

---

# РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

---

УДК 621.38

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ РАДИОВЫСОТОМЕРА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

А. В. Гусинский, А. И. Волковец, В. Л. Ланин, М. С. Свирид, Д. А. Кондрашов,  
В. Е. Самонов, С. С. Гурский, Д. Г. Булавко, Т. А. Дубновицкая

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск*

Рассмотрена конструкция радиовысотомера миллиметрового диапазона, выполненного по схеме линейно-частотно-модулированного сигнала, в котором большинство элементов используется в бескорпусном исполнении. Сборка радиовысотомера выполнена по модульному принципу с применением пьедесталов из псевдосплава медь-молибден. Оптимизированы технологические режимы ультразвуковой сварки золотой проволоки диаметром 18 мкм в глубоких колодцах.

*КС: радиовысотомер, миллиметровая волна, конструкция, технология сборки, поверхностный монтаж, ультразвуковая микросварка, проволочное соединение*

## FEATURES OF THE DESIGN AND TECHNOLOGY OF ASSEMBLING MILLIMETER RANGE RADIO ALTIMETER

A. V. Gusinsky, A. I. Volkovets, V. L. Lanin, M. S. Svirid, D. A. Kondrashov,  
V. E. Samonov, S. S. Gursky, D. G. Bulavko, T. A. Dubnovitskaya

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk*

The article considers the millimeter range radio altimeter design made according to the scheme of linear-frequency-modulated signal in which the majority of unpacked elements are used. The altimeter assemblage is executed by a modular principle with the use of pedestals from copper-molybdenum pseudo-alloy. Technological modes of ultrasonic welding of a gold wire 18 μm in diameter in deep wells are optimized.

*Keywords: radio altimeter, millimeter wave, design, assembly technology, SMT, ultrasonic microwelding, wire connection*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Радиовысотомеры (РВ) малых высот (до 1500 м) применяют для измерения высоты, на которой находится летательный аппарат (ЛА) относительно земной поверхности, для управления ЛА в вертикальной плоскости в системах захода на посадку и автоматической посадки. В РВ малых высот применяется принцип измерения высоты с использованием непрерывного линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала. Большинство РВ малых высот дают информацию не только о текущей высоте полета, но и о достижении ЛА установленной (заданной) высоты полета (или опасной высоты), а также о своем состоянии и исправности. Эта информация поступает на индикаторы РВ и в систему управления ЛА.

Из известных аналогов можно выделить радиовысотомер Miniature Radar Altimeter (MRA) Type2 производства Roke Manor Research Limited (Англия). По сравнению с представленным радиовысотомером, MRA Type2 имеет меньшую выходную мощность, более широкую диаграмму направленности, большие габаритные размеры, меньший диапазон измерения высоты.

## 2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ

РВ построен по классической схеме РВ малых высот с ЛЧМ зондирующим сигналом. Отличительная особенность в построении – способ управления зондирующим сигналом и способ слежения за истинной высотой. Управление высотомером, обработка сигналов, а также информационный обмен с внешними устройствами реализованы на ПЛИС Spartan-6 фирмы Xilinx. Структурная схема РВ приведена на рис. 1.

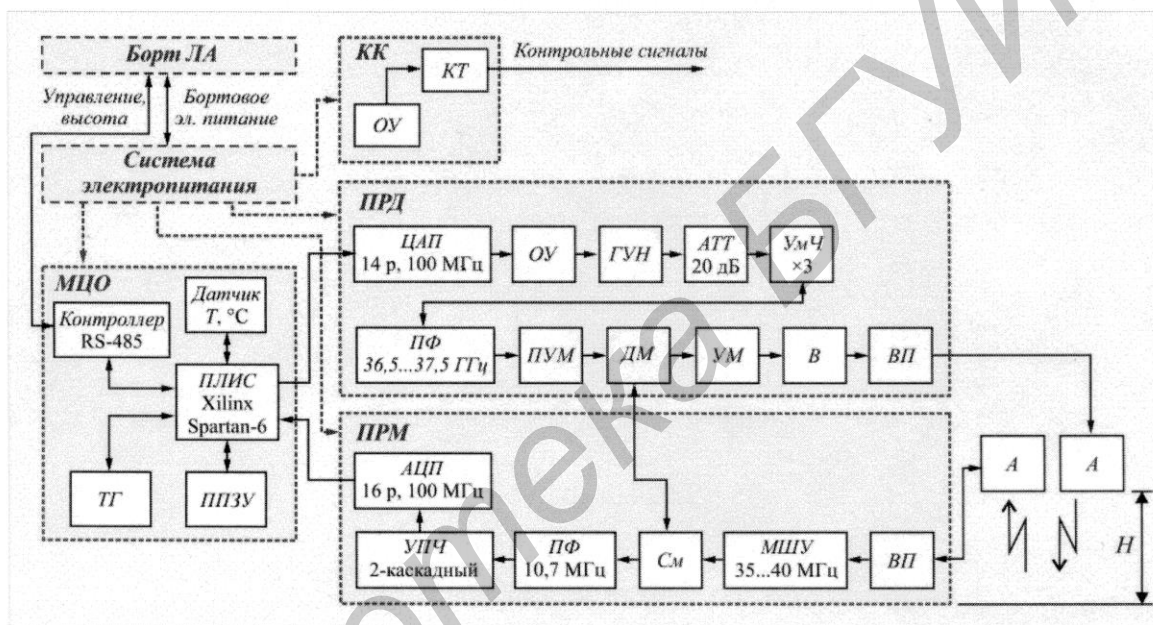


Рис. 1. Структурная схема РВ:

КК – контрольный канал; ОУ – операционный усилитель; КТ – контрольная точка; МЦО – модуль цифровой обработки; ТГ – тактовый генератор; ППЗУ – перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство; ПРД – передатчик; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; ГУН – генератор, управляемый напряжением; АТТ – аттенюатор; УмЧ – умножитель частоты; ПФ – полосовой фильтр; ПУМ – предварительный усилитель мощности СВЧ; ДМ – делитель мощности; УМ – усилитель мощности СВЧ; В – вентиль; ВП – волноводный переход; А – антенна; ПРМ – приемник; МШУ – малозумящий усилитель СВЧ; См – смеситель; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Конструктивно РВ выполнен в виде параллелепипеда (рис. 2), внутри которого с одной стороны фрезерованием выполнены углубления для размещения СВЧ-элементов, а также волноводные переходы с площадкой для крепления антенн, на противоположной стороне размещена плата модуля цифровой обработки, включающая устройство управления и цифровой обработки.

В РВ использованы рупорные конические антенны. Подавляющее большинство элементов

СВЧ с рабочей частотой выше 30 ГГц выполнены в бескорпусном исполнении, что позволяет существенно улучшить параметры разрабатываемого устройства, уменьшить его габаритные размеры [1]. Сборка СВЧ-устройств на бескорпусных элементах осуществляется с применением технологических операций сборки гибридных интегральных схем.

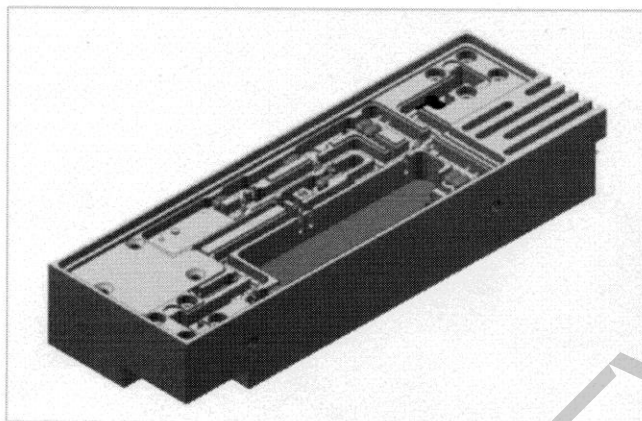


Рис. 2. Конструктивное исполнение РВ

Для построения СВЧ-тракта РВ выбрана элементная база в бескорпусном исполнении производства NEDI Technology (Китай), METDA Semiconductors (Китай), Analog Devices/Hittite Microwave (США), ОАО «Минский НИИ Радиоматериалов» (Беларусь). Активные элементы выполнены на арсениде галлия толщиной 50...100 мкм.

СВЧ-тракт высотомера собран по модульному принципу. Конструкция модуля на примере малошумящего усилителя (МШУ) представлена на рис. 3.

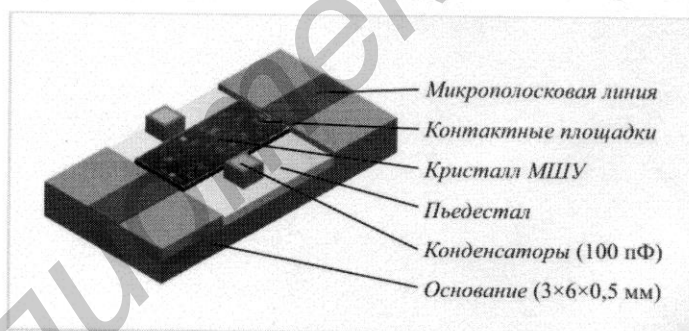


Рис. 3. Конструкция модуля малошумящего усилителя

Основание изготовлено из листа АМг2-0,5 (ГОСТ 21631-76) с покрытием О-Ви(99,8)6. Пьедестал – из псевдосплава медь-молибден (Мо – 85 %, Cu – 15 %) размером 3,0×2,7×0,2 мм с покрытием золотом.

Микрополосковая линия передач – из  $Al_2O_3$  (99,6 %) шириной 0,254 мм, с медной фольгой толщиной 18 мкм и с покрытием золотом. На основание устанавливается пьедестал и микрополосковые линии на электропроводящий двухкомпонентный компаунд Н20Е производства ЕРО-ТЕК. Затем с помощью того же компаунда устанавливается кристалл МШУ NC10117C-2640 (GaAs толщиной 100 мкм) и конденсаторы с определенной величиной зазора (рис. 4).

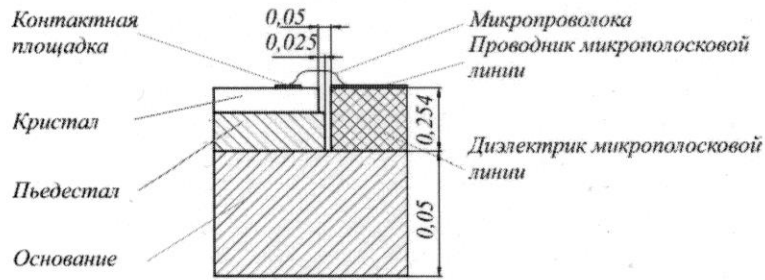


Рис. 4. Разрез модуля МШУ

Соединение контактных площадок СВЧ-микросхемы с микрополосковой линией и конденсаторами выполнено золотой проволокой диаметром 18 мкм. При разварке микропроволоки необходимо принимать во внимание специфику сборки СВЧ-элементов. Для уменьшения потерь на отражение необходимо минимизировать влияние неоднородностей линии передач с волновым сопротивлением 50 Ом. В рассматриваемой структуре основной неоднородностью является микропроволока, основными параметрами которой являются длина и диаметр.

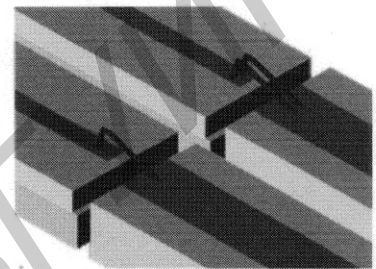


Рис. 5. Модели проволочных соединений

В качестве соединительных элементов СВЧ-узлов предпочтительно использование золотой ленты либо нескольких микропроволок, включённых параллельно (рис. 5). На рис. 6 и в таблице приведены результаты моделирования коэффициентов передачи и отражения в зависимости от длины перемычки в диапазоне частот 20...60 ГГц.

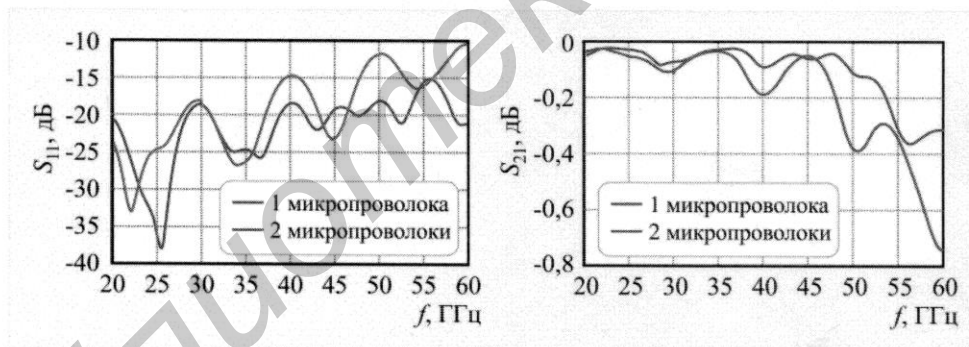


Рис. 6. Результаты моделирования параметров отражения и передачи микропроволоки

**Зависимость коэффициентов передачи и отражения от длины перемычки в диапазоне частот до 40 ГГц**

Количество перемычек	Параметр	Длина перемычки, мкм		
		250	300	350
1	$S_{21}$ , дБ	-0,19	-0,4	-0,5
	$S_{11}$ , дБ	-15,0	-12,0	-11,0
2	$S_{21}$ , дБ	-0,09	-0,15	-0,18
	$S_{11}$ , дБ	-18,0	-15,0	-16,0

Типичные значения размеров контактных площадок используемых элементов составляют 60...80 мкм. Монтаж более двух параллельно включенных проволок диаметром 18 мкм затруднителен.

### 3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ

Для формирования соединений внутри отдельных устройств использована установка присоединения выводов ультразвуковой сваркой ЭМ-4320-2 производства ОАО «Планар» (Беларусь). В качестве электродов применены капилляры для разварки методом «клин-клин» 30АВТ-П-2015-1.00-СМ и FP30-П-1515-1.00-СМ производства «Small Precision Tools» (США).

Собранные модули тестированы в измерительной оснастке. В качестве контактирующих устройств применены коаксиально-микророскопические переходы ХМ-РВ1-292F (до 50 ГГц) и ХМ-РВ1-185F (до 67 ГГц) фирмы «X-Microwave» (США).

Следующим этапом в сборке тракта РВ является установка на клей модулей в каналы и соединения модулей между собой. Особенностью межмодульных соединений является необходимость осуществления разварки в глубоком канале. Ширина канала составляет 3 мм, глубина – 3 мм. При межмодульном соединении ширина микророскопической линии (0,5 мм) позволяет осуществлять монтаж трёх параллельно включенных проволок.

При разварке межмодульных соединений использована установка присоединения выводов контактной сваркой ЭМ-4320-4, которая характеризуется 32-мм глубиной проникновения в зону сварки, что позволяет производить сварку в глубоких колодцах и каналах [2]. В качестве инструментов применены электроды для контактной сварки ЭК2-18-80 (НПООО «Спектрин», Беларусь). Для разварки оптимизирован рабочий режим со следующими параметрами:

Усилие прижима при касании .....	90
Усилие прижима на первой сварке .....	90
Усилие прижима на второй сварке .....	90
Высота зоны поиска (для каждой из двух точек сварки).....	30
Напряжение сварочного импульса.....	0,67 – 0,7 В
Длительность сварочного импульса .....	0,15 – 0,20 с

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный РВ миллиметрового диапазона, в отличие от всех видов высотомеров, используемых в беспилотной авиации (лазерных, акустических, барометрических), обладает неоспоримым достоинством – всепогодностью при обеспечении требуемой высокой точности и относительно малых габаритных размерах и массе. Технические характеристики РВ следующие:

Габаритные размеры РВ без антенн.....	120×40×24 мм
Масса РВ с рупорными антеннами.....	0,25 кг
Рабочая длина волны.....	8 мм
Мощность зондирующего сигнала.....	не более 1 Вт
Диапазон измеряемых высот.....	0,3 – 300 м
Интерфейс управления и информационного обмена .....	RS-485

Особенностями конструкции РВ являются использование элементов СВЧ в бескорпусном исполнении, модульный принцип конструирования, применение пьедесталов из псевдосплава

медь-молибден для монтажа кристаллов в модулях. Сборка РВ осуществлена по технологии гибридных интегральных схем с использованием проволочного монтажа в глубоких колодцах.

РВ прошел весь цикл климатических, лётных и виброиспытаний. Лётные испытания проводились на моделях БЛА «Ranger EX» и БЛА 1ЛА-150 «Гриф» из состава беспилотного авиационного комплекса БАК-100. Среднеквадратическая ошибка измерения высоты в диапазоне 0,3...10 м составила  $\pm 0,2$  м, в диапазоне высот 10...100 м – не более  $\pm 3$  % от значения измеряемой высоты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Климачев, И. И.** СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования / И. И. Климачев, В. А. Иовдальский. – М.: Техносфера, 2006. – 351 с.
2. **Ланин, В. Л.** Формообразование проволочных соединений повышенной плотности в изделиях электронной техники / В. Л. Ланин, И. Б. Петухов // Технологии в электронной промышленности. – 2014. – № 2. – С. 76 – 78.
3. **Сосновский, А. А.** Радиоэлектронное оборудование летательных аппаратов: справочник / А. А. Сосновский, И. А. Хаймович. – М.: Транспорт, 1987. – 256 с.
4. **Викторов, В. А.** Радиоволновые измерения параметров технологических процессов / В. А. Викторов, Е. В. Лукин, А. Ф. Совлуков; под ред. В. А. Викторова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 208 с.

*Статья поступила 27 июня 2017 г.*

#### === НОВЫЕ КНИГИ ===

**Антенны и радары с электронным управлением лучом** / Под ред. А.И. Синани, Г.В. Кауфмана. – М.: Радиотехника, 2016. – 234 с.

Рассмотрены наиболее значительные результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области антенной техники. Показана эффективность электронного управления лучом в радарх различного назначения. Проанализированы основные направления развития технологии антенных систем с электронным управлением лучом.

*Для научных работников, аспирантов, инженеров-практиков, преподавателей и студентов радиотехнических специальностей.*