

## ДВУХКАНАЛЬНЫЙ РАДИОМЕТР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛАЖНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ С БПЛА

О.А. Герасимов, Д.В. Дроздов, Ю.В. Рыбаков

Главная Геофизическая обсерватория, 194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

E-mail: y.rybakov@mail.ru

**Аннотация.** Описаны промежуточные итоги работы по оптимизации схемы и конструкции СВЧ радиометра для наблюдения за влажностными характеристиками атмосферы, имеющей целью обеспечение возможности его подъёма над землёй и проведение измерений с борта беспилотного летательного аппарата. Предложена и экспериментально опробована схема с одним приёмником, реализующим параллельное наблюдение на двух частотах.

**Ключевые слова:** радиометр; влагозапас; БПЛА; радиояркостная температура; дистанционное зондирование;

### DUAL-CHANNEL MICROWAVE RADIOMETER FOR OBSERVATIONS OF ATMOSPHERIC VAPOR PARAMETERS FROM UAVS

O.A. Gerasimov, D.V. Drozdov and Y.V. Rybakov

**Abstract.** The design of a microwave radiometer for monitoring the characteristics of the atmosphere from an unmanned aerial vehicle is reported. A scheme with one receiver implementing parallel observation at two frequencies is proposed and experimentally tested.

**Keywords:** radiometer; precipitable water vapor; UAV; brightness temperature; removed sensing

#### Введение

Радиометрический метод оценки влажностных характеристик атмосферы позволяет организовать непрерывное наблюдение, и в этом состоит его решающее преимущество перед традиционной технологией, предполагающей эпизодический запуск датчиков на радиозондах. Примеры создания наземных радиометрических комплексов встречаются в публикациях с 70-х годов и позже [1, 2]. Теоретические основы метода оценки влагозапаса атмосферы, основанного на сравнении двух значений радиояркостных температур, получаемых измерениями на двух частотах СВЧ диапазона, также достаточно проработаны [3, 4]. Однако, наземное размещение аппаратуры не оптимально – достаточно заметить, что в фиксируемых на точке наблюдения интегральных значениях присутствует вклад самого нижнего, приземного слоя воздуха. Будучи доступным для контактного наблюдения, приземный слой не требует дистанционного зондирования, но в то же время оказывает как бы "затеняющий" эффект, снижая достоверность данных о влагозапасе атмосферы на высотах в сотни и тысячи метров.

Установка СВЧ радиометра на борту самолёта-лаборатории [5] реализует возможность наблюдений с больших высот, однако, сами полёты специализированного воздушного судна эпизодичны по природе и не открывают перспектив масштабирования такого опыта в повсеместную практику. Оснащение радиометрами всего парка авиации, часть которого всегда находится в полёте, вероятно, сделает процесс наблюдений круглосуточным, но целесообразность такого решения ещё предстоит обосновать.

На ближайшие годы более доступным решением представляется применение БПЛА. Уже известны примеры успешного подъёма метеорологических датчиков посредством квадрокоптеров малой грузоподъёмности, при суммарном весе полезной нагрузки порядка 200 грамм [6]. Опыт развёртывания сети наземных радиометрических комплексов [7], однако, показывает, что без принятия радикальных мер по миниатюризации СВЧ аппаратуры вес одного прибора достигает десятков килограмм. Что очевидно превышает подъёмные возможности современных БПЛА массового сегмента. Задача всемерного уменьшения веса радиометрических приборов оказывается чрезвычайно актуальной и побуждает к пересмотру всех схемных и конструктивных решений, применявшихся в устройствах наземного (стационарного и автомобильного) базирования, для которых вес и габариты не относились к числу критических характеристик.

### Цель работы

Измерение радиояркостной температуры атмосферы даёт возможность получить информацию о её влагозапасе при сопоставлении значений, получаемых для, как минимум, двух частот СВЧ диапазона. Одна частота выбирается вблизи линии поглощения водяного пара (около 22 ГГц), вторая же отстоит от первой на несколько гигагерц выше, например, в районе 30 ГГц. Соответственно, для обеспечения параллельных измерений на двух частотах конструируется система из двух СВЧ приёмников. Которые, в случае применения супергетеродинной схемы, снабжаются своими независимо работающими генераторами [8]. В данной работе рассматривается возможность сокращения числа узлов конструкции и освещается опыт конструирования единого радиометрического приёмника, решающего задачу наблюдения в двух поддиапазонах (22 и 30 ГГц) при использовании общего гетеродина.

### Структура радиометрического устройства

Основным недостатком супергетеродинной схемы (впервые предложенной в 1918 г.) считается возникновение зеркального канала приёма, отстоящего от частоты рабочего сигнала на величину  $2 \times f_p$ , где  $f_p$  – разностная (промежуточная) частота приёмника. Через зеркальный канал в приёмник проникают помехи, которые трудно подавить полностью. Однако, это же свойство может быть полезным, если требуется приём сразу в двух диапазонах. Например, для сравнения уровней излучения атмосферы в диапазонах 22 и 30 ГГц может быть достаточным построение одного супергетеродинного приёмника, выделяющего разностную частоту 4 ГГц при использовании гетеродина 26 ГГц.

В качестве центрального компонента выбрана микросхема XR1002 производства Mimix Broadband, физически представляющая собой кристалл с размерами порядка 3,5 на 2 миллиметра. В функциональном отношении это трёхкаскадный малошумящий усилитель на диапазон 20–32 ГГц, объединённый с квадратурным смесителем. Для превращения данного компонента в законченный двухдиапазонный радиометрический приёмник потребовалось добавить входной волноводный переход (для соединения с антенным трактом), гетеродин на 26 ГГц, гибридный мост, усилители промежуточной частоты и детекторы для обоих каналов, а также выходные усилители постоянного тока. Обобщённая функциональная схема представлена на рис. 1.

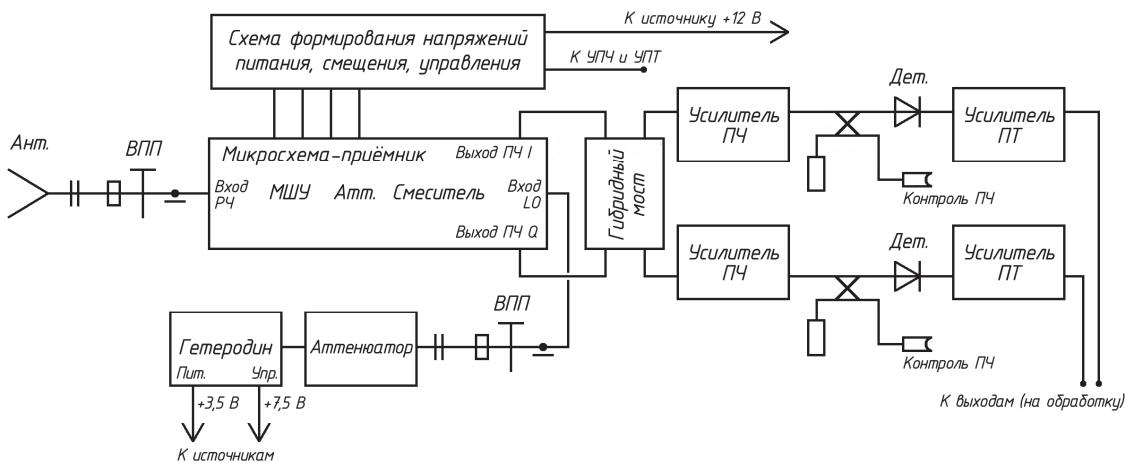


Рис. 1. Функциональная схема устройства

### Изготовление

Наиболее ответственной рабочей операцией, определяющей успех всего дела, является монтаж бескорпусного кристалла. В подложке из органического материала RO4003C прорезается углубление, дном которого оказывается медная фольга экрана. После зачистки поверхности меди кристалл может быть к ней припаян (либо закреплён на проводящий эпоксидный клей). Рядом с кристаллом следует установить развязывающие конденсаторы.

Контактные площадки кристалла, верхние обкладки конденсаторов и площадки микрополосковых линий соединяются короткими перемычками из золотой проволоки толщиной порядка сотых долей миллиметра, закрепляемыми сваркой. Эти операции требуют особой осторожности и нестандартных навыков, так как повреждение хрупкого полупроводникового кристалла лишает смысла дальнейшую сборку изделия. Общий вид смонтированной микросхемы представлен на рис. 2.

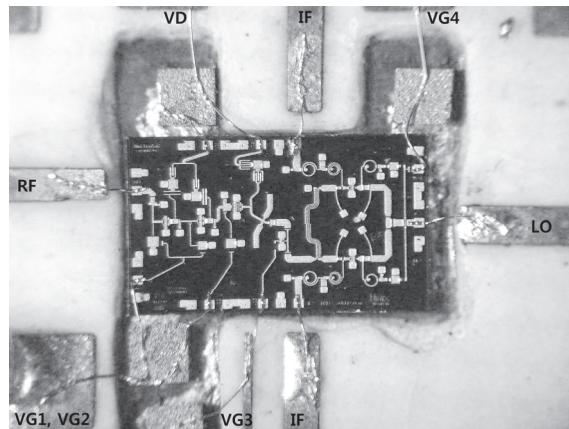


Рис. 2. Установка бескорпусной микросхемы (снимок через микроскоп)

#### Другие особенности конструкции

Размещение прибора на лёгком БПЛА исключает возможность использования сети 220 В, что, в свою очередь, приводит к необходимости аккумуляторного питания, а значит, и дополнительного отягощения конструкции. Изготовленный макет рассчитан на питающее напряжение 12 В при непрерывном потреблении 500 мА, что также не вполне приемлемо для конечного продукта. Дальнейшая работа будет ориентирована на оптимизацию потребления, в частности, через отказ от непрерывности измерения в пользу эпизодических включений, определяемых действительной необходимостью.

В качестве гетеродина для экспериментального макета использовался генератор на транзисторах с варакторной перестройкой частоты в волноводном исполнении. Соответственно, в конструкции появился дополнительный волноводный вход (помимо входного антенного), к которому подсоединялся выходной фланец генератора, притом через волноводный развязывающий аттенюатор. Такое решение не может быть признано окончательным, поскольку противоречит поставленной задаче. Идёт поиск замены (предположительно в виде генератора с микрополосковым выходом).

Усиление промежуточной частоты было реализовано на корпусных микросхемах LEE-29 производства Mini-Circuits; через установку в каждом канале трёх таких компонентов достигнуто усиление 45 дБ.

#### Исследование характеристик

Частотные характеристики двух каналов радиометра, зафиксированные с помощью измерителя Р2-66 при частоте гетеродина 26,8 ГГц, представлены на рис. 3. Примечательно, что пик усиления нижнего канала, как и требовалось, находится вблизи частоты 22,235 ГГц (частота спектральной линии, через интенсивность которой оценивается содержание водяного пара в атмосфере). Небольшое отклонение максимума усиления от этой частоты, согласно некоторым исследованиям [10], более предпочтительно, чем точное совпадение (такой отстройкой может быть снижена зависимость получаемого значения влагосодержания от действующего атмосферного давления).

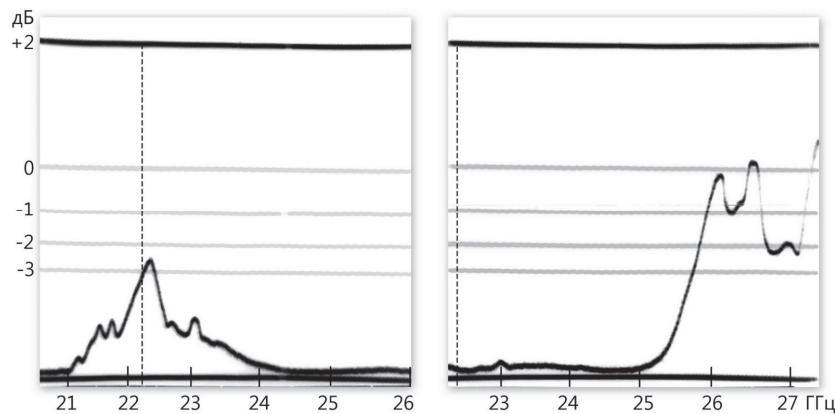


Рис. 3. Сопоставление характеристик усиления двух каналов радиометра

### Проверка работоспособности макета

Работоспособность собранного макета подтверждена практическим экспериментом. Собственное излучение атмосферы, принимаемое рупорной антенной и преобразуемое изготовленным радиометром, графически отображалось на экране компьютера как зависимость выходного напряжения от времени. Опыт проводился как в ясную, практически безоблачную погоду (рис. 4), так и при наличии облачности (рис. 5). Отмечено, что к присутствию облачной влаги более чувствителен канал 30 ГГц, что открывает перспективу использования предложенной схемы не только для оценки интегрального влагозапаса безоблачной атмосферы, но и для получения данных о влагозапасе облаков.

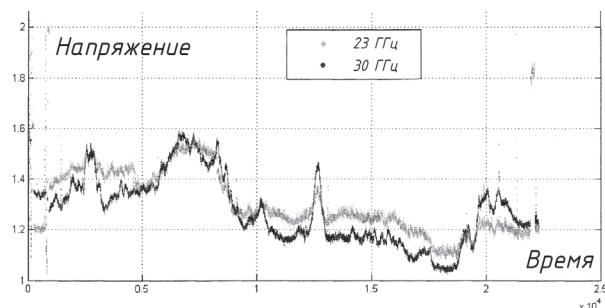


Рис. 4. Выходные напряжения каналов радиометра при безоблачной погоде

Рис. 5. Выходные напряжения каналов радиометра при облачной погоде

### Заключение

Проведённой работой подтверждена работоспособность двухканального радиометрического приёмника с одним гетеродином. Доказана возможность сокращения числа СВЧ узлов, массивность которых является основным препятствием для размещения радиометрических устройств на борту лёгких БПЛА. Выявлены технологические трудности, препятствующие тиражированию разработанной конструкции – прежде всего, исключительная сложность монтажа бескорпусного кристалла, заменой которому предполагается корпусная микросхема того же производителя, уступающая по характеристикам, но несопоставимо более удобная в применении. Ряд вопросов – таких как энергосбережение – требует дополнительного внимания в ближайшем будущем. В целом, анализ достигнутого мотивирует к продолжению работы по дальнейшему упрощению схемных, конструктивных и технологических решений радиометров, чему также способствует заметный в последние годы встречный прогресс малой беспилотной авиации.

**Список литературы**

1. Hogg D.C., Guiraud F.O., Snider J.B., Deckerand M.T., Westwater, E.R. A steerable dual-channel microwave radiometer for measurement of water vapor and liquid in the troposphere // J.Clim. Appl. Meteorol. – 1983. – 22. – P. 789–806.
2. Guiraud, F.O., Howard, J. and Hogg, D.C. A Dual-Channel Microwave Radiometer for Measurement of Precipitable Water Vapor and Liquid, in IEEE Transactions on Geoscience Electronics. – 1979. – Vol. 17. – No. 4. – P. 129–136.
3. Ulaby F.T. and Carver K.R. Passive Microwave Radiometry, in: R. N. Colwell (Ed.): Manual of Remote Sensing, 1, American Society of Photogrammetry, Falls Church, VA 22046, USA, 1983. – P. 475–516.
4. Рабинович Ю.И., Щукин Г.Г. Определение содержания водяного пара в атмосфере по измерению микроволнового излучения. Труды ГГО им. А.И. Войкова, вып. 222. – Л. 1968.
5. Fedor L.S., Jacobson M.D., Bedard, Jr. A.J., Westwater E.R., Hogg D.C., Nishiyama R.T. Dual-Channel Microwave Radiometer for Airborne Meteorological Applications. NOAA Technical Memorandum ERL WPL-157. Wave Propagation Laboratory, Boulder, Colorado, Dec. 1988.
6. Горелик А.Г., Ситников Н.М., Акмулин Д.В., Чекулаев И.И., Страшко О.В., Кузнецов И.Е. Перспективы исследования тонкой структуры пограничного слоя атмосферы с помощью специализированной аппаратуры, установленной на борту беспилотного летательного аппарата // Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» 28.05–30.05.2019 г. – Муром: Муромский институт ВлГУ, 2019.
7. Дроздов Д.В., Рыбаков Ю.В., Герасимов О.А. СВЧ радиометрический комплекс дистанционного зондирования интегральных характеристик влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков. Труды ГГО им. А.И. Войкова. – Вып. 580. – СПб., 2016.
8. Liljegren, J. C., Two-channel microwave radiometer for observations of total column precipitable water vapor and cloud liquid water path. Fifth Symposium on Global Change Studies Am. Meteorol. Soc. Nashville, Tenn. Jan. 23–28, 1994.
9. Westwater E.R. The accuracy of water vapour and cloud liquid determination by dual frequency ground-based microwave radiometry // Radio Science. – 1978. V. 13. – No 4. – P. 667–685.