной поляризации и антенная решетка для его осуществления». Авторы: **А.В. Невский, А.П. Трофимов, В.В. Юдин.**

Изобретения относятся к радиотехнике и предназначены для использования в системах подвижной связи.