

Разработка многодиапазонного СВЧ-радиометрического картирующего комплекса для БПЛА на базе тороидальной антенны

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

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова», 194021 Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д. 7, olgrs@mail.ru

В работе представлена блок-схема макета СВЧ-радиометра для картирования собственного излучения подстилающей поверхности. Приведены примеры исследований характеристик элементов макета СВЧ-радиометра для картирования собственного излучения подстилающей поверхности для БПЛА.

The paper describes microwave surface radiation mapping radiometer prototype functional diagram. A research into radiometer prototype elements examples are presented. This radiometer is designed as low-cost drone-based surface-mapping system.

Создание картирующих СВЧ-комплексов для мониторинга параметров подстилающей поверхности является весьма актуальной задачей, поскольку только радиояркая карта позволяет получить наглядную и эффективную информацию о состоянии исследуемых параметров. В [1] приведены примеры СВЧ-радиометрических карт, составленных в целях выявления заболоченных районов и анализа состояния гидротехнических сооружений. Эти карты, отображающие распределение излучения подстилающей поверхности в L-, C- и X-диапазонах, получены с помощью СВЧ-комплекса «Радиус» разработки НПО «Вега» [2]. Принцип электромеханического сканирования диаграммы направленности, успешно реализованный в комплексе «Радиус», однако, имеет оборотной стороной увеличение массогабаритных характеристик, в результате чего его установка возможна только на самолётах уровня не ниже Ан-2. Даже для средних БПЛА с полезной нагрузкой 19–30 кг («Бриз», «ZALA», «Indela»), он оказывается слишком тяжёлым и неудобным, особенно при внешней подвеске. В [3, 4] было предложено в качестве основы картирующего комплекса использовать серийные тороидальные антенны спутникового телевидения Т-90 и Т-55 [5]. Карта подстилающей поверхности получается за счёт формирования веера лучей, принимающих собственное излучение различных участков. Поскольку каждый луч должен иметь отдельный приёмный канал, приёмники должны быть максимально дешёвыми и доступными. В качестве таких приёмников могут быть использованы телевизионные конвертеры Ku-, C- и S-диапазонов. В настоящее время они выпускаются огромными сериями, что делает их стоимость весьма небольшой при очень высоком качестве.

Особенности установки картирующих СВЧ-радиометров на БПЛА

Рис. 1, а даёт представление о конструкции двухзеркальной тороидальной антенны, при этом введены следующие обозначения: 1 – рефлектор (главное зеркало), 2 – субрефлектор (вспомогательное, малое зеркало), 3 – фазовые центры облучателей. В вертикальном сечении антенна представляет собой двухзеркальную антенну Грегори. Для работы в режиме мониторинга подстилающей поверхности антенна ориентируется в надир.

На рис. 1, б, в показаны вертикальные сечения Т-90 и Т-55. Данные обмеров центральных сечений сопоставлены с расчётными профилями (в приведённом примере они практически совпали). Обозначены точки фокусов.

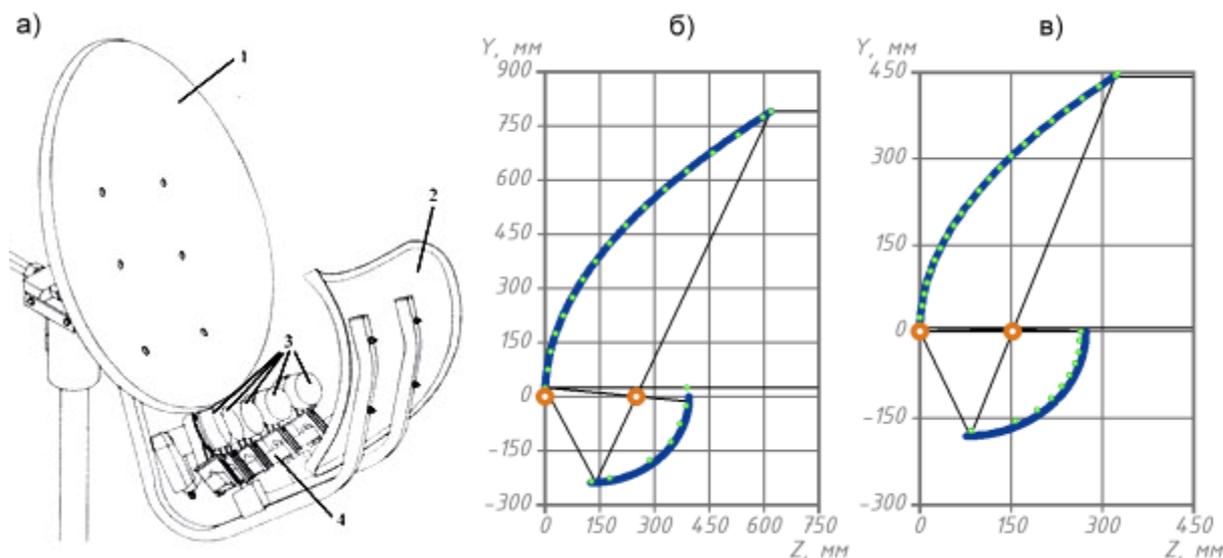


Рис. 1. Общий вид тороидальной антенны (а), вертикальное сечение профиля Т-90 (б) и Т-55 (в).

В таблице 1 приводятся массогабаритные характеристики двухзеркальных антенн и предполагаемые показатели проектируемых картирующих СВЧ-комплексов. Габариты и вес оценочные, предполагается размещение всех элементов в едином объёме для удобства подвески на различные БПЛА.

Таблица 1

| Модель | | Т-90 | Т-55 | Оценочные показатели на базе Т-90 | |
|-------------------------|------------|-------|------|-----------------------------------|-------------|
| Главное зеркало | Длина, см | 96,7 | 53,2 | Диапазон | Ku, C, S, L |
| | Ширина, см | 108,6 | 66,8 | Длина, см | 120 |
| Вспомогательное зеркало | Длина, см | 36,1 | 25,3 | Ширина, см | 110 |
| | Ширина, см | 83,6 | 49,7 | Высота, см | 100 |
| Вес, кг | | 14,1 | 6,7 | Общий вес | до 30 кг |

Облучатель, располагаемый на фокальной линии антенны, должен обеспечить засветку краёв эллиптического вспомогательного зеркала по уровню $-9...-12$ дБ при использовании стандартных облучателей диапазонов Ku и C. При расположении Ku-облучателей в стандартных держателях вплотную друг к другу вдоль фокальной линии можно разместить до 10 приёмных устройств на Т-55 и до 14 – на Т-90.

Нахождение фокальных линий составило отдельную задачу, поскольку производителем антенн эта информация не сообщается. Профили параболического и тороидального зеркал, определённые путём натурального обмера, наносились на графическую сетку, где совмещались с расчётными параболой и эллипсами, точки фокуса которых вычислялись по классическим формулам и наносились на тот же график. Геометрические построения выполнялись при помощи общедоступного графического редактора, имеющего в своём составе консоль и интерпретатор Python. Автоматизацию расчётов и мгновенное представление их результатов в удобном для анализа графическом виде обеспечил специально написанный программный модуль.

При установке тороидальной антенны в корпус, имеющий форму прямоугольного ящика, неизбежно остаются незаполненные пространства. Однако, эти пространства – в

частности, свободный объём под вспомогательным зеркалом – можно использовать для размещения приёмных устройства диапазонов S и L в качестве полезного дополнения (не имеющего отношения к тороидальной антенне). Эти устройства предполагается снабдить собственными печатными антеннами в виде решёток (либо в виде печатного волнового канала).

Блок-схема одноканальногокартирующего СВЧ-радиометра

На рис. 2 показана блок-схема картирующего СВЧ-радиометра для тороидальной антенны в Ku-диапазоне (10 лучей для T-55). Каждому каналу (лучу) соответствует антенна, малошумящий приёмный блок (LNB) и блок низкой частоты (БНЧ), в состав которого входят инжекторы питания, квадратичные детекторы, усилительные тракты. Далее следуют выходной АЦП с устройствами записи и обработки.

Аналогичный состав, но с другим количеством приёмных элементов, будет иметь блок-схема в C-диапазоне, а также в смешанномKu+C+S. Поскольку T-55 и T-90 разработаны применительно к Ku-диапазону, в C- и S-диапазонах можно использовать только приёмную часть, а антенные элементы необходимо разработать отдельно. Поэтому итоговое количество приёмных лучей будет зависеть от количества применяемых диапазонов и расположения облучателей.

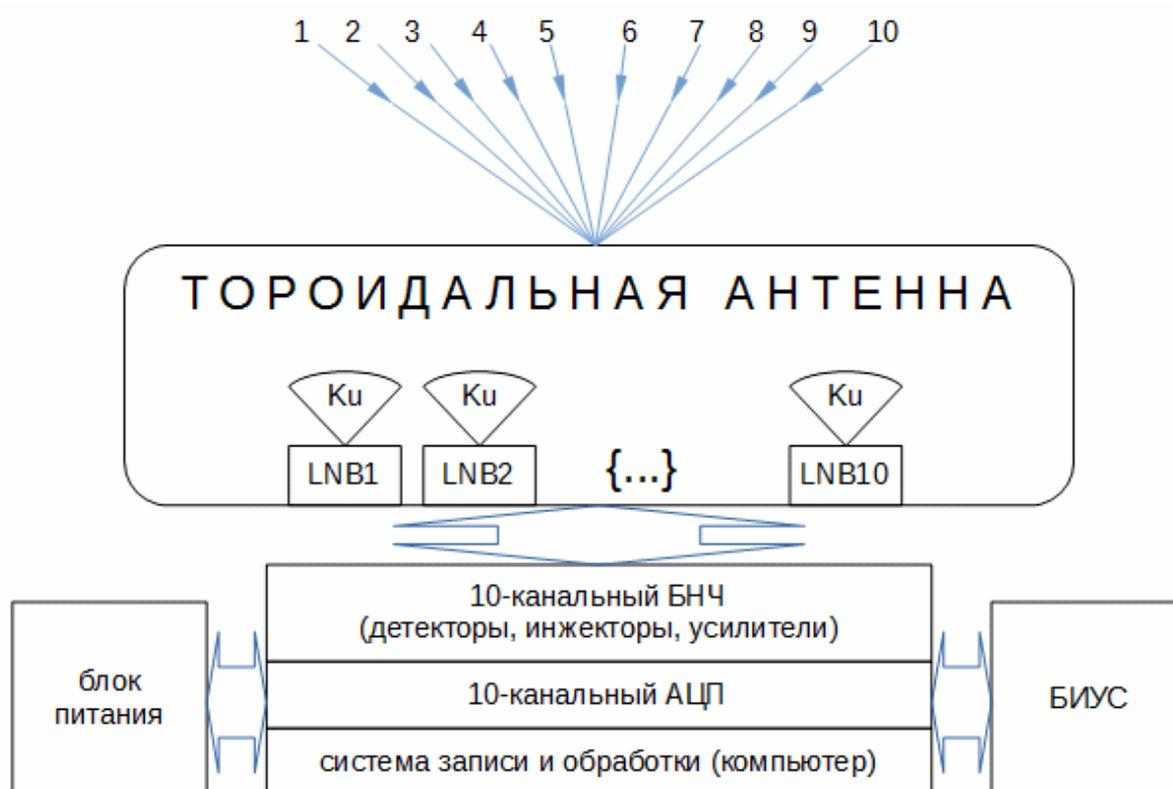


Рис. 2. Блок-схема картирующего СВЧ-радиометра.

Питание на LNB блоки подается через специальные элементы-инжекторы – либо от блока питания БПЛА, либо от дополнительного блока питания. Отдельные пиксели формируют через АЦП строчный файл. Кадровая развёртка формируется с учётом информации о положении носителя в пространстве, получаемой от бортовой информационно-управляющей системы (БИУС). В компьютере производится обработка сигналов и формируется собственно карта излучения подстилающей поверхности.

Реализация элементов (облучателей) разных диапазонов

Стандартные облучатели Ku-диапазона (10,7–12,75 ГГц) изготавливаются в виде единой конструкции, антенна совмещается с приёмником (Блок LNB). На (рис. 3, а) показан LNB Sharp BS1R8EL100A с антенной в виде гофрированного рупора, а на (рис. 3, б) несколько LNB Eurosky с антенной в виде диэлектрического конуса. Оба блока обеспечивают засветку краёв вспомогательного зеркала в Ku-диапазоне по стандартному уровню порядка -10 дБ или ниже. Очевидно, что блоки LNB с диэлектрическим облучателем, обладая меньшей шириной, допускают более тесное взаимное расположение, чем рупорные, что открывает дополнительную возможность наращивания числа приёмных Ku-каналов в однодиапазонном варианте.

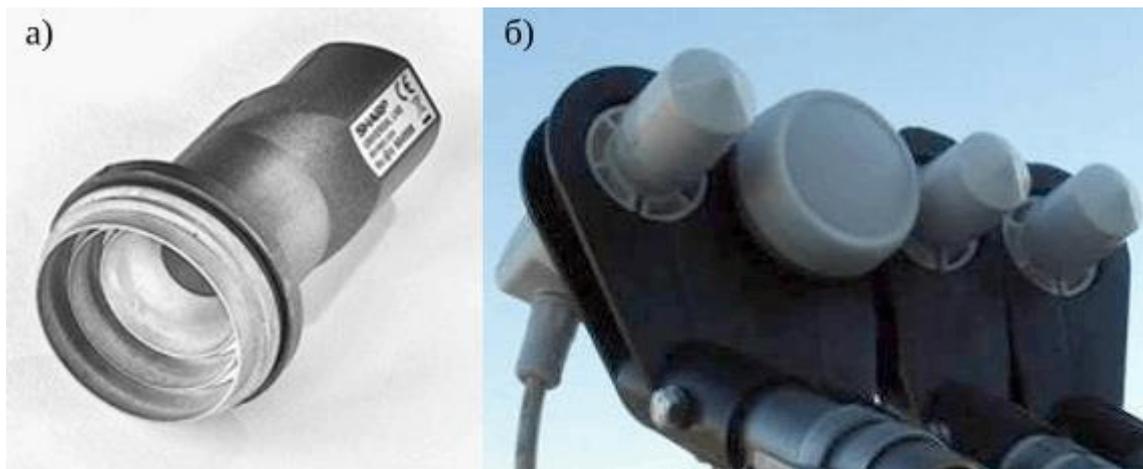


Рис. 3. Облучатель марки SHARP BS1 R8 EL 100A (а), сравнение плотности при установке EuroSkypro ENKF-7107a (б).

Антенная часть стандартного облучателя С-диапазона (3,4–4,2 ГГц), как правило, также изготавливается в виде гофрированного рупора, но отдельно от приёмного устройства, с которым сопрягается через волноводно-коаксиальные переходы (что негативно влияет на габариты и вес). Облучатель С-диапазона имеет апертуру 160 мм и предназначен для работы в диапазоне 3,4–4,2 ГГц. Ширина ДН по уровням -3 , -5 , -10 , -15 дБ в Е и Н плоскостях весьма близки между собой и очень хорошо совпадают с теоретическими значениями. Уровень облучения для угла $\varphi/2 = 32^\circ$ ($\Delta = 64^\circ$), соответствующий краю вспомогательного зеркала, составляет примерно -9 дБ (теоретическое значение $-9,3$ дБ) и совпадает с уровнем -9 дБ на $f = 10,7$ ГГц для стандартного облучателя Ku-диапазона.

Изначально антенны Т-90 и Т-55 проектировались только для работы в Ku-диапазоне. Отдельный или совмещённый облучатель С-канала предназначен для работы с другими офсетными антеннами. Поскольку такой облучатель имеет вес порядка 0,5 кг, и закрепить его в стандартной тороидальной антенне сложно, был рассмотрен вариант реализации облегчённого С-облучателя в виде печатной антенны из стеклотекстолита. Изготовленный облучатель имеет размеры апертуры 130 x 130 мм, толщину 5 мм и вес 125 г. Лицевая (антенная часть) часть (рис. 4, а) представляет собой решётку из пяти одинаковых квадратных излучателей. Обратная сторона (рис. 4, б) содержит делитель мощности между элементами (в данном случае неравномерный).

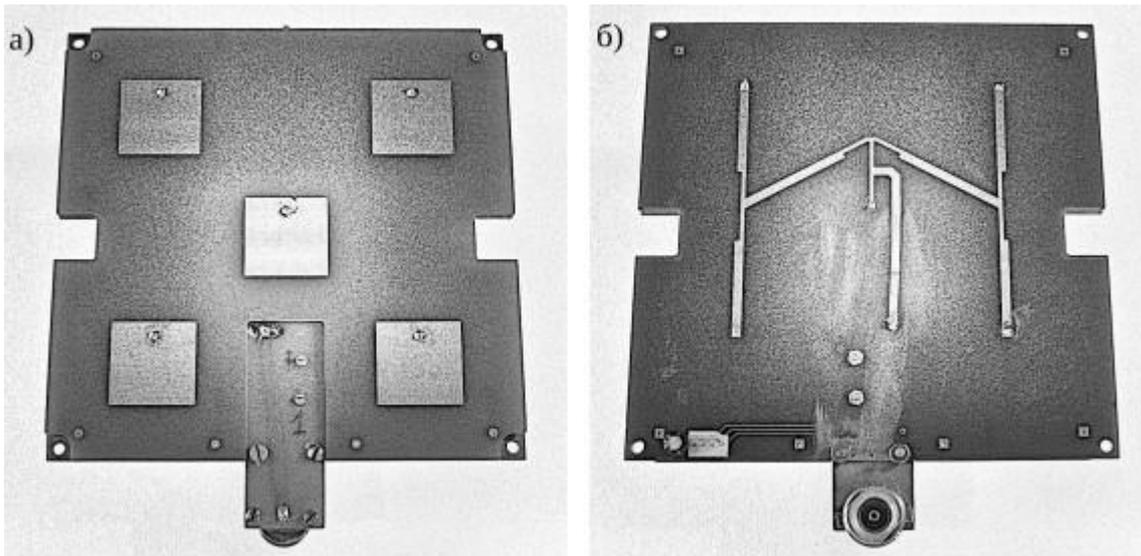


Рис. 4. Облучатель С-диапазона. Лицевая сторона (а) и делитель мощности (б).

Оптимальным для данного облучателя можно считать диапазон $f = 4,0 - 4,4$ ГГц, в котором уровень облучения края зеркала составляет меньше минус 15 дБ, что можно считать преимуществом по сравнению со «стандартным» облучателем. Печатный облучатель, однако, несколько менее эффективен по причине более высокого уровня боковых лепестков.

Прорабатывается вариант совмещённого облучателя С- и Ku-диапазонов. В основе его конструкции лежит 4-элементный печатный облучатель, сформированный из рассмотренного выше 5-элементного исключением центрального элемента. Подобная трансформация незначительно ухудшает диаграмму направленности, но обеспечивает ряд преимуществ. Схема деления мощности становится симметричной и равномерно возбуждаемой, а расчёт характеристик решётки существенно упрощается [6]. Освобождённое место в центральной области печатной платы позволяет встроить рупорный облучатель Ku-диапазона (рис. 5).

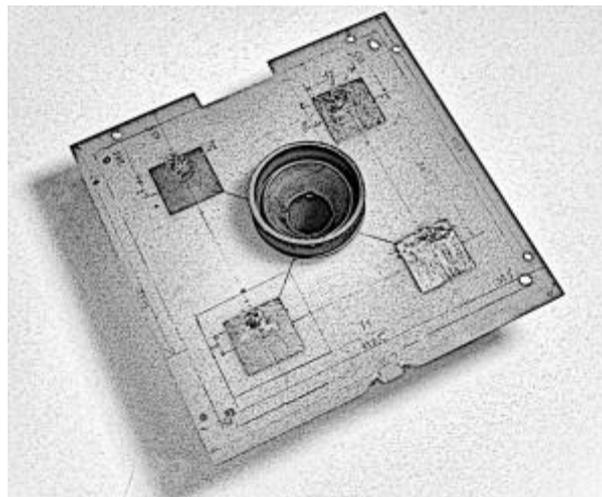


Рис. 5. Вариант исполнения печатного облучателя С-диапазона с четырьмя антенными элементами. В центре платы – рупорный облучатель Ku-диапазона.

Установка совмещённого облучателя С/Ku диапазонов на Т-90 позволит, кроме одновременного использования двух диапазонов, увеличить количество формируемых

лучей. Диаграммы направленности антенны с установленными на ней совмещёнными облучателями в настоящее время исследуются.

Предварительные лабораторные испытания элементов макета радиометра

Лабораторные испытания представляли собой измерение ДН макета СВЧ-радиометра в составе Т-55 или Т-90 и антенной части стандартных облучателей, перемещаемых вдоль фокальной линии. В однодиапазонном варианте в Ку- и С-диапазоне снимались диаграммы направленности всей антенны [2]. Диаграммы имеют чётко сформированный главный лепесток и пересекаются по уровню примерно минус 3 дБ. Хорошо сформированные ДН для облучателя в виде гофрированного рупора являются ориентиром для качества ДН с облучателями других типов, имеющими преимущество по весу и удобству установки.

В качестве примера на рисунках показаны ДН в Епл и Нпл на $f = 4,0$ ГГц для 5-ти элементного облучателя (рис. 6, а), для 4-х элементного облучателя до монтажа рупора (рис. 6, б), и, наконец, для 4-х элементного с рупором в центре платы (рис. 6, в).

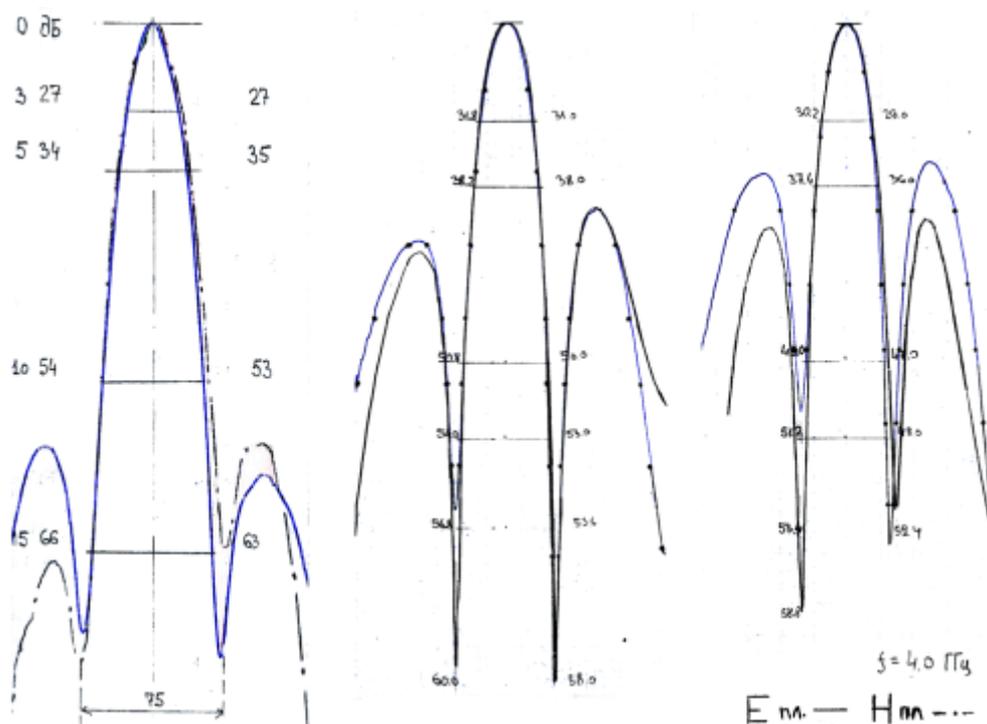


Рис. 6. Сравнение диаграммы направленности печатных излучателей: пятиэлементного (а), четырёхэлементного (б) и совмещённого с рупором (в).

Заметной особенностью полученных диаграмм является высокий уровень боковых лепестков (порядка $-7-8$ дБ), обусловленный выбором расстояния между элементами данной печатной части. Этот эффект отмечался ранее в [7]. При помещении в центре печатного облучателя металлического рупора Ку-диапазона ширина главного лепестка диаграммы меняется незначительно, но уровень боковых снова возрастает. Наблюдаемая зависимость совпадает с результатами [8].

Достигнутые результаты свидетельствуют о практической возможности снимать карты подстилающей поверхности как минимум в двух диапазонах одновременно, что укрепляет уверенность в перспективности применения антенн, предложенных в качестве основы радиометрического комплекса. Дальнейшую оптимизацию параметров радиочастотной части предполагается вести за счёт конструктивных усовершенствований – таких как, например, подбор расстояний между излучателями

или смена диэлектрического материала. Общий подход – построение сложной системы из относительно дешёвых узлов серийного и массового производства, без использования редких технологий и дорогостоящих материалов, с опорой при разработке на доступное программное и аппаратное обеспечение – предполагается сохранить.

Работа выполнена при частичном финансировании плана НИОКР Росгидромета.

Литература

1. A. Chukhlahtsev, A. Shutko. 30 Years of research into microwave radiometry.
2. Сидоров И.А. и др. СВЧ-радиометрические системы малой и сверхмалой авиации. Международная конференция «Радиолокационные системы малой и сверхмалой дальности», 2018.
3. Vorobiev V.V., Kirpanev N.A., Rybakov Y.V. Features of Application of Microwave Radiometric Remote Sensing Complex Made from UAV // Межд. симп. «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД-2017). Сб. тезисов. – СПб. – 2017.
4. Рыбаков Ю. В., Воронин В. А., Герасимов О. А., Дроздов Д. В. Применение тороидальной антенны Т-55 в СВЧ-комплексах картирования собственного излучения подстилающих поверхностей с борта БПЛА. Всероссийские открытые Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн/ Материалы Всероссийской открытой научной конференции. Муром: Изд. полиграфический центр МИ ВлГУ, 2019. ISSN2304-0297 (CD-ROM) с. 522-528
5. Калошин В.А. Зеркальная антенна. // RU2000117951 МПК7: HO1Q 19/19. 10.07.2000.
6. Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K. Microwave Remote Sensing. Active and Passive // Vol.1. – Fundamentals and Radiometry. – 1 st.ed. – Artech House: Norwood, MA, USA. – 1981. – P. 456.
7. Князев С.Т. Микрополосковая антенна для многоканального радиометра / Князев С.Т., Нефедов Е.И., Панченко Б.А. // Изв. ВУЗов МВ и ССО СССР. – Радиоэлектроника. –1984. –Т.27. – № 2. – С. 86-87.
8. Болсунов И.А., Стериополо Е.А. О совмещении рупора и вибраторов в облучателе многодиапазонной зеркальной антенны // Сб. Антенны. Изд-во: Связь. – Вып.21. – 1975. – С. 81-85.