

УДК 681.7.069

СВЧ-РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Плющев В. А., к.т.н., доцент, e-mail: mail@vega.su

Сидоров И. А., к.т.н., доцент, e-mail: igor__sidorov@mail.ru

Концерн «Вега», МГТУ МИРЭА, Москва, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы состояния и перспективы разработки СВЧ-радиометрических систем с синтезированной апертурой антенны L-диапазона. Приводятся примеры известных в мире радиометрических систем с синтезированной апертурой. Анализируется возможность применения таких систем в различных системах гражданского назначения, системах гидрологической, ледовой разведок, предупреждения чрезвычайных ситуаций и оценки масштабов стихийных бедствий. Оценивается возможность разработки систем с синтезированной апертурой антенны L-диапазона на современной элементной базе.

Ключевые слова: СВЧ-радиометрическая система; синтезированная апертура; программируемая логика; дистанционное зондирование

MICROWAVE RADIOMETRIC SYSTEMS WITH SYNTHETIC APERTURE

Plushev V.A., PhD., docent, e-mail: mail@vega.su

Sidorov I. A., PhD., docent, e-mail: igor__sidorov@mail.ru

Corporation "Vega", MSTU MIREA, Moscow, Russia

Abstract. The current state and the possibility of synthetic aperture microwave radiometric L-band system design is regarding. Well known synthetic aperture microwave radiometric systems is describing. The possibility of use such systems in civil equipment, hydrological and ice monitoring systems, the catastrophe risk assessment is analyzing. The possibility of synthetic aperture microwave radiometric L-band system design using current chip set is astimating.

Keywords: Microwave radiometric system; synthetic aperture; programming logic; remote sensing.

Обзор перспектив использования СВЧ-радиометров.

В связи с глобальным изменением климата и увеличением количества техногенных катастроф, в частности, аварий защитных гидрологических сооружений, существенно возросла потребность в постоянном мониторинге и своевременном выявлении мест протечек и потенциальных аварий в земляных дамбах, железнодорожных насыпях и других аналогичных искусственных объектах. Игнорирование проведения мониторинговых мероприятий может привести к катастрофическим последствиям (рис. 1).



Рис. 1 *Последствия прорыва дамбы*

Существующие традиционные способы мониторинга гидрологических сооружений, в частности, отбор проб грунта с различной глубины с последующим высушиванием для определения профиля влажности почвогрунтов – чрезвычайно медленный и дорогостоящий процесс.

В настоящее время находится в стадии внедрения в коммерческую эксплуатацию перспективный способ измерения влажности почвогрунтов, основанный на использовании СВЧ-радиометрических датчиков различных диапазонов длин волн.

Цель настоящей статьи – показать примеры разработанных в мире СВЧ-радиометрических систем с синтезированной апертурой и оценить возможность разработки таких систем на основе существующей элементной базы и ранее разработанных модулей.

СВЧ-радиометрия (СВЧ-РМ) или пассивное дистанционное зондирование основано на измерении собственного электромагнитного излучения объектов природной среды в диапазоне от миллиметровых до дециметровых волн. СВЧ-излучение почвогрунтов определяется главным образом объёмным содержанием свободной влаги, зависящим от естественного (дождь, снеготаяние) и искусственного (полив) увлажнения, а также от глубины залегания грунтовых вод, плотностью, температурой почвы, солёностью почвенного раствора, параметрами растительного покрова (прежде всего биомассой).

Мерой интенсивности излучения в СВЧ-диапазоне является яркостная температура «Т_в», которая представляет собой произведение коэффициента излучения « ϵ » и физической температуры «Т_е» с учетом реликтовой температуры небесной сферы «Т_н»

в пределах эффективно излучающего слоя (1). Коэффициент излучения является функцией диэлектрической проницаемости среды.

$$T_b = \epsilon \times T_e + (1 - \epsilon) \times T_n \quad (1)$$

На рисунке 2 представлена зависимость яркостной температуры и диэлектрической проницаемости почвы от влажности.

Видно, что максимальную яркостную температуру имеет сухая почва. Чем больше влажность, тем яркостная температура меньше. Также приведены яркостные температуры открытой воды и металлов.

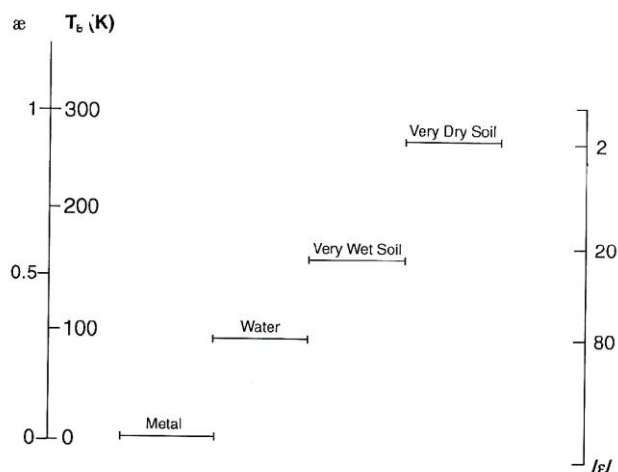


Рис. 2 Излучательная способность “ ϵ ”, яркостная температура “ T_b ” и диэлектрическая проницаемость “ ϵ ” металла, водной и земной поверхности (По данным проф. А.М. Шутко – ИРЭ РАН)

Способ определения влажности почвогрунтов при помощи СВЧ-радиометрического зондирования основан на следующем принципе. Диэлектрическая проницаемость воды ($\epsilon=81$) существенно больше диэлектрической проницаемости сухой почвы ($\epsilon=2...12$). Диэлектрическая проницаемость влажной почвы зависит от её влажности, а излучательная способность почвы зависит от её диэлектрической проницаемости. Следовательно, измеряя излучательную способность почвы, можно пересчитать её во влажность почвы [1,2].

СВЧ-радиометр – прибор для измерения радиояркостных температур.

Обзор известных СВЧ-радиометрических систем.

СВЧ-радиометр может размещаться на наземных, авиационных или космических носителях. Для получения высокого разрешения требуется применение антенн с большими пространственными размерами, что затрудняет их применение на космических носителях. Размещая радиометры на наземных мобильных платформах, не всегда удаётся исследовать заданные области, особенно в местах с труднопроходимым рельефом. Поэтому предпочтительно использование авиационных носителей. Применение

традиционных авиационных носителей пилотируемых аппаратов возможно, но дорого, так как требуются расходы на горючее, поддержание исправности самолета, оплату работы пилотов, диспетчеров аэродромных служб и т. д. Существенно дешевле использовать в качестве носителя беспилотный летательный аппарат (БЛА). Но для применения СВЧ-радиометра на БЛА необходимо разработать такой СВЧ-радиометр, который обладал бы массогабаритными характеристиками, дающими возможность разместить его на БЛА. Такой СВЧ-радиометр, массой 7 кг был разработан в ОАО «Концерн «Вега».

Создание СВЧ-радиометра, способного работать на борту БЛА – сложная техническая задача. Для её успешного решения был разработан СВЧ-радиометр с двухпортовой модуляцией, лицевая панель которого изображена на рисунке 3.



Рис. 3 Лицевая панель СВЧ-радиометра

Радиометр состоит из аккумулятора, детектора, усилителя НЧ, MMC карты, сумматора, фильтра ВЧ, усилителя ВЧ, GPS приёмника, контроллера MMC, GPS антенны и 4-х сенсоров (рис. 4).

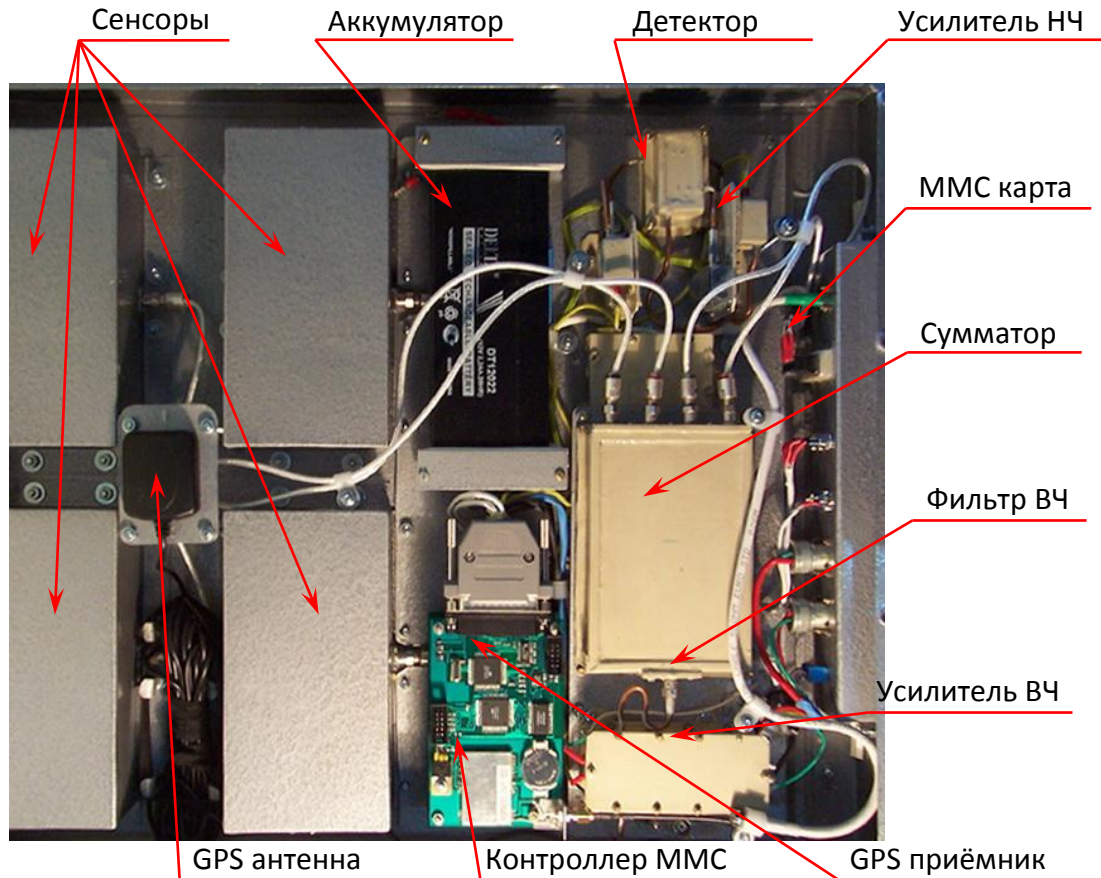


Рис. 4 Конструкция СВЧ-радиометра

Сигнал с антенн подается на сумматор, далее на фильтр ВЧ. Затем происходит усиление и детектирование сигнала. Для привязки к местности используется GPS навигатор, информация с которого записывается на Multy Media Card (MMC карту) (рис. 5).

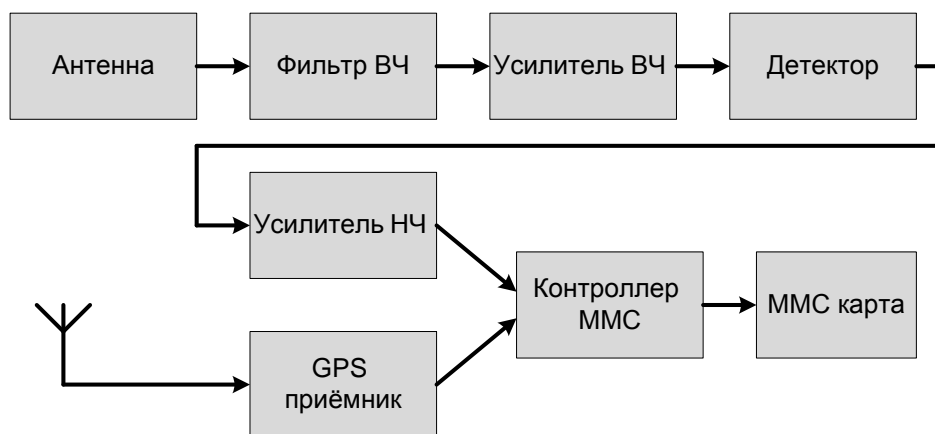


Рис. 5 Блок-схема СВЧ-радиометра

Использование прототипа подобного СВЧ-радиометра проводилось совместно с Алабамским университетом сельского хозяйства и механики (AAMU, США) в 2005 году (рис. 6).



Рис. 6 Беспилотный вертолет MACS с 6-см СВЧ-радиометром на борту

В ходе лётных экспериментов были получены данные и построены карты влаго-содержания. На рисунке 7 представлен пример карты влагосодержания почвогрунтов [3,4].

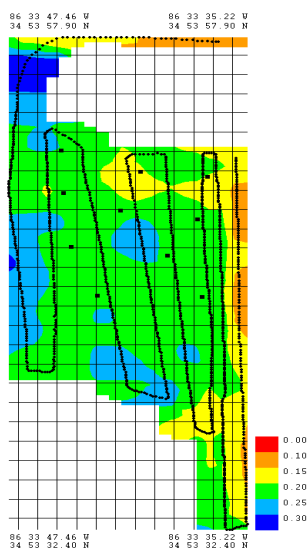


Рис. 7 Пример карты влажности
(По данным проф. Шутко А.М и Новичихина Е.П. – ИРЭ РАН)

Представленный трассовый СВЧ-радиометр имеет существенный недостаток – пространственная разрешающая способность его определяется шириной главного лепестка диаграммы направленности антенны и высотой полёта носителя, что существенно

ограничивает возможность применения данной аппаратуры для решения ряда специальных задач, в том числе военного назначения.

Решение проблемы повышения разрешающей способности СВЧ-радиометрических систем видится в разработке таких систем с синтезированной апертурой антенны. В качестве прототипов могут быть представлены СВЧ-радиометры L-диапазона «СТАР-Лайт» производства США (рис. 8) и «МИРАС», запущенный Европейским космическим агентством 2 ноября 2009г. (рис.9).

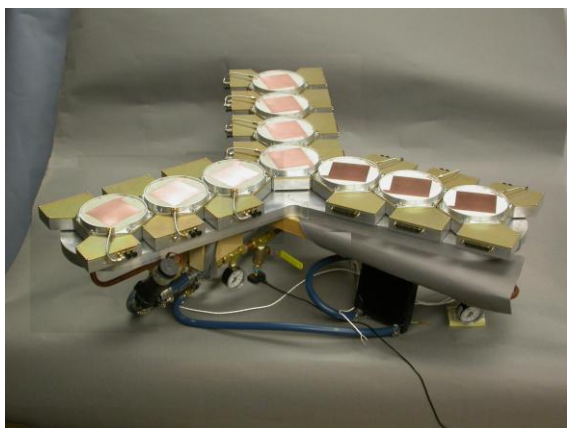


Рис. 8 СВЧ-радиометр (длина волны 21 см) с синтезированной апертурой для легкомоторного самолета, автомобиля или вышки „СТАР-Лайт” (США)



Рис. 9 Система MIRAS разработки Европейского космического агентства

Физические принципы построения СВЧ-радиометрических систем с синтезированной апертурой были разработаны радиоастрономами в середине прошлого века. Для авиационных носителей в трудах С.Т.Егорова и В.А.Плющева, однако, физическая ре-

лизация принципов пассивного синтеза апертуры не представлялась тогда возможной из-за отсутствия элементной базы, способной эти принципы реализовать.

Для реализации принципов пассивного синтеза апертуры необходимо разработать:

1. Специальный малошумящий широкополосный приёмник СВЧ-сигнала, способный выдавать на выход сигнал, содержащий как амплитудную, так и фазовую информацию от принимаемой электромагнитной волны.
2. Регистратор, способный работать на борту летательного аппарата и запоминать информацию от квадратурных каналов приёмника с темпом не менее 40 Мбайт в секунду за время не менее 40 минут.
3. Антенную систему, состоящую из нескольких элементарных приёмных антенн, разнесённых в пространстве.
4. Программное обеспечение для синтезирования апертуры и построения карт яркостных температур.

В настоящее время уже доступна элементная база, способная решить поставленные задачи. Кроме того, был создан приёмник диапазона 23 см, который может быть использован в качестве приёмника СВЧ-радиометра при небольшой перестройке на длину волны 21 см, что необходимо в соответствии с требованиями п.1 указанных выше принципов.

Также был создан регистратор информации, который после минимальной доработки будет удовлетворять требованиям по скорости и времени (объёму) записи информации.

СВЧ-радиометрическая система с синтезированной апертурой строится из отдельных элементарных радиометров с общим гетеродином и системой синхронизации. Обычно элементарные радиометры располагаются вдоль трёх лучей, выходящих из одной точки под углом 120 градусов друг относительно друга (схема У см. рис. 8 и 9). Такая схема оптимальна по количеству элементарных СВЧ-радиометров для синтезирования двумерной апертуры. Однако, для размещения на самолёте такая схема менее удобна, чем схема в виде креста, когда элементарные СВЧ-радиометры располагаются вдоль четырёх лучей, выходящих из одной точки под углом 90 градусов друг относительно друга.

Блок-схема элементарного СВЧ-радиометра представлена на рисунке 10 и состоит из следующих элементов: А – антенна, М – модулятор, С – смеситель, Ф – фильтр, МШУ – малошумящий усилитель, УПЧ – усилитель промежуточной частоты, КДФ – квадратурно-фазовый детектор, АЦП – аналого-цифровой

преобразователь, ССF – контроллер CF-карты, CF – CF-карта, ГЭ и ХЭ – «горячая» и «холодная» эталонные нагрузки, ТДХ и ТДГ – термодатчики «горячей» и «холодной» эталонных нагрузок, БУ – блок управления.

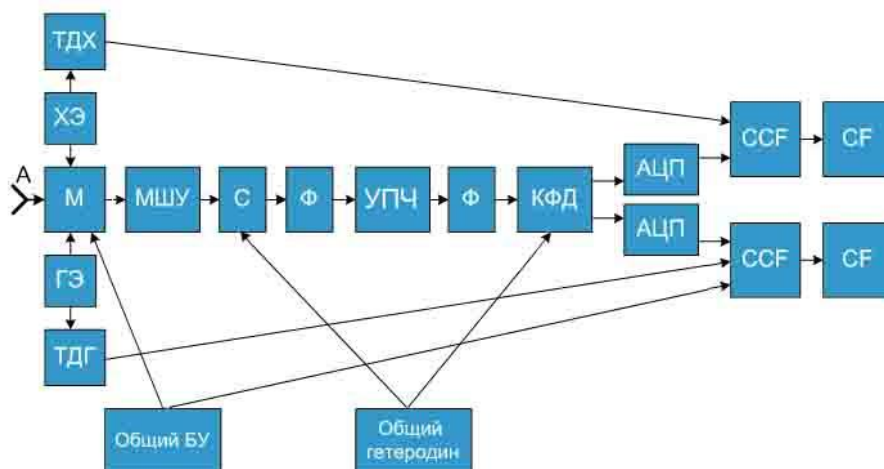


Рис. 10. Блок-схема элементарного СВЧ-радиометра

Таким образом, для создания СВЧ-радиометрической системы с синтезированной апертурой антенны достаточно скомпоновать систему из ранее разработанных блоков и разработать соответствующее программное обеспечение.

Список литературы:

1. Шутко А.М., Новичихин Е.П., Сидоров И.А., Плющев В.А. и др. Мониторинг водоопасных ситуаций в Украинском Причерноморье: проблемы, организация, эффективность // Институт проблем рынка и экономико-экологических исследований НАН Украины, Одесса, 1998г. с.-19. ISBN 966-95293-3-6.
2. Башаринов А. Е., Шутко А. М. Измерение влажности земных покровов методами СВЧ радиометрии // Метрология и гидрология.-1971- №9-с.17
3. Сидоров И.А., Белоусов О.Б., Шутко А.М., Смольянинов С.И., Хаарбринк Р. (Нидерланды). Сканирующая радиометрическая система для сбора и обработки информации о состоянии гидрологических сооружений // 56-я Научно-техническая конференция, посвященная 60-летию МИРЭА. Сборник трудов. – М.: МИРЭА, 14-24 мая 2007 года.
4. Сидоров И.А., Белоусов О.Б., Шутко А. М., Новичихин Е. П., Горбачев Д. А., Арчер Ф. (США). Радиометрическая система для сбора и обработки информации о влажности почвогрунтов с борта беспилотного летательного аппарата // 56-я Научно-техническая конференция, посвященная 60-летию МИРЭА. Сборник трудов. – М.: МИРЭА, 14-24 мая 2007 года.