



УДК 629.78

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.172.174

РАЗРАБОТКА РАДИОЧАСТОТНЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ БОРТОВЫХ АКУСТООПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

DEVELOPING RF MODULES FOR ONBOARD SPACECRAFT ACOUSTO-OPTIC DEVICES

БАСКИН ВЛАДИМИР АНАТОЛЬЕВИЧ

bva@niimp.ru

BASKIN VLADIMIR A.

bva@niimp.ru

СОКОЛОВ ИГОРЬ АЛЕКСЕЕВИЧ

SOKOLOV IGOR A.

КАЛИННИКОВ ЮРИЙ КОНСТАНТИНОВИЧ

KALINNIKOV YURY K.

АО «НИИ Микроприборов им. Г. Я. Гуськова»

124460, г. Москва, г. Зеленоград,

ул. Конструктора Гуськова 1, стр. 1

“Scientific Research Institute of Microdevices named after G. Guskov” JSC

bld. 1, 1 Konstruktora Guskova St., Zelenograd, Moscow, 124460

ВВЕДЕНИЕ

Технологические возможности по созданию высокочастотных преобразователей ультразвука на разнообразных материалах открыли дорогу к созданию акустооптических приборов. В акустооптических приборах используется взаимодействие излучения с фазовой решеткой, создаваемой высокочастотной акустической ультразвуковой волной (УЗВ). Таким способом создаются дефлекторы, модуляторы, сдвигатели частоты оптического излучения для систем с оптическим гетеродинамированием. Акустооптические приборы способны работать с мощным лазерным излучением с плотностью мощности в сотни мегаватт на квадратный сантиметр, осуществляя отклонение, модуляцию и сдвиг частоты. Акустооптические сканеры и модуляторы лазерного излучения могут работать с мощными лазерами, при этом обеспечивая точное быстродействующее электронное управление направлением и уровнем потока лазерного передатчика в системах космической связи и локации, а при применении в перестраиваемых лазерных системах — быстро и точно с произвольной выборкой перестраивать длину волны лазеров связи. Такие системы в паре с акустооптическими монохроматорами могут существенно повысить помехозащищенность систем лазерной связи нового поколения.

Использование акустооптических эффектов в анизотропных оптических кристаллах привело к созданию акустооптических

фильтров, успешно используемых для быстрой перестройки лазеров, в спектрометрах ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов. В таких устройствах за время порядка нескольких микросекунд возможна перестройка длины волны пропускания фильтра в любую точку рабочего диапазона. Важной особенностью подобных фильтров является передача изображений сквозь них. Отсутствие движущихся деталей, стойкость к воздействиям, гибкость электронного управления и малые габариты позволяют использовать АОФ в космосе, авиации и вообще в оборонных системах.

Одним из важных инструментов планетографических научных исследований являются дистанционные спектральные измерения коэффициентов отражения поверхности и атмосферы. Современная наука уделяет большое внимание измерениям в ближнем ИК-диапазоне, где расположены линии поглощения важных, в том числе «парниковых» газов, спектральные особенности воды и льда, горных пород и растительности. Наша организация совместно с ИКИ РАН, который выступает как основной заказчик, участвует в международных программах «ЭкзоМарс» и «Луна-Глоб» в рамках разработки и создания акустооптических монохроматоров для спектральных приборов ACS-NIR, ICEM и LIS.

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОНИКИ И СХЕМОТЕХНИКИ АКУСТООПТИЧЕСКИХ МОНОХРОМАТОРОВ

Акустооптический фильтр (АОФ) является твердотельным активным прибором, в котором длина волны и коэффициент пропускания монохроматора управляются уровнем и частотой высокочастотного ультразвука, возбуждаемого в анизотропном кристалле акустоэлектронным преобразователем (АЭП). АЭП представляет собой очень тонкую пластинку кристаллического пьезоматериала с напыленными электродами, прикрепленную индией акустической сваркой к анизотропному

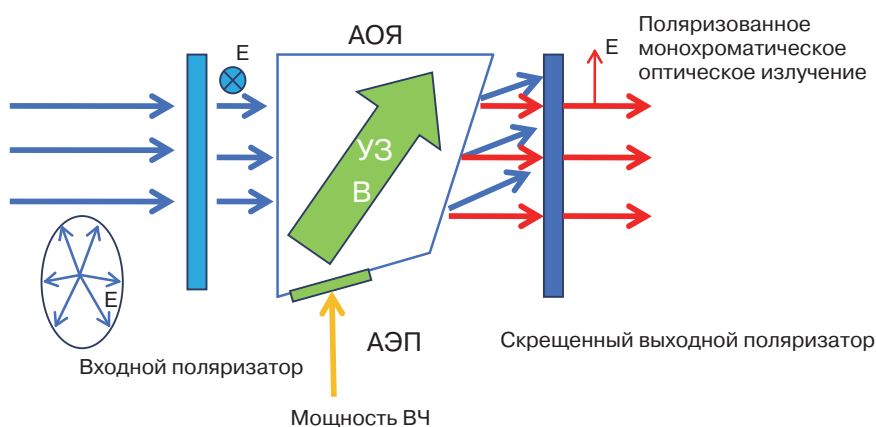


Рис. 1. Функциональная оптическая схема акустооптического монохроматора



акустооптическому кристаллу. Приложение высокочастотного электрического поля к пластине вызывает акустическую волну. Частотный диапазон генератора составляет для ИСЕМ от 25 МГц до 80 МГц, для МПС, как части ACS-NIR, — от 65 МГц до 160 МГц. Параметры АОПФ и прибора в целом определяются параметрами АЭП, интегральной эффективностью преобразования высокочастотной энергии в ультразвук в рабочей полосе частот. Рассмотрим особенности схемотехники электроники возбуждения УЗВ на примере монохроматора ИСЕМ.

С точки зрения ВЧ-техники АЭП представляет собой конденсатор с емкостью (для данной конструкции) около 100 пикофард и сопротивлением излучения от 10 до 2 Ом. Поэтому первой задачей является эффективное согласование такого импеданса с линией тракта 50 Ом. К сожалению, даже теоретически, согласно теореме Боде — Фано, КСВн такой системы в полосе 25–80 МГц составит более 3–3,5. Колебание импеданса в 9–12 раз приводит к ухудшению КПД усилителя мощности, резкому росту потребления в точках низкого импеданса. В условиях работы на борту посадочного модуля, исследовательского марсохода энергетические ограничения являются идеологически важными и поэтому должны выполняться строго. Ограничение пикового потребления мощности ВЧ-драйвера приведет к уменьшению коэффициента передачи монохроматора в некоторых точках диапазона, вообще к неравномерности передачи монохроматора. Для улучшения КПД и равномерности коэффициента передачи было применено переключаемое согласующее устройство, разбивающее диапазон 25–80 МГц на два поддиапазона: — 25–40 МГц и 40–80 МГц. Переключение осуществляется р-и-п-диодами. Это решение уменьшило КСВн в каждом поддиапазоне до уровня 2–2,2 и улучшило фильтрацию гармоник усилителя ВЧ.

Выходная мощность усилителя на преобразователе ультразвука должна составлять 2–3 Вт. При этом пиковое потребление от питания +12 В не должно превышать 6 Вт. Таким образом, критическими параметрами драйвера является высокий КПД, габариты, масса и условия эксплуатации. Средними являются требования к спектральной чистоте спектра возбуждения, быстрдействию перестройки частоты, а требования к стабильности мощности возбуждения удалось снизить за счет введения системы непрерывного измерения и контроля выходной мощности и температуры кристалла. Схемотехника включает в себя цифровой синтезатор частоты прямого синтеза, двухтактные предварительные усилители на интегральных усилителях 1324УВ3 и двухтактный выходной усилитель на транзисторах D2225УК. Последние выбраны за миниатюрный керамический корпус SO-8 при достаточной выходной мощности. Кроме того, применение двухтактных схем позволило снизить уровень гармоник в выходном сигнале и повысить КПД до 50 % в диапазоне рабочих частот. Дополнительную фильтрацию и увеличение КПД системы обеспечило применение переключаемого р-и-п-диодами согласующего устройства, стабилизирующего нагрузку усилителя в диапазоне частот, и согласование с импедансом преобразователя ультразвука. Контроль и коррекцию тока потребления в зависимости от частоты управления, измерение напряжения питания, температуры и выходной ВЧ-мощности драйвера, переключение согласующего устройства, согласование интерфейсов управления и передачи данных между монохроматором и процессором комплекса обеспечила встроенная МП-система на основе радиационно-стойкого МП 1874ВЕ7Т. Монохроматор содержит импульсный преобразователь питания +12 В в напряжения +3,3 В, +1,8 В и –3,0 В для питания р-и-п-диодов. Удалось добиться потребления общей

части монохроматора без усилителя мощности около 1 Вт. Остальные 5 Вт импульсной мощности потребляет двухтактный усилитель мощности ВЧ.

Часто серьезной проблемой для бортовых приборов является радиационная стойкость оборудования, которая в данном случае заметно осложняется низким бюджетом разработки и вступившими в действие к этому моменту санкциями. Тем не менее этой проблеме уделялось серьезное внимание и большинство критических элементов как-то: микропроцессор, ПЗУ, приемопередатчики сигналов управления, усилители ВЧ, блоки и преобразователи питания имеют повышенную радиационную стойкость. Это, например, процессоры 1874ВЕ7Т, ПЗУ 1645РТ2У, регистры 5584ИР22АТ1, передатчики 5559ИН21Т, усилители 1324УВ3 и другие. Вся остальная элементная база также имеет гарантированный уровень радиационной стойкости и военную приемку. Кроме того, серьезно повышает стойкость общая конструкция приборов, включающая конструктивные и оптические элементы системы, экранирующие основные электронные блоки.

Стойкость приборов к условиям эксплуатации включает в себя, согласно современным требованиям, работоспособность в условиях вакуума. Приборы и вся электроника негерметичны, и поэтому вся комплектация должна иметь металлокерамические корпуса и гарантированную работоспособность в условиях вакуума. Те же условия накладываются на применяемые технологические и конструкционные материалы.

Наиболее жесткими оказались температурные условия эксплуатации приборов. Если прибор МПС в составе ACS-NIR работает на орбите спутника Марса, где отработаны способы и режимы терморегуляции аппаратуры, то во время лунной и марсианской ночи температура может опускаться до –130 °С. Размещение прибора LIS на «руке» манипулятора-экскаватора, а прибора ИСЕМ — на штанге оптической обзорной антенны не позволяет обеспечить обогрев приборов в течение ночи из-за ограниченной энергоемкости аккумуляторов [1]. Поэтому к приборам предъявляется требование стойкости к соответствующей температуре хранения. Проведенные в ИКИ РАН и ЕКА (Европейское космическое агентство) испытания [2] показали, что большая часть комплектации в металлокерамике с ВП такую температуру хранения выдерживает. Также и рабочий диапазон температур этих приборов достаточно широк и составляет ±60 °С. В результате появились некоторые ограничения на применяемые комплектующие элементы, включающие, в частности, оптроны и некоторые виды разъемов.

КОНСТРУКЦИЯ МОНОХРОМАТОРОВ

Требования к конструкции приборов включали в себя жесткие ограничения на массу, габариты и энергопотребление, характерные для приборов дальнего космоса. Кроме того, особенностью конструирования и отработки технологии являлось сочетание оптических элементов и электроники в единой конструкции. Комплексный подход к конструированию объединенных оптоэлектронных блоков позволил создать весьма компактные и легкие системы. Например, масса монохроматора — преселектора МПС ACS-NIR вместе с высококачественной оптической системой и электроникой составила около 600 грамм, а монохроматора для прибора ИСЕМ — 118 грамм. В последнем случае компактность (58×58×25 мм³) обеспечило только трехмерное конструирование и разбиение электроники на три платы, соединенные высоконадежными разъемами.

Жесткие требования к температурному диапазону хранения и работы потребовали объемной работы по совершенствованию



конструкции и технологии производства приборов. Основная работа проводилась в целях отработки технологии крепления крупных кристаллов АОПФ, оптических элементов и технологии производства АОПФ. Надо отметить, что оборудование должно выдерживать как вибрационные нагрузки вывода на орбиту, так и циклические изменения температуры в широком диапазоне. Одновременное выполнение таких требований является трудновыполнимым. Успеха удалось достигнуть сочетанием отбора специальных материалов и конструкторских решений. Модуль преселектора МПС успешно работает на орбите Марса в составе «Экзомарс-2016», модуль ИСЕМ прошел испытания и передан для сборки объекта «Экзомарс-2020».

Успешный опыт создания спектральных приборов для планетографических исследований в дальнем космосе с использованием акустооптических фильтров, наработки в области технологии, схемотехники и конструирования нового поколения приборов должны быть востребованы в области дистанционного зондирования Земли в программах экологического мониторинга, в том числе «парниковых выбросов» как с орбитальных высот, так и средствами малой авиации и БПЛА. Этому способствуют малые габариты и вес разработанной аппаратуры, ее стойкость к вибрациям и температурам, проработанность программ дистанционных исследований атмосферы и геологии. В качестве примера приводим пример установки акустооптического видеоспектрометра на борту малогабаритного дрона для использования в сельском хозяйстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы надеются, что изложенный опыт создания приборов для планетографических исследований, приведенные результаты разработки и испытаний созданных устройств, изложенные подходы и методы конструирования и разработки комплексных оптикоэлектронных приборов окажутся полезными при проектировании перспективных спектральных приборов для дистанционных исследований в области планетографии, экологического контроля, научных исследований климата, в интересах геологии, сельского хозяйства, промышленности и военного дела.



Рис. 2. Малогабаритный дрон с новым типом спектрального оборудования — акустооптическим видеоспектрометром

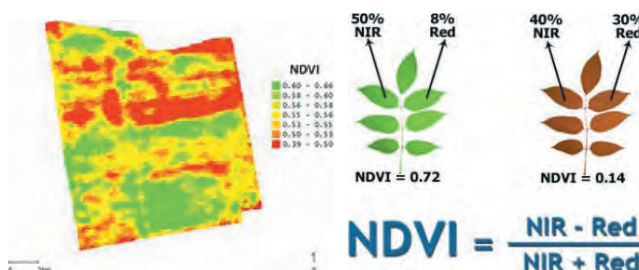
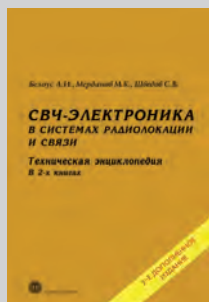


Рис. 3. Использование спектральной информации. Карта спектральных индексов растительности

ЛИТЕРАТУРА

1. Korablev Oleg, Ivanov Andrey, Fedorova Anna, Kalinnikov Yurii K., Shapkin Alexei, Mantsevich Sergey, Viazovetsky Nikita, Evdokimova Nadezhda, Kiselev Alexander V. *Development of a mast or robotic arm-mounted infrared AOTF spectrometer for Moon surface and Mars probes* // Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXIII, Proc. of SPIE. Vol. 9608. 960807. © 2015 SPIE.
2. Mantsevich S. N., Korablev O. I., Kalinnikov Yu. K., Ivanov A. Yu., Kiselev A. V. *Wide-aperture TeO2 AOTF at low temperatures: Operation and survival* // Ultrasonics 59 (2015). P. 50–58.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА В СИСТЕМАХ РАДИОЛОКАЦИИ И СВЯЗИ. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ В 2-Х КНИГАХ

А. И. Белоус, М. К. Мерданов, С. В. Шведов
Издание 2-е, доп.

Впервые в отечественной научно-технической литературе в объеме одной книги детально рассмотрены теоретические основы, физические механизмы и принципы работы всех известных СВЧ-приборов и типовых устройств на их основе, методы расчета и конструирования, базовые технологические, схемотехнические и конструктивные особенности каждого класса СВЧ-приборов, а также наиболее распространенных технических решений радиоэлектронных систем на их основе от РЛС и телекоммуникационных устройств различного назначения до СВЧ-оружия наземного и космического применения.

Энциклопедия оформлена в двух книгах и содержит 17 глав. Данный труд также может служить универсальным справочным пособием для студентов, преподавателей, ученых и инженеров, специализирующихся в области СВЧ-электроники и ее многочисленных применений.

М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018.

Книга 1 – 818 с. Цена 1090 руб.

ISBN 978-5-94836-531-2

Книга 2 – 702 с. Цена 1090 руб.

ISBN 978-5-94836-532-9

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 (495) 234-0110; 📠 +7 (495) 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru