

Микроволновая радиометрия высокого разрешения

М.В. Данилычев, Д.М. Ермаков, Б.Г. Кутуза, В.П. Саворский

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, 125009, Россия, Москва, ул. Моховая, 11/7, e-mail: dan496@yandex.ru, dima@ire.rssi.ru, bkutuza@cplire.ru, savor@inbox.ru

Рассмотрены основные ограничения, характерные для существующих аппаратных схем, реализующих различные базовые пространственно-временные способы сбора и обработки радиометрической информации в СВЧ-диапазоне. На ряде примеров показана необходимость разработки и полноценного освоения технологии микроволнового радиометрического зондирования с повышенным пространственным разрешением.

The main limitations of existing hardware circuits that implement different underlying spatial and temporal methods of collecting and processing of microwave radiometric information are discussed. Several examples show the necessity of the development and the full development of the technology of microwave radiometric sensing with high spatial resolution.

Однолучевые радиометрические системы (РМС) с пространственным сканированием главного лепестка диаграммы направленности антенны (ДНА) являются основным типом современных спутниковых радиометров [1-4]. Стремление к достижению максимально возможной чувствительности в элементе пространственного разрешения привело к использованию малозумящих апертурных антенн и механического способа сканирования как основного варианта рабочей конструкции [1-5,21]. Получение радиометрической информации о сканируемом пространстве осуществляется методом последовательного опроса строк, возникающих при поступательном движении спутника в сочетании с периодическим движением довольно узкого, обычно от 0.5° до 5° по уровню половинной мощности (3dB), луча главного лепестка ДНА относительно самого спутника. Различные воплощения данной схемы на практике отличаются малыми показателями по массе, габаритам и энергопотреблению, а также исключительно высокой надежностью при довольно невысокой стоимости и большой полосе обзора (до 2600 км при высоте полета $\sim 830-850$ км). Важнейшим свойством, с точки зрения специалистов и конечных пользователей данных дистанционного зондирования, является возможность одновременного использования большого числа каналов на разных частотах и поляризациях в миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн. Приборная радиометрическая чувствительность “поверхностных” ($\lambda \geq 3$ см) каналов для современных однолучевых РМС оценивается величиной $\sim 0.03-0.06$ К, что позволяет достигнуть при сканировании чувствительности в пространственном элементе (20-100км) порядка 0.3-0.7К. Для “атмосферных” каналов ($\lambda \leq 1.6$ см), с учетом специфики узкополосного атмосферного профилирования, разброс увеличивается: $\sim 0.05-0.3$ К для радиометрической (приборной) чувствительности и $\sim 0.5-3.0$ К для чувствительности в элементе пространственного разрешения ($\sim 5-50$ км). В миллиметровом и сантиметровом диапазонах радиоволн данная радиометрическая технология позволяет вполне удовлетворительно разрешать значительное число существующих задач [1-5]. Конструкторам удается, путем соответствующей оптимизации, достигнуть разумного компромисса в сочетании значений пространственного и температурного разрешения и одновременно обеспечить широкую полосу обзора. На данный момент уже имеется опыт реализации этой схемы и в значительно более длинноволновом - дециметровом диапазоне. В конце января 2015

года на орбиту был выведен и некоторое время успешно работал комплекс SMAP (Soil Moisture Active and Passive), в котором радиометр и радиолокатор работают на близких (1.41 и 1.26 ГГц) частотах в L-диапазоне и имеют при этом общее АФУ с диаметром рефлектора ~6м, [4]. В целом, разнообразие конкретных конструкторских воплощений для данной схемы достаточно велико. Вместе с тем она имеет слишком малый ресурс для развития и близка к достижению естественных ограничений по пространственному и радиометрическому разрешению. Основным направлением развития для нее является борьба за улучшение показателей приборной радиометрической чувствительности. Камнем преткновения, или, образно говоря, генетическим дефектом данной технологии следующий момент: скорость сканирования луча по поверхности во много (в 450 и более!) раз превышает скорость движения следа (проекции) спутника на поверхности (~6.5км/с). Поэтому возможность накопления сигнала от элемента пространственного разрешения ограничена достаточно жестко, что, в свою очередь, кладет предел попыткам достижения высокой радиометрической чувствительности (в элементе пространственного разрешения) при еще допустимых, удовлетворяющих Заказчика, показателях пространственного разрешения. Как попытку преодолеть эти ограничения и следует рассматривать эксперименты с многолучевыми системами: РМС панорамного типа [1,2,6-10], РМС апертурного синтеза [1,2,10-13] и многолучевыми РМС иных типов.

Для многолучевых РМС панорамного типа характерно использование многолучевых антенн с фиксированным распределением ДНА в пространстве, при этом, в отличие от РМС апертурного синтеза, поля зрения отдельных лучей разнесены в пространстве и, в совокупности, формируют поле зрения всей системы [1,2]. Пробразом современных РМС данного типа являются ранние варианты панорамных РМС, которые изначально представляли собой набор из N одинаковых или почти одинаковых трассовых радиометров с индивидуальными АФУ [6]. Дальнейшим развитием такого подхода стала схема с общим антенным узлом - многолучевой антенной. Максимальной чувствительности в луче можно достичь при условии обслуживания каждого луча отдельным постоянно подключенным радиометрическим модулем. Относительно небольшой, но уже существующий опыт применения подобных систем показал [2,7,8], что апертурные многолучевые антенны по уровню шумов значительно превосходят антенные решетки и, следовательно, имеют существенно лучшие показатели по радиометрической чувствительности в элементе пространственного разрешения (порядка 0.03-0.1К). В работах [9,10] были показаны возможность и целесообразность совместного использования РМС панорамного типа с набором каналов различной поляризации на 1-2 рабочих частотах и многочастотных (однолучевых) РМС традиционного типа для решения ряда задач дистанционного зондирования покровов и атмосферы Земли, требующих повышенного радиометрического разрешения. В качестве примера была рассмотрена задача измерения параметров поверхности океана и обсуждался вариант применения многолучевых РМС панорамного типа в сантиметровом диапазоне радиоволн [10].

Желание существенно улучшить показатели пространственного разрешения ведет к существенному усложнению и удорожанию конструкции бортовой РМС. Одним из возможных направлений такого развития является технология апертурного синтеза [1,2,10-13]. Она основана на использовании набора антенн с практически совпадающим полем зрения и нелинейной обработкой сигнала. К ним обычно относят приемные антенные решетки, у которых выходной сигнал является попарным произведением (или корреляционной функцией) сигналов от отдельных элементов решетки. Такой подход целесообразно использовать при достаточно сильных сигналах от некогерентных источников, а также тогда, когда есть возможность производить накопление сигнала во

времени. Поэтому ранее РМС с нелинейной обработкой нашли широкое применение, например, в радиоастрономии [11]. Однако, при использовании описываемой технологии в спутниковой и авиационной радиометрии обнаружилось также и наличие собственной, по сравнению с радиоастрономическим случаем, довольно значительной специфики [1,12]. Существенное ухудшение, по сравнению с теоретически ожидаемой, температурной чувствительности в элементе пространственного разрешения стало основным разочарованием для уже реализованных на практике проектов. По этому показателю, единственная из уже работающих на орбите, РМС апертурного синтеза SMOS заметно уступают другим действующим РМС дециметрового L-диапазона ($\lambda \sim 21.3$ см), построенным по иным конструктивным схемам [1,2]. В то же время выполненные в работах [13,17] оценки позволяют надеяться на то, что в диапазоне длин волн 0.2-2.25 см все-таки можно построить спутниковый РМС апертурного синтеза с полосой частот ~ 100 МГц, разрешением в единицы километров и чувствительностью в элементе разрешения не хуже 1К. Возможным представляется также рассмотрение иных типов многолучевых РМС с повышенным пространственным разрешением. Стоимость их разработки определяется выбором диапазона (-ов), числа лучей и их пространственной конфигурации, набором и схемой работы радиометрических модулей, сложностью АФУ и РМС в целом. Несмотря на относительно малый опыт конструирования и эксплуатации такого рода РМС, уже можно утверждать, что полноценное освоение любого из направлений данной технологии потребует значительных финансовых, временных и трудозатрат.

Возникает закономерный вопрос – насколько значимы те задачи, ради решения которых необходимо развивать данные технологии? Имеется ли экономическое, научное и/или какое-то иное оправдание требуемых усилий? По мнению авторов такого рода задачи, безусловно, существуют и польза (в самом широком смысле!) от их успешного разрешения должна перевесить все предполагаемые затраты.

В нижеследующих примерах авторы, по контрасту с работой [9], приводят примеры задач, относящихся к дистанционному зондированию атмосферы и суши [5], которые требуют для их решения повышенного пространственного разрешения, но одновременно характеризуются и значительными радиояркими контрастами - перепады яркостной температуры могут измеряться десятками и более градусов Кельвина. Одним из “атмосферных” примеров можно считать ситуацию с т.н. мезомасштабными явлениями. В дистанционном зондировании атмосферы значительное внимание уделяется исследованиям мезомасштабных явлений (мезомасштабные вихри, полярные циклоны, тропические депрессии), с характерными горизонтальными размерами от 10 до 1000 км. Часто эти явления носят характер атмосферных катастроф, формируют экстремальные погодные условия [5,14-16]. При этом их быстрая эволюция и сравнительно малые размеры их важных структурных составляющих во многих случаях не позволяют детально фиксировать и исследовать стадии их развития в сети метеорологических наблюдений [14-16,18-24]. Разумеется, качественную информацию о зарождении и эволюции мезомасштабных процессов можно получать с помощью спутниковых наблюдений в видимом и ИК диапазонах [23] спектра (см., например, рис.1). Однако облачность и условия освещенности серьезным образом ограничивают их возможности, а, следовательно, именно микроволновые радиометрические измерения являются основным и незаменимым средством получения количественной информации о параметрах атмосферы и океана. Это особенно важно при оценке интенсивности полей осадков и скорости ветра в районах развития экстремальных мезомасштабных явлений. Исходя из размеров такого рода явлений, следует последовательно стремиться к достижению спутниковыми микроволновыми РМС пространственного разрешения не хуже единиц километров, что, при пассивном

СВЧ- радиометрическом зондировании, представляет на сегодня сложную техническую проблему. С этой точки зрения актуальность исследования возможностей технологий повышенного пространственного разрешения, в том числе и технологии апертурного синтеза, представляется неоспоримой [1,2,10].

В качестве конкретной и, безусловно, крайне важной во всех смыслах, будем рассматривать задачу изучения тропических циклонов (ТЦ) с помощью спутниковых радиотепловых измерений. Одним из предвестников и диагностических признаков быстрой эволюции ТЦ (см.рис.1) считают деформацию (изменение линейных размеров и параметров симметрии) стены его глаза [18-20]. При этом, хотя радиояркие контрасты между теплым ядром и стеной ТЦ могут достигать многих десятков Кельвинов, линейные размеры ядра, как правило, не превышают нескольких десятков км и могут существенно уменьшаться при быстрой интенсификации ТЦ.



Рис.1. Изображение в видимом диапазоне тропического урагана Katrina над Мексиканским заливом 28.08.2005 в стадии начала перехода на континентальную сушу (снимок с борта ИСЗ Terra, [23]).

Вследствие быстрого и интенсивного хода процессов эволюции, дистанционный мониторинг формы внутренней части стены ТЦ возможен только при достаточно высоком пространственно-временном разрешении спутниковых измерений. Проиллюстрируем это обстоятельство примерами наблюдений ТЦ Katrina (2005г., рис.1.) с помощью многоканального СВЧ-радиометра SSM/I [2,21], установленного на спутнике F13 серии DMSP. На рис.2а показан фрагмент поля радиоярких температур горизонтально поляризованного излучения, измеренного над Мексиканским заливом на частоте 85 ГГц. Измерения в высокочастотных каналах, обладающие наилучшим пространственным разрешением, наиболее перспективны при спутниковом мониторинге морфологических особенностей ядра и стены глаза ТЦ. Измерения выполнены 27 августа 2005 г. около 22:00 UTC. По краям показанного фрагмента даны географические координаты в градусах. Фрагмент построен на регулярной географической сетке с шагом 0.1°. ТЦ Katrina виден в правой части

полосы сканирования (выделен квадратной рамкой). На момент радиотепловых измерений давление в центре ТЦ составляло 945 гПа, а максимальная скорость ветра в стене глаза была равна 51 м/с [21], что свидетельствовало о достижении циклоном стадии урагана третьей категории по шкале Саффира-Симпсона. На рис.2б обведенный в рамку фрагмент дан в четырехкратном увеличении. Хорошо видна область теплового ядра ТЦ, окружающая его стена и спиральная структура ТЦ в целом. При этом, наблюдаемые вблизи центра ТЦ радиояркостные контрасты существенно выше, чем на периферии. Цветовая шкала температур (единая для рис.2а и 2б) приведена на рис.2в. вместе с гистограммой радиояркостных температур фрагмента, изображенного на рис.2б. Видно, что значения меняются в широком диапазоне примерно от 180 до 290 К, хотя в основном находятся внутри интервала 255–275 К.

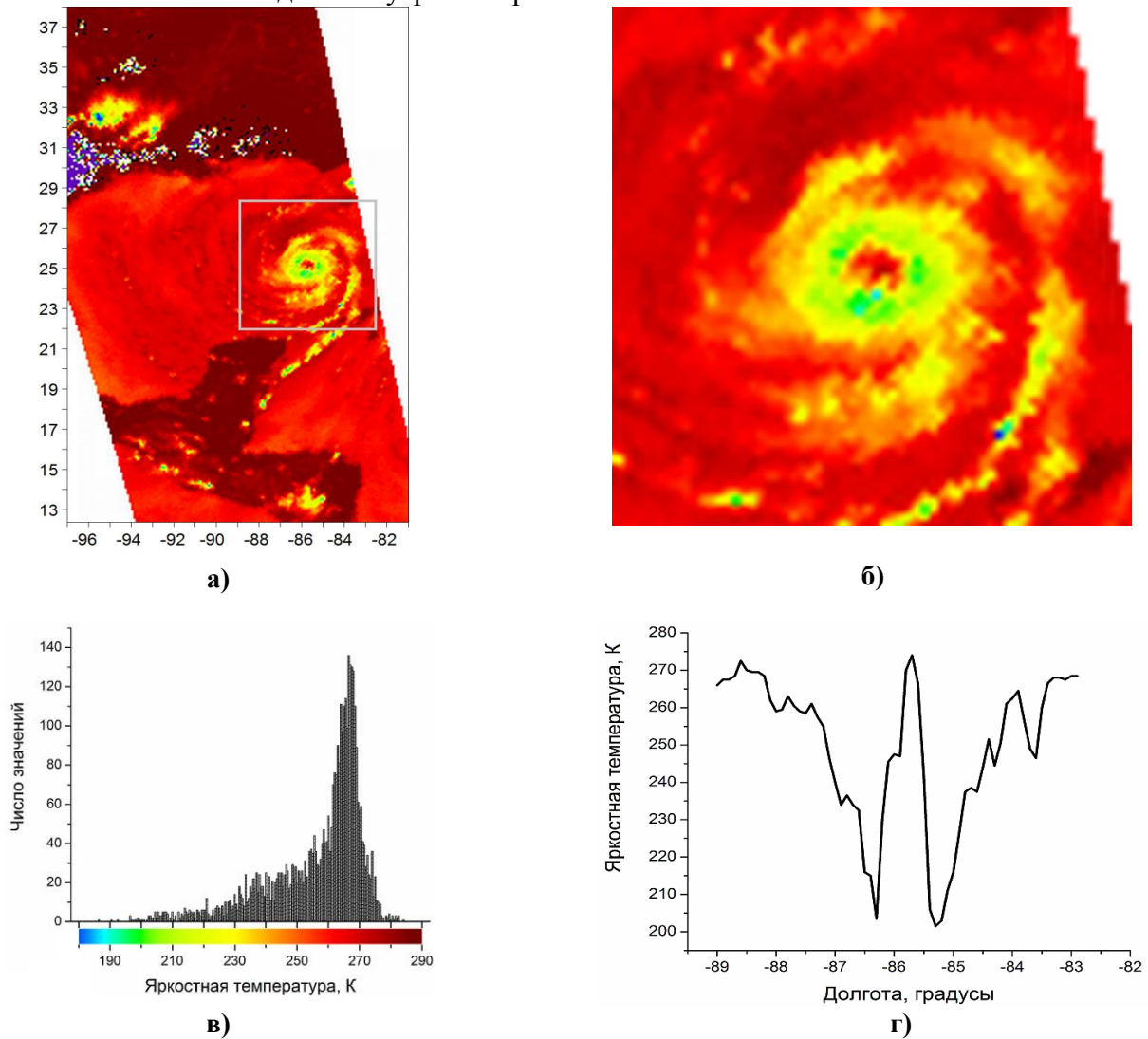


Рис.2. Радиотепловое поле горизонтально поляризованного излучения на частоте 85 ГГц над Мексиканским заливом 27.08.2005 в 22:00 UTC (а); радиотепловой образ ТЦ Katrina (б); гистограмма и цветовая шкала значений радиотеплового образа ТЦ Katrina (в); горизонтальное (долготное) сечение радиотеплового образа ТЦ Katrina через центр глаза (г).

Характерные радиояркостные контрасты вблизи ядра ТЦ иллюстрирует график рис.2г, на котором показано горизонтальное сечение фрагмента 2б, проведенное через его центр. По горизонтальной оси графика отложены значения географической долготы

в градусах (отрицательные для западного полушария), по вертикальной – соответствующие значения радиояростной температуры в К. Отчетливо выделяется пик около 85.5° западной долготы, приходящийся на теплое ядро ТЦ. Радиотепловой контраст между ядром и стеной ТЦ составляет в данном случае более 70 К. Следует заметить, что с достаточно высокой точностью (порядка единиц км) можно определить только центр ТЦ, учитывая симметричность его структуры. Линейные же размеры его глаза и детали стены определяются с точностью не выше десяти км (около 0.1 географического градуса) из-за недостаточного пространственного разрешения измерений. Таким образом, для практического исследования строения и пространственно-временной эволюции стены ТЦ необходимо улучшить пространственное разрешение получаемых данных как минимум на порядок.

Рис.3. организован аналогично рис.2, но отражает состояние радиотеплового поля над Мексиканским заливом уже на следующие сутки, 28.08.2005, около 10:00 UTC. К этому времени центр ТЦ Katrina сместился в западном направлении более чем на 200 км, минимальное давление упало до 935 гПа, а максимальная скорость ветра увеличилась до 65 м/с [19] – в своем развитии тропический ураган всего за 12 часов эволюционировал от начальной стадии урагана третьей категории (49.4-57.6 м/с) до верхних значений четвертой категории по шкале Саффира- Симпсона (57.9-68.7 м/с).

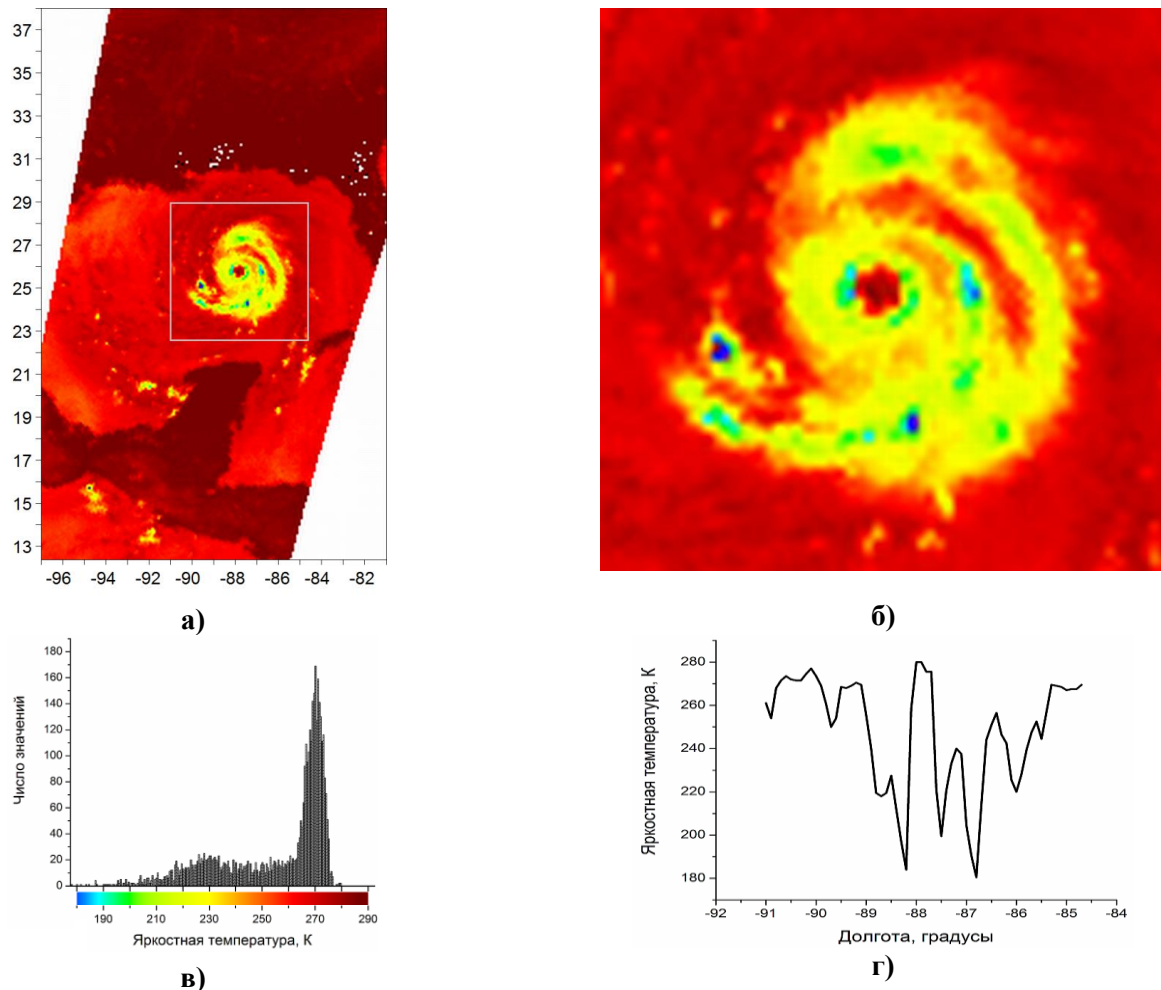


Рис.3. Радиотепловое поле горизонтально поляризованного излучения на частоте 85 ГГц над Мексиканским заливом 28.08.2005 в 10:00 UTC (а); радиотепловой образ ТЦ Katrina (б); гистограмма и цветовая шкала значений радиотеплового образа ТЦ Katrina (в); горизонтальное (долготное) сечение радиотеплового образа ТЦ Katrina через центр глаза (г)

Как хорошо видно из рис.3, радиояркие контрасты в окрестности теплого ядра и стены ТЦ выросли еще больше - до 100К (см. рис.3г). При этом, более сложный профиль сечения радиотеплового образа, чем на рис.2г, может указывать на деформационные изменения стены глаза. Однако, вследствие недостаточного пространственного разрешения дистанционных данных количественная диагностика этих изменений крайне затруднена и довольно неоднозначна – для нее просто не хватает данных! Можно лишь сделать предположение, требующее дополнительной проверки, что глаз ТЦ стал чуть более компактным и теплым. Надежная диагностика мезомасштабной структуры ТЦ и, в целом различных мезомасштабных явлений, требует улучшения пространственного разрешения дистанционных данных как минимум на порядок - до единиц км. Следует также подчеркнуть, что эффективность мониторинга и прогнозирования изменения обстановки для быстро развивающихся атмосферных процессов, таких как быстрая интенсификация тропических циклонов и их переход в стадию ураганов, существенно зависит не только от пространственного, но и от временного разрешения дистанционных данных [22,24].

Среди задач, относящихся к дистанционному зондированию поверхности суши, также можно обнаружить варианты, для качественного решения которых необходимо использование аппаратуры с повышенным пространственным или радиометрическим разрешением в элементе изображения. В число самых значимых, исходя из соображений безопасности и экономических аспектов, безусловно, входит комплекс разнообразных задач, связанных с мониторингом лесных и торфяных пожаров. Разработка аппаратуры и методик применения технологий микроволновой радиометрии с повышенным пространственным разрешением способно существенно повысить качество решения задач обнаружения, классификации, детализации, мониторинга, прогнозирования, наведения средств пожаротушения и т.п.. В настоящее время представляется затруднительным использовать для этих целей средства спутниковой СВЧ-радиометрии, но имеющиеся экспериментальные и теоретические наработки позволяют, во всяком случае, рассчитывать на эффективность СВЧ-радиометрического мониторинга с помощью аппаратуры высокого пространственного разрешения, размещаемой на борту пилотируемых и беспилотных атмосферных носителей. В многочисленных летных экспериментах ИРЭ АН СССР/ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН под руководством Бородина Л.Ф. в районах лесных и торфяных пожаров регистрировались контрасты СВЧ-радиояркой температуры величиной до 200-300К при характерных пространственных масштабах от десятков метров до десятков километров [25]. На рис.4 представлены полученные в работах [26,27] результаты расчетов радиояркой температуры пламени пожаров в сосновых лесах при различном возрасте и высоте деревьев. Анализ результатов показывает, что для обнаружения лесных пожаров с деревьями высотой менее 5м (т.е. фактически для кустарников и мелкорослого леса) можно использовать широкий СВЧ диапазон частот (от 1 до 40 ГГц). В то же время, для зрелого леса с деревьями выше 20 м для обнаружения низового и начальных стадий верхового пожаров, предпочтительнее использовать радиометры в диапазоне 1-8 ГГц.

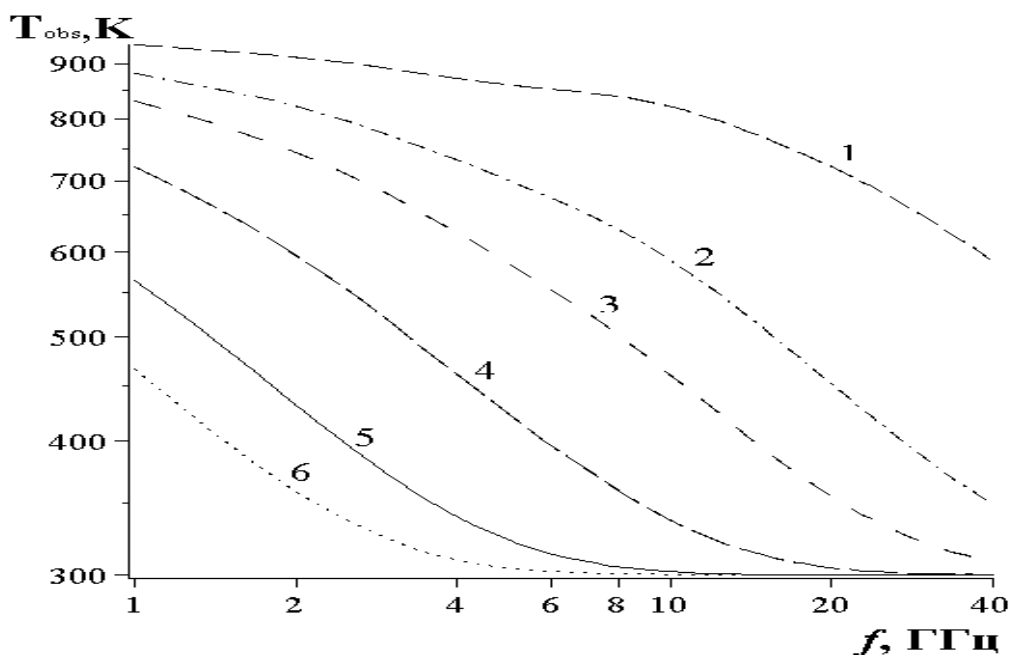


Рис.4. Наблюдаемые радиояркие температуры пожаров в сосновых лесах. 1 - $H_t = 1$ м, 2 - $H_t = 3$ м, 3 - $H_t = 5$ м, 4 - $H_t = 10$ м, 5 - $H_t = 20$ м, 6 - $H_t = 30$ м.

Приведенные в работах [9,10,23-27] и данном докладе примеры различной степени сложности и касающиеся зондирования различных сред свидетельствуют, по мнению авторов, о необходимости разработки и полноценного освоения технологии микроволнового радиометрического зондирования с повышенным пространственным разрешением для дистанционного зондирования покровов и атмосферы Земли с борта различных космических и атмосферных носителей. Возможным направлением такого рода деятельности, как и в случае РМС с повышенным радиометрическим разрешением [1,9], представляется исследование и развитие технологий многолучевых радиометрических систем [10]. Особое внимание следует при этом уделить вопросу совместного использования многолучевых радиометрических систем и многочастотных (однолучевых) РМС традиционного типа.

Работа выполнена в рамках Госзадания и грантов РФФИ №16-07-00956 А и РФФИ №16-29-09615-офи-м.

Литература

1. Данилычев М.В., Кравченко В.Ф., Кутуза Б.Г., Чуриков Д.В. Спутниковые СВЧ радиометрические комплексы дистанционного зондирования Земли. Совр. состояние и тенденции развития // Физ. основы приборостроения. 2014. Т.3. №1(10). С.3-25.
2. Данилычев М.В., Кутуза Б.Г. Современные спутниковые радиометры микроволнового диапазона. Обзор //Сборник: Проблемы дист. зондирования, распространения и дифракции радиоволн. Конспекты лекций. /Научный совет РАН по распространению радиоволн; Муромский институт (филиал) Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых". 2016. С. 5-27.
3. Болдырев В.В и др. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ //Совр. проблемы дист. зондирования Земли из космоса. - ИКИ РАН: 2008. - Вып.5. Т.1. С.243.

4. <http://smap.jpl.nasa.gov/>
5. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности //М.: Ленанд. 2016г. 338с.
6. <http://www.cosmoworld.ru/mirstation/mir/77KSEsince.shtml>
7. Catherine S. May Engineering Evaluation of Multi-beam Satellite Antenna Boresight Pointing Using Land/Water Crossings //Master's Thesis Defense, March 20, 2012 /University of Central Florida, Orlando, FL, Central Florida Remote Sensing Lab.
8. Смирнов М.Т., Халдин А.А. Предварительные результаты экспериментов с СВЧ-радиометрическим комплексом L-диапазона на РС МКС //Совр. проблемы дист. зондирования Земли из космоса. - ИКИ РАН: 2012, т.9, № 2, с.160.
9. Данилычев М.В., Масюк В.М., Лачихин А.В. Использование многолучевых систем панорамного типа в спутниковой СВЧ-радиометрии //Вопросы радиоэлектроники. 2017. № 6. С. 11-19.
10. Данилычев М.В., Ермаков Д.М., Кутуза Б.Г., Саворский В.П. Многолучевые системы в составе бортового СВЧ-радиометрического комплекса //Физические основы приборостроения. 2018. т.7. № 1(27). с.37-45.
11. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры //М.: Наука, 1973, 416с.
12. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/smos>
13. B.G.Kutuza, and G.K.Zagorin Two-dimensional synthetic aperture millimeter-wave radiometric interferometer for measuring full-component Stokes vector of emission from hydrometeors //Radio Science, v.38, №5, pp.11-1 – 11-7, 2003.
14. Гурвич И.А., Пичугин М.К. Исследование характеристик интенсивных мезомасштабных циклонов над дальневосточными морями на основе спутникового мультисенсорного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 51–59.
15. Гурвич И.А., Митник М.Л., Митник Л.М. Статистические характеристики, структура и параметры мезомасштабных циклонов над Охотским морем по данным спутникового микроволнового и оптического зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. В. 6. Т. 2. С. 111–117.
16. Заболотских Е.В., Митник Л.М., Бобылев Л.П. Сравнительная оценка существующих и перспективных методов исследования в области мониторинга и прогнозирования мезомасштабных циклонических вихрей, включая полярные циклоны // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 23–29.
17. Загорин Г.К., Кутуза Б.Г. Метод апертурного синтеза в интерферометрической СВЧ-радиометрии окружающей среды // Вопросы перспективной радиолокации (ред. А.В. Соколов). 2003. М.: Радиотехника. 464 С.
18. Поталова Е.Ю., Пермяков М.С., Клещёва Т.И. Мезомасштабная структура тропических циклонов в поле приводного ветра // Метеорология и гидрология. 2013. № 11. С.22-29.
19. Kossin J. P. and Schubert W. H. Mesovortices, polygonal flow patterns, and rapid pressure falls in hurricane-like vortices // J. Atmos. Sci. 2001. vol. 58. p. 2196-2209.
20. Покровская И.В., Шарков Е.А. Тропические циклоны и тропические возмущения Мирового океана: хронология и эволюция. Версия 3.1 (1983-2005) // М.: Полиграф сервис, 2006. 728 С.
21. <http://www.remss.com/missions/ssmi>
22. Ермаков Д.М., Чернушич А.П., Шарков Е.А., Шрамков Я.Н. Возможности построения краткосрочных глобальных радиотепловых изображений системы океан-

атмосфера на базе программной платформы Stream Handler // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. №3. С. 9–16.

23. <https://terra.nasa.gov/>

24. Wimmers A.J., Velden C.S. Seamless advective blending of total precipitable water retrievals from polar-orbiting satellites // J. Appl. Meteor. Climatol. 2011. Vol. 50. N5. P. 1024-1036.

25. Бородин Л.Ф., Кирдяшев К.П., Стаканкин Ю.П., Чухланцев А.А. Применение СВЧ радиометрии для обнаружения лесных пожаров // Радиотехника и электроника, 1976, 21(9), 1945-1950 с.

26. Саворский В.П., Каевицер В.И., Кибардина И.Н., Маклаков С.М., Панова О.Ю., Чухланцев А.А. СВЧ радиометрическая модель очага возгорания лесного пожара // Совр. проблемы дист. зондирования Земли из космоса, 2012, Т.9, №1, с.137.

27. Кибардина И.Н., Саворский В.П., Кузнецов О.О., Маклаков С.М., Панова О.Ю., Чухланцев А.А. Развитие СВЧ- радиометрической модели очага пламени лесного пожара // Совр. проблемы дист. зондирования Земли из космоса, 2013, Т.10, №4, с.79.