

Использование многолучевых систем панорамного типа в СВЧ-радиометрии морской поверхности

М.В. Данилычев, Б.Г. Кутуза

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

В работе рассмотрены основные ограничения, характерные для существующих аппаратных схем, реализующих различные базовые пространственно-временные способы сбора и обработки радиометрической информации. Предлагается способ улучшения показателей бортового радиометрического комплекса традиционного типа, за счет введения в его состав независимой радиометрической системы, основанной на технологии многолучевых систем панорамного типа.

The paper discusses the main limitations of existing hardware circuits that implement different underlying spatial and temporal methods of collecting and processing of radiometric information. We propose a method of improvement of onboard radiometric complex of the traditional type, due to the introduction in its composition of independent radiometric system based on the technology of multibeam panoramic systems.

Первым схмотехническим решением в спутниковой СВЧ- радиометрии Земли стали т.н. трассовые радиометры. Их антенны обеспечивают прием сигнала через единственный главный лепесток диаграммы направленности антенны (ДНА), положение которого в пространстве фиксировано по отношению к осям ориентации космического аппарата (КА), [1-3]. При этом используются в основном апертурные антенны типа рупор, линза, зеркало и их различные комбинации. В зависимости от требований задачи и имеющихся ограничений ширина ДНА по уровню половинной мощности (3dB) выбирается обычно в пределах от 1 до 10°. При надлежащем выборе постоянной интегрирования/частоты опроса такая схема обеспечивает наилучшее из возможных значений радиометрического разрешения в линейном элементе – “пятне” главного лепестка ДНА, которое движется вдоль снимаемой “одномерной полосы”, но не позволяет получить какое-либо разрешение по азимуту. Работа многоканального трассового радиометра на борту ИСЗ “Космос-243”, запущенного на орбиту 22 сентября 1968 года, впервые продемонстрировала реальные возможности спутниковой радиометрии по дистанционному зондированию системы “атмосфера – подстилающая поверхность” [3] путем измерения собственного микроволнового излучения Земли на нескольких фиксированных частотах и их совместного последующего анализа, см. далее рис.1. Проведенные на этом спутнике эксперименты показали преимущества и эффективность радиофизических методов исследования природной среды. Это был первый опыт использования микроволнового излучения Земли для определения геофизических характеристик атмосферы, морской поверхности и земных покровов, который сыграл огромную роль в дальнейшем развитии спутниковой СВЧ-радиометрии (рис.1). Эксперимент на ИСЗ “Космос-243” более чем на четыре года опередил аналогичные исследования, выполненные на американском спутнике “Nimbus-5” (Staelin et al., 1973). В состав бортового радиоспектрометра ИСЗ “Космос-243” входили направленные в надир каналы с длинами волн 0.8, 1.35, 3.4 и 8.5 см. Ширина ДНА по уровню половинной мощности и постоянная времени интегрирования составляли 4° и 3с для канала 0.8см, 3.6° и 2.2с для канала 1.35см, 4° и 1.3с для 3.4см, 8.6° и 2.2с для канала 8.5см. При таких значениях ширины ДНА и постоянной времени флуктуационная (приборная) чувствительность каналов (1.9, 1.3, 0.6 и 0.7 К

соответственно) позволяла получить температурную чувствительность в элементе пространственного разрешения порядка $\sim 0.5\text{K}$ для поверхностных (3.4 и 8.5 см) и $\sim 1.0\text{K}$ для атмосферных (0.8 и 1.35 см) каналов, [3].

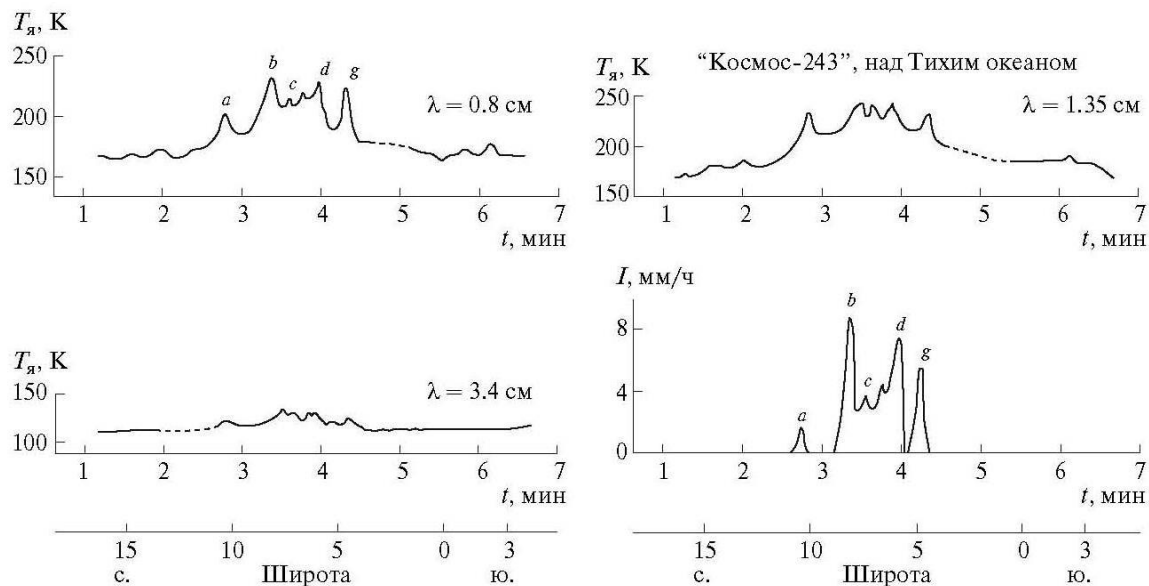


Рис.1. Пример профилей яркостной температуры на 3-х длинах волн (0.8, 1.35, 3.4см) и оценки интенсивности дождя над районами Тихого океана, полученные при съемке с ИСЗ "Космос-243", [3]

Несмотря на постоянное улучшение приборной чувствительности (до величин существенно меньших 0.1K), совершенствование элементной базы и использование новых конструктивных решений, в качестве основного прибора радиометры данного типа в настоящее время используются уже достаточно редко. Причина этого очевидна – на основе данных единичного трассового радиометра невозможно воссоздать картину текущего распределения геофизических параметров в требуемом двухмерном или трехмерном случаях. Сейчас их основное предназначение заключается в обеспечении калибровки и коррекции главного потока данных поступающих от базовой обзорной радиометрической системы (РМС). К числу иных практических применений можно отнести использование данного типа приборов в процедуре метеокоррекции данных активных датчиков типа скатерометров или альтиметров, а также - в качестве датчиков контроля уровня подсвета от внеатмосферных источников. Необходимое для современного потребителя покрытие районов спутниковой съемки в настоящее время достигается путем использования следующих технологических схем: 1) однолучевых радиометрических систем (РМС) с пространственным сканированием главного лепестка ДНА; 2) многолучевых РМС апертурного синтеза (систем с нелинейной обработкой сигнала), и 3) многолучевых РМС панорамного типа.

Однолучевые РМС с пространственным сканированием луча [2] являются основным типом современных спутниковых радиометров и делятся по принципу сканирования луча на системы с механическим и электрическим способом сканирования. При выполнении пространственного сканирования, довольно узкий, как правило, от 0.5° до 5° по уровню половинной мощности (3dB), луч главного лепестка ДНА описывает заданную траекторию обзора системы "поверхность- атмосфера" в полосе обзора примыкающей к проекции орбиты (следу) спутника. Получение радиометрической информации о сканируемом пространстве осуществляется методом последовательного опроса строк, возникающих при поступательном движении спутника в сочетании с периодическим движением луча относительно самого спутника.

К числу режимов сканирования, реализуемых на практике, относятся режим "качания" луча в плоскости, поперечной вектору скорости спутника, называемый режимом "поперечного" или иногда "линейного сканирования", и, режим "конического вращения" луча с постоянным углом наклона к надирной оси аппарата. Первый вариант мало пригоден для исследования протяженных поверхностных источников с ярко выраженной угловой зависимостью интенсивности и поляризационных свойств, например, поверхности океана, и, кроме этого, требует дополнительной геометрической коррекции зависимости формы и площади элемента разрешения от угла наблюдения. Поэтому, в настоящее время его в основном задействуют в конструкции радиометров, предназначенных для атмосферного зондирования вблизи линий поглощения, в частности, для восстановления атмосферных профилей температуры и влажности [1,2]. Подобная схема отличается малыми показателями по массе, габаритам и энергопотреблению, а также исключительно высокой надежностью при относительно невысокой стоимости и большой полосе обзора (до 2600 км при высоте полета ~ 830-850 км). Несмотря на имеющиеся у данной схемы существенные достоинства, присущие ей также очевидные недостатки снижают ценность РМС данного типа как бортового средства микроволнового зондирования. В большинстве современных радиометрических систем СВЧ-диапазона, предназначенных для комплексного зондирования как атмосферы, так и поверхности, принято использовать режим "конического вращения" луча ДНА. Этот способ пространственного обзора позволяет получать гораздо более качественный и единообразный конечный продукт, удобный для интерпретации и использования широким кругом научных и практических пользователей. При такой схеме работы можно предусмотреть режимы сбора радиометрической информации в переднем азимутальном секторе (по отношению к направлению полета), заднем или в обоих одновременно, что позволяет минимизировать вклад от радиоизлучения Солнца, рассеянного на водной поверхности и получать информацию об объектах с разных ракурсов съемки. Пример реализации "утреннего" режима ("полет навстречу Солнцу со съемкой в задней полусфере") показан на рис.2 для комплекса SSMIS (Special Sensor Microwave Imager Sounder), установленного на борту спутников поколения Block 5D-3 по программе DMSP (Defense Meteorological Satellite Program), [2,4].

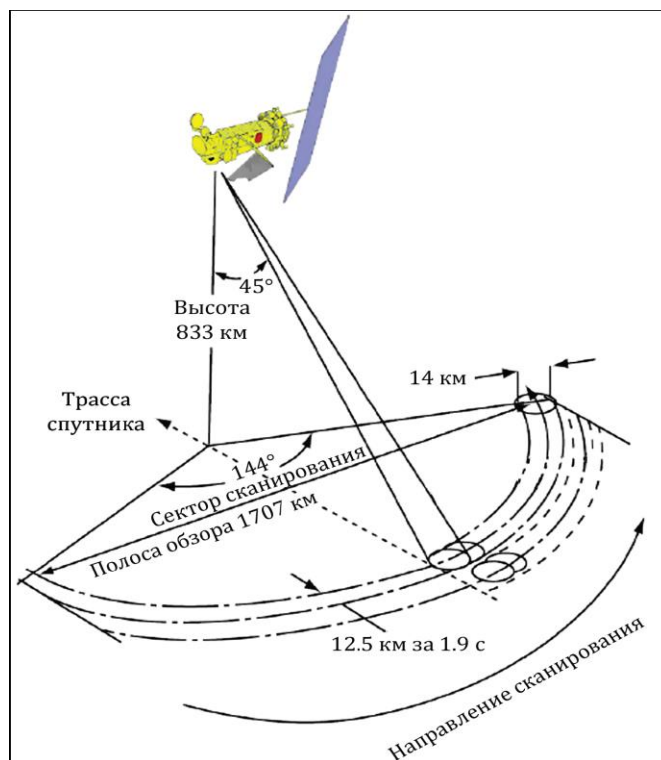


Рис.2. Геометрия "конического" сканирования, показанная на примере работы комплекса SSMIS, установленного на борту спутников поколения Block 5D-3 программы DMSP, [2,4]

Выбор угловой ширины луча (размера пятна), траектории и скорости сканирования, ширины полосы обзора, частоты опроса и т.п. должен быть оптимально сбалансированным для решения поставленной задачи. Действует своего рода "принцип неопределенности". Например, при попытке улучшить пространственное разрешение за счет сужения диаграммы направленности при неизменных полосе обзора и параметрах перекрытия мы вынуждены увеличить скорость сканирования и, как результат, сталкиваемся с падением чувствительности, т.е. ухудшением температурного разрешения. С другой стороны, желание улучшить температурное разрешение при обработке фактически приводит к усреднению показаний по нескольким соседним элементам пространственного распределения и, следовательно, к потере разрешения пространственного. Такая ситуация связана с тем, что при высоких скоростях сканирования, т.е. "малом и быстром" пятне приема, просто не получается обеспечить достаточно длительное время накопления сигнала от данного элемента пространственного разрешения! Именно поэтому возможность быстрого и безинерционного перемещения луча, характерная для систем с электрическим сканированием, не является принципиально важной для РМС космического базирования. Основная на сегодняшний день схема построения многоканального поляризационного радиометра космического базирования в сантиметровом и миллиметровом диапазонах предполагает использование единого зеркала и ряда интегрированных (т.е. общих для нескольких частот и поляризаций) рупорных облучателей с целым набором (от 4-ех до 50-и) рабочих каналов с различными частотами (от 5 до 300 ГГц), поляризациями, шириной полосы пропускания, временем интегрирования и т.д.. Такой схеме также потенциально присуща значительная ширина полосы обзора – до ~2500км и более при высоте полета ~850км. Приборная радиометрическая чувствительность современных "поверхностных" ($\lambda \geq 3\text{см}$) каналов оценивается величиной ~0.03-0.06К, что позволяет достигнуть чувствительности в

пространственном элементе (25-100км) порядка 0.3-0.7К. Для “атмосферных” каналов ($\lambda \leq 1.6\text{см}$), с учетом специфики узкополосного атмосферного профилирования, разброс увеличивается: $\sim 0.03-0.3\text{К}$ для радиометрической (приборной) чувствительности и $\sim 0.3-3.0\text{К}$ для чувствительности в элементе пространственного разрешения ($\sim 5-50\text{км}$). Данная радиометрическая технология наиболее универсальна и на сегодняшний момент является самой проработанной, надежной и достаточно эффективной. Во всяком случае, в миллиметровом и сантиметровом диапазонах она позволяет вполне удовлетворительно разрешать значительное число существующих задач [1-5]. Для этих задач путем соответствующей оптимизации удастся достигнуть разумного, в некотором смысле “идеального”, компромисса в сочетании значений пространственного и температурного разрешения и одновременно получить максимально широкую полосу обзора. В дециметровом диапазоне также уже была реализована подобная схема - в конце января 2015 года на орбиту был выведен и успешно работал в течении некоторого времени радиометрический и радиолокационный 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 $\sim 6\text{м}$, [6]. Разнообразие конкретных конструкторских воплощений для схемы с пространственным сканированием главного лепестка ДН достаточно велико. Вместе с тем указанная схема имеет слишком малый ресурс для развития и близка к достижению естественных ограничений по пространственному и радиометрическому разрешению. Основным способом повышения возможностей такого типа РМС является улучшение приборной чувствительности, которая для лучших современных образцов оценивается величиной (без применения элементов криогеники!) в несколько сотых Кельвина. Камнем преткновения, или образно говоря генетическим дефектом, для данной технологии является тот факт, что скорость сканирования луча по поверхности во много (в 400 и более!) раз превышает скорость движения следа (проекции) спутника на поверхности ($\sim 6.5\text{км/с}$). Именно это и ограничивает принципиальным образом наши возможности по накоплению сигнала от данного элемента пространственного разрешения, т.е. по достижению высокой радиометрической чувствительности в пространственном элементе при одновременном достаточно хорошем пространственном разрешении.

Как попытку преодолеть эти ограничения следует рассматривать эксперименты с многолучевыми системами. Желание существенно улучшить показатели пространственного разрешения заставило обратиться к технологии апертурного синтеза. Основой этой технологии является использование 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 антенны с нелинейной обработкой нашли широкое применение, например, в радиоастрономии. Но, если для спутниковых РМС такая технология представляется новейшей, то для наземной радиоастрономии существует уже многолетний опыт ее применения [7]. В развитии радиотелескопов однажды наступил этап когда “...мощности регистрируемого сигнала стало более чем достаточно, а углового разрешения катастрофически не хватает”. Технологическим ответом на этот вызов стало использование принципов интерферометрии и на этом пути были достигнуты значительные успехи. При этом следует подчеркнуть принципиальное влияние на уровень развития и использования такой технологии имеющихся современных возможностей вычислительной техники.

Пока эти возможности были невелики, использовалась в основном схема последовательной (во времени) интерферометрии, основанная на учете вращения земли и небольшом числе остронаправленных антенн. Такая схема требовала значительного интервала времени для экспозиции и не менее значительного периода обработки. Число используемых в мире интерферометров составляло сравнительно небольшую долю от общего числа радиотелескопов. Для оперативной же спутниковой радиометрии такая схема была бы крайне неэффективной и практически бессмысленной. Однако лавинообразное нарастание вычислительных мощностей в последней четверти 20-ого века постепенно привело к возможности реализации самых разных схем параллельного апертурного синтеза, когда стало возможным обеспечить одновременный сбор и предварительную корреляционную обработку сразу со многих относительно небольших и недорогих антенн. Однако, при использовании описываемой технологии в спутниковой радиометрии обнаружилось также и наличие собственной, по сравнению с радиоастрономическим случаем, довольно значительной специфики. Существенное ухудшение, по сравнению с теоретически ожидаемой, температурной чувствительности в элементе пространственного разрешения стало основным разочарованием данных проектов на практике. Например, достигнутая в проекте SMOS [2,8] радиометрическая чувствительность в элементе разрешения (~50 км) составляет от 2 до 4 К, в зависимости от величины сигнала (шкалы измерения) и расположения данного элемента в полосе зондирования. Подобные значения в несколько раз уступают требуемым величинам не только в задаче измерения солености поверхностных вод [13], но и в задачах радиометрического зондирования суши [1,2,8]. По этому показателю, единственная из уже работающих на орбите, РМС апертурного синтеза SMOS заметно уступают другим РМС, построенным по иным конструктивным схемам [2,6,11-13]. И тем не менее, несмотря на целый ряд существующих недостатков, в том числе высокую стоимость, данное направление развивается и постепенно "выгораживает" свою собственную нишу в технологии спутниковой СВЧ-радиометрии. Так, в гораздо более сложном проекте ближайшей перспективы GeoStar [9] уже принято во внимание большинство обнаруженных моментов и, с учетом соответствующей радиационно-геофизической модели, предполагается достигнуть заметно лучшего соответствия между требованиями основной задачи данного проекта (зондирования атмосферы в линиях поглощения с целью построения трехмерных распределений температуры и влажности) и возможностями радиотехнической аппаратуры нового поколения в миллиметровом диапазоне, [1,9]. В этом проекте предполагается разместить многочастотный и многоканальный (300 приемников на 6-и каналах в диапазоне 50 ГГц и 600 приемников на 4-х каналах в диапазоне 183 ГГц) спутниковый интерферометр на геостационарной орбите [2,9]. Выбор такой орбитальной позиции и набора частот, вместе с технологией интегрированных рупорных антенн, призван обеспечить максимальную чувствительность радиометрической системы к изменению температурных и влажностных характеристик атмосферы за счет значительного увеличения времени экспозиции и устранения проявлений поляризационного характера поверхностного излучения. К числу практически реализуемых можно отнести и предложенный российскими учеными вариант использования этой технологии в мм-диапазоне для решения ряда атмосферных задач с высоким пространственным и относительно невысоким радиометрическим разрешением при размещении РМС на низких (400–1500 км) орбитах [10].

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. Прообразом

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. Например, в состав аппаратуры ДЗЗ модуля “Мир-Природа” входили панорамные комплексы из 3-х радиометров РП-225 и 6-и радиометров РП-600 на длины волн 2.25 и 6.0 см соответственно [11]. Дальнейшим развитием такого подхода стала схема с общим антенным узлом - многолучевой антенной. Такая антенна состоит из приемной части, диаграммообразующего устройства (ДОУ) и выходов антенны. Относительно небольшой, но уже существующий опыт применения подобных систем показал [2,12,13], что апертурные многолучевые антенны, в которых ДОУ представляет собой совокупность облучателей с зеркалом или линзой, 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).

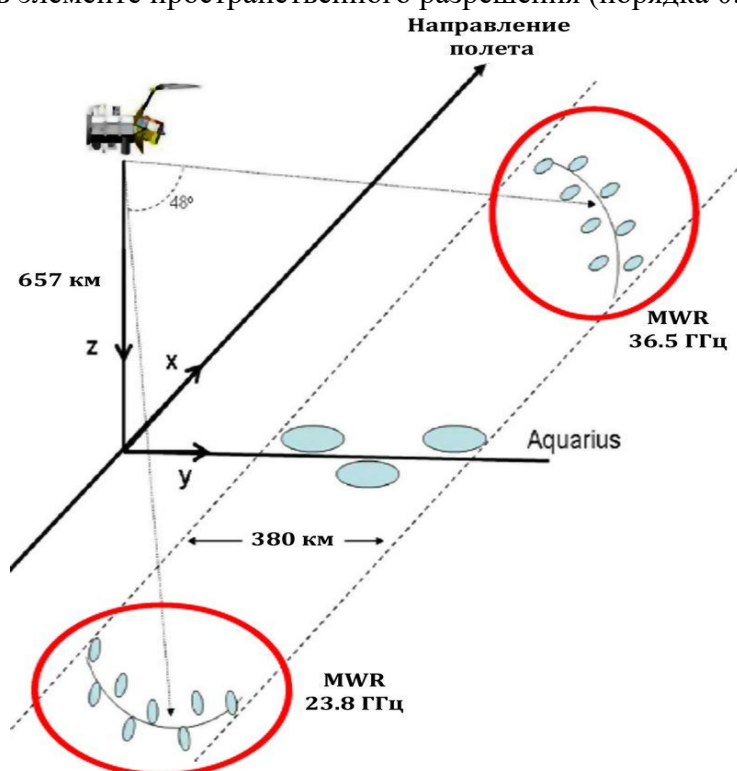


Рис.3. Схема обзора пространства для панорамного радиометрического и радиолокационного комплекса ИСЗ SAC-D/Aquarius [2,12]

Пример организации пространственного обзора для трехлучевого радиометра ($\lambda \sim 21.23$ см) и совмещенного с ним по полям зрения трехлучевого скаттерометра ($\lambda \sim 23.81$ см), составляющих размещенный на аппарате SAC-D/Aquarius [2,12] микроволновый комплекс L-диапазона, показан выше на рис.3. На борту присутствует (см.рис.) также панорамная система сантиметрового диапазона MWR (Microwave Radiometer), которая состоит из 8-лучевой подсистемы K-диапазона ($\lambda \sim 1.26$ см, полоса частот 500 МГц, V-поляризация) и 8-лучевой подсистемы Ka-диапазона ($\lambda \sim 0.82$ см, 1 ГГц, V и H). На каждый диапазон приходится своя система рефлекторов, по 8 облучателей и 2 радиометра.

Как и в случае РМС апертурного синтеза, сложность изготовления и стоимость панорамных систем зависят от числа лучей, числа радиометрических модулей и сложности АФУ в целом, и имеют тенденцию к значительному росту при увеличении числа лучей и элементарных приемников. При этом, из-за присущих им особенностей

конструкции, сами такие системы не могут быть универсальными в той степени, какая присуща многочастотным системам со сканированием главного лепестка ДНА. Поэтому, прежде всего, следует оценить и понять значимость тех задач, ради решения которых необходимо развивать подобную технологию. Для многолучевых систем панорамного типа это означает нахождение в практике спутниковой радиометрии задач, для решения которых, нужна, в первую очередь, повышенная температурная (радиометрическая) чувствительность в элементе пространственного разрешения, а требование к самому пространственному разрешению является вторичным. Примером такого рода может служить задача восстановления величины солености поверхностных вод Мирового океана с точностью порядка $\delta S_w \sim 0.2\text{‰}$ по результатам измерения излучения поверхности в L-диапазоне.

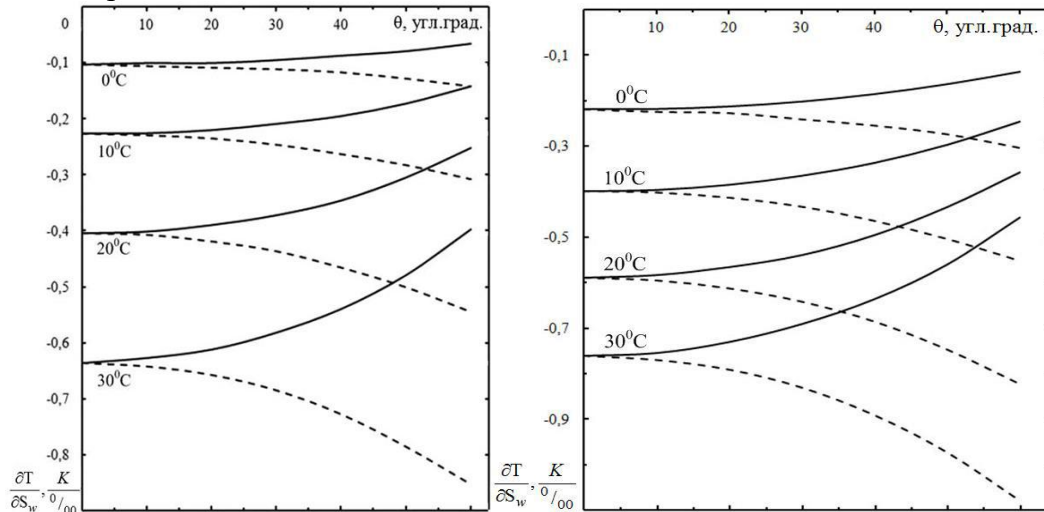


Рис.4. Чувствительность T_b к изменению солености S_w для разных акваторий (слева при $S_w \sim 17.5\text{‰}$, справа $\sim 36\text{‰}$). Вертикальная (пунктир) и горизонтальная поляризации, $\lambda \sim 21\text{см}$, [14]

Графики на рис.4 иллюстрируют факт сильной зависимости (в используемом диапазоне частот) чувствительности радиояростной температуры к изменению солености $\partial T_b / \partial S_w$ от температуры поверхности $t^\circ\text{C}$, как для солоноватых (левый график при $S_w \sim 17.5\text{‰}$), так и для настоящих соленых морских и океанических (правый график $S_w \sim 36\text{‰}$) вод [14]. Хорошо видно, что требуемая точность восстановления солености поверхностных вод в принципе достижима лишь при использовании трассовых или многолучевых РМС панорамного типа (см.выше).

Многолучевые РМС, как уже упоминалось ранее, не могут конкурировать с однолучевыми системами, подобными американской РМС SSMIS [2,4] или российской МТВЗА-ГЯ [2,5], по полосе обзора, числу рабочих каналов и универсальности в целом. Вместе с тем их оригинальные возможности позволяют рассматривать их как относительно недорогой способ улучшения показателей бортового радиометрического комплекса, за счет комплексирования РМС традиционного типа с независимой радиометрической системой, основанной на технологии многолучевых, к примеру, панорамных систем. Рассмотрим далее конкретную ситуацию.

Спецификой российского сегмента спутникового ДЗЗ является следующий факт: в настоящем и ближайшем будущем регулярные измерения параметров атмосферы и океана будут основаны на использовании единственной российской разработки - семействе многоканальных радиометров МТВЗА-ГЯ [2,5]. В своем нынешнем состоянии РМС МТВЗА-ГЯ, установленная на борту ИСЗ «Метеор-М» № 2, уступает

РМС SSMIS [2,4] по ширине полосы обзора ($\sim 105^\circ$ против $\sim 144^\circ$) и имеет нетрадиционное и неоптимальное значение угла зондирования поверхности ($\sim 65^\circ$ к зениту вместо 55°). Кроме этого она не имеет возможности менять полосу обзора с целью минимизации влияния отраженного от поверхности моря радиоизлучения Солнца. В то же время она выглядит более совершенной с позиции подбора рабочих частот: в ее состав входят 49 выделенных рабочих каналов в 29-и частотных диапазонах в общей полосе от 10 до 184 ГГц. Логика использования данной системы подразумевает ее дальнейшее совершенствование. Одной из проблем, которые необходимо разрешить в ходе возможной оптимизации конструкции МТВЗА-ГЯ, является вопрос о необходимости введения в схему измерений канала, работающего в диапазоне радиочастот 6-7 ГГц. Нужны ли, скажем каналы 6.9 ГГц на обеих поляризациях в составе универсальной бортовой РМС или можно обойтись уже имеющимися на частоте 10.7 ГГц? При использовании в многоканальной радиометрической системе сканирующего типа электромеханической антенны с единым для всех рабочих частот зеркальным отражателем, как это сделано в большинстве современных многочастотных систем, пространственное разрешение на каналах 10.7 ГГц превосходит разрешение на каналах 6.9 ГГц более чем в 1.5 раза по каждому из направлений. Такой факт сулит значительную выгоду в детализации распределения восстановленных параметров. Однако при детальном рассмотрении становится ясным, что использование пары $T_v(10.7)$ и $T_h(10.7)$ в качестве основной при восстановлении температуры поверхности T и скорости приводного ветра U_h , возможно только с определенными оговорками. Действительно, из представленных в монографии [1] графиков радиационно-ветровой чувствительности следует, что характер этой зависимости для частот 6.9 и 10.7 ГГц практически одинаков на обеих поляризациях в довольно широком диапазоне скорости ветра, по крайней мере, до величин 20-25 м/с. Вместе с тем, как видно на рис.5, для радиационно-температурной чувствительности это заведомо не так – во всем диапазоне естественных изменений поверхностной температуры значения величин $\partial T_v / \partial T$ и $\partial T_h / \partial T$ на частоте 6.9 ГГц превышают аналогичные на частоте 10.7 ГГц. При этом если в диапазоне температур поверхности t_s больших примерно $+20^\circ\text{C}$ таким различием можно пренебречь (см.рис.), то при приближении к нулевым, по Цельсию, температурам радиационно-температурная чувствительность $\partial T_v / \partial T = \partial T_v / \partial t_s$ на канале $T_v(10.7)$ падает заметно быстрее и при $t_s = 0^\circ\text{C}$ становится настолько маленькой (~ 0.15), что уступает значению на канале $T_v(6.9)$ практически втрое (~ 0.41 соответственно). Ухудшение качества якобиана и обусловленности системы уравнений для каналов на 10.7 ГГц при этих температурах закономерно приводит к снижению устойчивости решения и росту погрешности восстановления T по сравнению с каналами 6.9 ГГц в те же три раза.

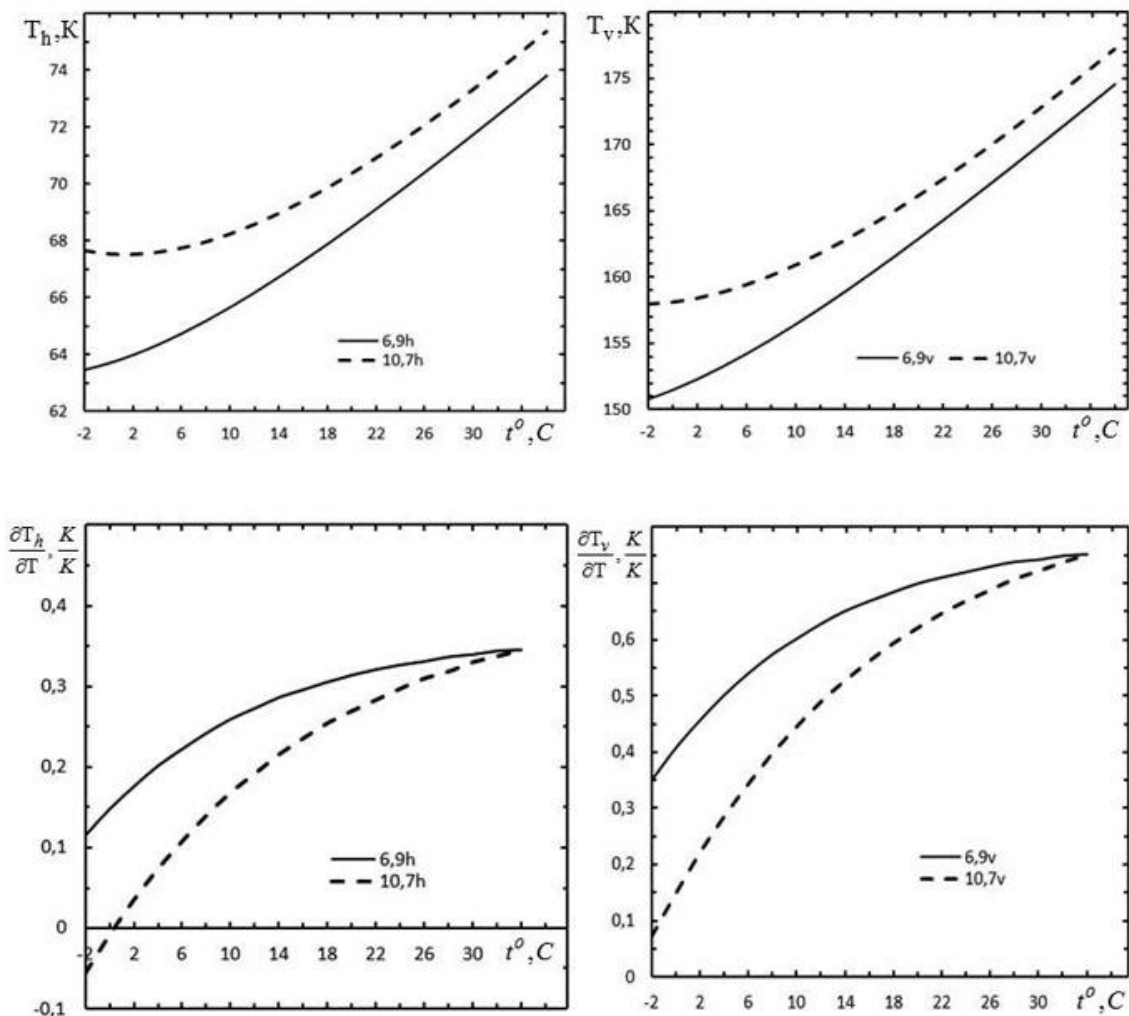


Рис.5. Начальное приближение для радиационно-температурной чувствительности поверхности океана на частотах 6.9 и 10.7 ГГц при угле зондирования $\theta=55^\circ$ и уровне солёности $S_w=36\%$, [1]

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в отличие от тропических и субтропических вод, при работе в умеренных и полярных широтах (при t_s меньших $\approx 14^\circ\text{C}$), наличие в составе универсальной бортовой РМС, в частности модернизированной МТВЗА-ГЯ, h- и v- каналов диапазона 6-7 ГГц является насущной необходимостью. Этот вывод совсем не подразумевает требования обязательного "встраивания" каналов 6.9h и 6.9v непосредственно в конструкцию многоканального радиометра с механическим способом сканирования главного лепестка ДНА, которым, собственно, и является РМС МТВЗА-ГЯ. Намного более рациональным и простым в реализации представляется введение этих каналов в состав комплексной бортовой РМС в виде одной или нескольких независимых от МТВЗА-ГЯ секций многолучевого панорамного радиометра апертурного типа с диаметром зеркала в ~ 1.5 раза ($\sim 1.0\text{м}$) больше чем у общего для всех своих каналов зеркала МТВЗА-ГЯ ($\sim 0.65\text{м}$). Такой подход способствовал бы дополнительному повышению радиометрической чувствительности этих каналов в элементе пространственного разрешения (не хуже 0.1К!) при параметрах пространственного разрешения не уступающих показателям каналов МТВЗА-ГЯ на частоте 10.7ГГц, а также повысил бы общую надежность радиометрического комплекса. При этом повышение точности восстановления

температуры поверхности океана закономерно способствовало бы улучшению качества восстановления всех остальных параметров системы “океан-атмосфера”.

Таким образом, несмотря на относительно небольшой объем представленных материалов, приведенные в докладе примеры свидетельствуют о необходимости изучения и дальнейшего развития технологии многолучевых РМС, в том числе панорамного типа.

Литература

1. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности //М.: Ленанд, 2016г., 338с.
2. Данилычев М.В., Кутуза Б.Г. Современные спутниковые радиометры микроволнового диапазона. Обзор. Лекция. //VII Всероссийские Армавские чтения "Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред" /VI Молодежная конференция "Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн" (Муром, 31.05-2.06.2016 г.) /Материалы конференции. [Электронный ресурс]:– Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ. 2016. -464 с. ISSN 2304-0297
3. Гурвич А.С., Кутуза Б.Г. “Космос-243” – первый в мире эксперимент по исследованию Земли из космоса радиофизическими методами //Исслед. Земли из космоса, 2010, № 2, с.14.
4. http://nsidc.org/data/docs/daac/ssmis_instrument/index.html
5. 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.
6. <http://smap.jpl.nasa.gov/>
7. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры //М.: Наука, 1973, 416с.
8. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/smos>
9. <http://microwavescience.jpl.nasa.gov/instruments/geostar/>
10. 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, vol. 38, № 5, pp. 11-1 – 11-7, 2003.
11. <http://www.cosmoworld.ru/mirstation/mir/77KSEsince.shtml>
12. 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.
13. Смирнов М.Т., и др. Эксперимент по дистанционному СВЧ радиометрическому зондированию Земли в L-диапазоне с малого космического аппарата, первые результаты //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей, ИКИ РАН, 2013, т. 10, № 3, с.142.
14. Данилычев М.В., Кутуза Б.Г., Калошин В.А., Мошков А.В. Использование радиометрии СВЧ- диапазона для измерения солености поверхностных вод Мирового океана //Журнал Радиоэлектроники, ISSN 1684-1719, М., №1 – январь 2015, с.1.