

Перспективы развития средств спутниковой СВЧ радиометрии земной поверхности

М.В. Данилычев¹, Б.Г. Кутуза¹, И.Б. Кутуза^{1,2}

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7.

E-mail: dan496@yandex.ru, kutuza@cplire.ru

² Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН
117342, г. Москва, ул. Бутлерова, 1

E-mail: dan496@yandex.ru, kutuza@cplire.ru

Проведен анализ зарубежных действующих и перспективных СВЧ радиометрических спутниковых систем для дистанционного мониторинга состояния земных покровов (поверхности суши и Мирового океана). В работе рассмотрены современные тенденции развития спутниковой радиометрии поверхности, включая новые типы СВЧ радиометров и различные варианты антенно- фидерных устройств. В качестве наиболее интересных примеров успешной реализации поставленной задачи по совершенствованию функциональных возможностей новых радиометрических систем (РМС) приведены описания технических возможностей спутниковых СВЧ радиометрических систем нового поколения: AMR-CR, AMSR3, CIMR и «Хайян-4». В качестве основных объектов исследования в упомянутых текущих или спутниковых миссиях ближней перспективы рассматриваются водная поверхность и ледовый покров Мирового океана, а также растительный, почвенный, снежный и ледовый покровы суши.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, СВЧ-радиометрия, земная поверхность, коническое сканирование, спутник, апертурный синтез

The prospects for the development of satellite microwave radiometry of the Earth's surface

M.V. Danilychev¹, B.G. Kutuza¹, I.B. Kutuza^{1,2}

¹ Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS.

² Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of RAS

The analysis of foreign existing and promising microwave radiometric satellite systems for remote monitoring of the state of the Earth's surface (land surface and oceans) is carried out. The paper considers current trends in the development of satellite surface radiometry, including new types of microwave radiometers and various variants of antenna-feeder devices. The most interesting examples of successful implementation of the task of improving the functionality of new radiometric systems (RMS) are descriptions of the technical capabilities of new-generation microwave satellite radiometric systems: AMR-CR, AMSR3, CIMR and Haiyan-4. The water surface and ice cover of the World Ocean, as well as vegetation, soil, snow and ice cover of the land, are considered as the main objects of research in the mentioned current or near-term satellite missions.

Keywords: remote sensing, microwave radiometry, Earth's surface, conical scanning, satellite, aperture synthesis

Введение

В настоящее время в российской практике использования спутниковых средств микроволновой (СВЧ) радиометрии для целей дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) сложилась ситуация, когда основные усилия российских разработчиков

направлены на разработку бортовой аппаратуры для зондирования атмосферы. С точки зрения необходимости повысить качество текущих краткосрочных (до 3-5 суток) метеопрогнозов такой подход выглядит логичным и достаточно обоснованным выбором [1, 2]. Использование же для этого национальной группировки ИСЗ Метеор с радиометрическим комплексом МТВЗА-ГЯ на борту представляется вполне оправданным. Вместе с тем, следует уже определиться с оценкой степени необходимости для российской науки и практического землепользования развития направления «зондирование земной поверхности средствами спутниковой СВЧ радиометрии». Надо ли уже разрабатывать соответствующие технологические платформы и их аппаратную составляющую, и, будут ли оправданными соответствующие затраты? Для понимания текущей ситуации и перспектив ближайшего будущего представляется разумным рассмотреть положение дел у наших научно-технологических конкурентов за рубежом, существующих, по сравнению с нами, в «относительно тепличных геополитических и экономических условиях».

Наиболее интересными, с точки зрения приобретенного опыта, вариантами прошедших за предшествующее десятилетие или реализуемых в настоящее время зарубежных проектов спутникового дистанционного зондирования представляются миссии SMOS, SMAP, SAC-D/Aquarius, FY3B, AMSR-E/2, TRMM/GPM и им подобные [2]. Как следствие, в целом, успешности этих пионерских миссий в мировом научно-техническом сообществе прорабатываются возможности дальнейшего развития данных технологий, в частности, спутниковой микроволновой радиометрии поверхности суши и Мирового океана. Усилия направлены на разработку аппаратуры и совершенствование процесса спутникового мониторинга ключевых компонентов водного, энергетического и углеродного циклов при одновременной поддержке процедур контроля и прогнозирования метеорологической обстановки и функционирования действующих программ ДЗЗ. Наиболее широко соответствующие разработки по этим технологическим и научным направлениям микроволновой радиометрии ведутся в Национальном управлении по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA) и Национальной администрации по океаническим и атмосферным исследованиям США (NOAA), Китайском национальном космическом управлении (CNSA), Европейском космическом агентстве (ESA) а, также, в меньшей степени, в Японском агентстве аэрокосмических исследований (JAXA) и Индийской организации космических исследований (ISRO) [3-8]. В обзоре кратко представлены эти технологические направления, в том числе, на примере деятельности Европейского космического агентства (ЕКА/ESA) по наращиванию операционных возможностей орбитальной группировки Sentinel [6]. Ранее, в работе [2], была предложена следующая классификация бортовых радиометрических систем (РМС) по принципу организации пространственно-временной схемы сбора данных спутникового СВЧ зондирования:

- 1) однолучевые, с фиксированной ориентацией главного лепестка диаграммы направленности антенны (ДНА) в бортовой системе координат, т.н. трассовые радиометры;
- 2) однолучевые РМС с пространственным сканированием главного лепестка ДНА;
- 3) многолучевые РМС панорамного типа;
- 4) многолучевые РМС апертурного синтеза (системы с нелинейной обработкой сигнала).

Представляется интересным рассмотреть также эволюцию различных типов РМС за предшествующее десятилетие.

Альтиметр рельефа полярных льдов и снега CRISTAL. Роль радиометрии

ИСЗ, запускаемый ESA [6] для миссии “Copernicus Polar Ice and Snow Topography Altimeter (CRISTAL)”, будет оснащен двухчастотным радиолокационным высотомером для измерения параметров льда и снега “Interferometric Radar altimeter for Ice and Snow (IRIS)” и вспомогательным микроволновым радиометром (MWR). IRIS будет использоваться для измерения толщины морского льда и покрывающего его снега, а также высоты ледяных щитов и ледников мира. Двухчастотный режим работы высотомера (приблизительно 13.5 ГГц в Ku-диапазоне и 35.75 ГГц в Ka-диапазоне с шириной полосы около 500 МГц для каждого) обеспечит более точные измерения, чем это делали предыдущие высотомеры для мониторинга льда (см. рис. 1).



Рис. 1. Artist impression of CRISTAL mission [Credits: ESA]

Один из основных вариантов микроволнового радиометра проекта CRISTAL, известный как усовершенствованный микроволновый радиометр для CRISTAL (AMR-CR), как и другие близкие по конструктиву варианты, предназначен для определения критических атмосферных поправок для основного зондирующего прибора - радиолокационного высотомера IRIS. В частности, AMR-CR будет измерять интегральное содержание водяного пара в атмосфере, поскольку атмосферный водяной пар вызывает задержку сигнала радара, которая, если ее не исправить, приведет к значительным ошибкам в измерениях высот высотомером [1, 6]. Сконструированный как высокочувствительный трассовый радиометр AMR-CR работает «в надир» на трех ключевых частотах: 18.7, 23.8 и 34 ГГц. Эти частоты тщательно подобраны, чтобы обеспечить оптимальную чувствительность к водяному пару и другим составляющим атмосферы. Возможности AMR-CR существенно дополняются за счет совместной работы с более высокочастотным прибором High Resolution Microwave Radiometer (HRMR), который, как и AMR-CR, также работает на линейной поляризации вдоль траектории луча высотомера, т.е. «в надир», на частотах 90, 130 и 168 ГГц. Такая связка двух микроволновых радиометров (AMR-C + HRMR) уже используется на Sentinel-6A и, скорее всего, в варианте (AMR-CR + HRMR) будет установлена на CRISTAL соответственно. Ожидается, что предметно ориентированный в рамках Copernicus Sentinel Expansion Missions проект CRISTAL будет довольно долго играть ключевую роль в спутниковом мониторинге ледяных покровов, ледников и глобального повышения уровня моря [6].

Усовершенствованный микроволновый сканирующий радиометр третьего поколения AMSR3 (JAXA)

Продолжают совершенствоваться и ставшие классическими в спутниковой микроволновой радиометрии системы с механическим сканированием главного лепестка ДНА. Такие микроволновые радиометры нередко работают в паре с аналогично устроенными радиометрами-спектрометрами инфракрасного или видимого диапазонов. Ярким примером подобной аппаратуры является семейство многоканальных микроволновых радиометров: MSU (Microwave Sounding Unit) — AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit) — ATMS (Advanced Technology Microwave Sounder) [2]. В отличие от РМС с поперечным сканированием, системы с «коническим вращением» луча ДНА можно использовать для зондирования, как атмосферы, так и поверхности.

С точки зрения надежности и набора рабочих характеристик интересным представляется результат развития многолетнего технологического проекта Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR): AMSR - AMSR-E – AMSR2 – AMSR3 [7]. Все модификации этой линейки прибора использует коническую геометрию сканирования с фиксированным углом встречи с поверхностью в 55° (к местному зениту), что обеспечивает однородное пространственное разрешение и радиометрическое качество по всей полосе обзора. Первый прибор этого типа (AMSR) был выведен на орбиту в 2002 году. К настоящему времени, различные его модификации успешно отработали в ряде японских и международных миссий. 20 июля 2025 года вышел на номинальную рабочую орбиту новый спутник агентства JAXA “Глобальный спутник наблюдения за парниковыми газами и водным циклом «IBUKI GW» (GOSAT-GW)” с улучшенной и самой современной, на данный момент, версией радиометров данного AMSR-семейства. Антенна усовершенствованного микроволнового сканирующего радиометра нового поколения AMSR3 (см. рис. 2), входящего в состав полезной нагрузки миссии, была установлена на вращение со скоростью 40 оборотов в минуту для обеспечения стабильных наблюдений. Прибор AMSR3, в целом, сам по себе представляет более высокий технологический уровень чем его предшественники, и к тому же работает с большой офсетной параболической антенной диаметром 2 метра, что позволяет достичь ширины полосы обзора более 1530 км [7] и хорошего пространственного разрешения (см. таблицу 1).

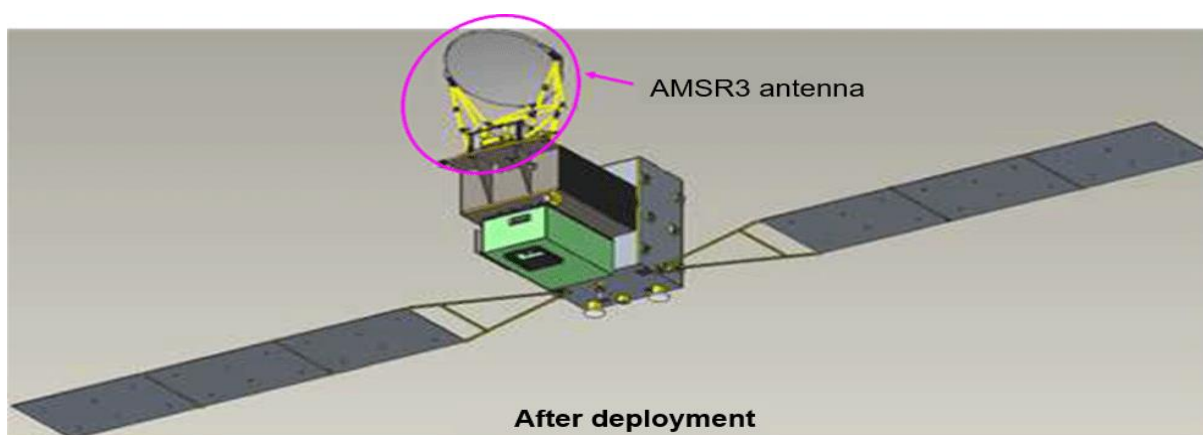


Рис. 2. Внешний вид спутника GOSAT-GW и радиометра AMSR3 после развертывания антенны [JAXA]

Комплекс AMSR3 начал тестовый сбор данных наблюдений в рамках программы первоначальной функциональной проверки бортовой аппаратуры спутника начиная с 11 августа 2025 года. Уже можно отметить, что РМС AMSR3 существенно расширил аппаратные возможности своих предшественников AMSR-E и AMSR2 по обнаружению

снега и других твердых осадков, профилированию водяного пара и мониторинга поверхности суши и океанов. Принципиальным усовершенствованием РМС AMSR3 является его расширенный набор частот (см. таблицу 1), который теперь включает новые высокочастотные «атмосферные» каналы: один на частоте 165.5 ГГц и два канала на частотах 183.31 ± 3 и 183.31 ± 7 ГГц. Эти каналы специально разработаны для улучшения восстановления профилей атмосферного водяного пара и твердых осадков, таких как снег, которые трудно измерить с помощью низкочастотных каналов из-за их нечувствительности ко льду и мелкомасштабным атмосферным деталям.

Таблица 1. Характеристики бортового радиометра AMSR3 (по состоянию на 2025 г.)

Номер канала	Центральная частота	Ширина канала	Поляризация	ΔT	Поле зрения	Пиксель
1	6.925 ГГц	350 МГц	H, V	0.34 К	34x58 км	10x10 км
2	7.3 ГГц	350 МГц	H, V	0.34 К	34x58 км	10x10 км
3	10.25 ГГц	500 МГц	H, V	0.34 К	22x39 км	10x10 км
4	10.65 ГГц	100 МГц	H, V	0.7 К	22x39 км	10x10 км
5	18.7 ГГц	200 МГц	H, V	0.7 К	12x21 км	10x10 км
6	23.8 ГГц	400 МГц	H, V	0.6 К	14x24 км	10x10 км
7	36.42 ГГц	840 МГц	H, V	0.7 К	7x11 км	10x10 км
8	89.0 ГГц (A)	3000 МГц	H, V	1.2 К	3x5 км	5x5 км
9	89.0 ГГц (B)	3000 МГц	H, V	1.2 К	3x5 км	5x5 км
10	165.5 ГГц	3200 МГц	V	1.5 К	4x9 км	5x5 км
11	183.31 ± 7 ГГц	1700 МГц	V	1.5 К	4x8 км	5x5 км
12	183.31 ± 3 ГГц	1470 МГц	V	1.5 К	4x8 км	5x5 км

Приборный комплекс РМС AMSR3 предоставляет возможность (см. Табл.1) приема излучения горизонтальной и вертикальной поляризаций на большинстве своих каналов. Такой подход имеет решающее значение для идентификации различных типов поверхности и атмосферных условий [1, 7]. Пространственное разрешение AMSR3 меняется в зависимости от частоты (см. Табл.1), от приблизительно 3 км x 5 км на частоте 89.0 ГГц до 34 км x 58 км на самых низких частотах (6.925 и 7.3 ГГц), обеспечивая таким образом баланс между мелкомасштабной детализацией и широким охватом области измерений [7]. В целом, РМС AMSR3 является сбалансированным и высоконадежным радиометрическим комплексом в равной мере пригодным для зондирования атмосферы и различных типов поверхности.

Микроволновый радиометр Copernicus Imaging Microwave Radiometer (CIMR)

На современном этапе аппаратной обработки европейский проект CIMR [6] является одним из приоритетных технологических направлений ESA в рамках развития действующей глобальной космической программы ESA Copernicus Sentinel. Данный радиометрический комплекс разрабатывается для проведения ежедневных всепогодных наблюдений с высоким пространственным разрешением, как в полярных областях планеты, так и для глобальных целей общепланетарного характера. Предполагается запустить на гелиосинхронную орбиту высотой 800 – 850 км последовательно 2 спутника: ИСЗ CIMR—А после 2026 года (ориентировочно в период 2027-2029 гг.) и ИСЗ CIMR-В (примерно в 2035 году), чтобы обеспечить непрерывность процесса наблюдений и формирование единой базы данных более чем на 15 лет [6]. Оба спутника оснащаются широкополосным многочастотным радиометром CIMR с 8-метровым вращающимся зеркалом (схема сканирования SMAP), работающим в режиме

конического сканирования в L-, C-, X-, K- и Ka-диапазонах, на частотах 1.41, 6.9, 10.65, 18.7, и 36.5 ГГц, соответственно. В каждом диапазоне реализовано измерение полного поляризационного набора. Чтобы поддерживать значительную полосу обзора (около 1900 км) на протяжении всего орбитального полета, была выбрана т.н. SMAP- схема, когда прибор будет непрерывно вращаться вокруг местной вертикальной оси (см. рис.3) с углом наблюдения (зенитный угол встречи с поверхностью) около 52° для L-диапазона (1.4135 ГГц) и около 55° для остальных.



Рис. 3. Синтезированное изображение CIMR на орбите и схема сканирования поверхности [ESA]

При этом L-диапазон позволит измерять соленость морской поверхности, влажность почвы и параметры волнения и приводного ветра над океаном. C-диапазон (6.875 ГГц) - температуру морской поверхности, температуру поверхности суши и льда, а также измерять параметры морского льда. X-диапазон (10.65 ГГц) – будет задействован в измерении температуры морской поверхности, температуры поверхности суши и льда, а также в измерении параметров морского льда. K-диапазон (18.7 ГГц) и Ka-диапазон (36.5 ГГц) будут задействованы в измерении параметров морского льда и снежного покрова.

На рис. 3 хорошо видно, что конструкция CIMR содержит как черты продвинутого многочастотного комплекса с механическим сканированием главного луча ДНА (см. выше), так и элементы многолучевого панорамного зрения, подобные схеме SAC-D/Aquarius [2]. Подчеркнем, что многочастотный сканирующий радиометр CIMR будет основной полезной нагрузкой – главным приборным комплексом ДЗЗ на борту одноименного ИСЗ. Его задача заключается в непосредственном измерении и формировании потока данных, необходимых для определения значения ключевых переменных окружающей среды, таких как температура поверхности моря (SST), концентрация (SIC) и толщина морского льда, соленость поверхности моря (SSS), параметры снега, влажность почвы, свойства растительности и количество осадков [1,6]. Каждый целевой параметр будет визуализироваться с необходимым для решения конкретной задачи пространственным разрешением. Например, SST предполагается регистрировать с разрешением порядка 15 км и периодом дискретизации менее суток. SIC будет регистрироваться более точно с разрешением около 5 км, также с периодом наблюдений менее суток. SSS также будет наблюдаться с пространственным разрешением 5 км, но с более редким режимом дискретизацией порядка нескольких раз в месяц.

РМС апертурного синтеза. Китайский океанологический спутник «Хайян-4» №01

В число наиболее интересных и уже состоявшихся проектов 2-х предшествующих десятилетий можно отнести разработку, вывод на орбиту, и, в целом успешную эксплуатацию ряда спутников с дециметровый (L-диапазон) РМС на борту. Это европейский проект SMOS (2 ноября 2009г.) с радиометрической системой апертурного синтеза, американо – аргентинский SAC-D/Aquarius (10 июня 2011г.) со скаттерометром и РМС панорамного типа и запущенная 31-ого января 2015 года американская миссия Soil Moisture Mapping mission/Soil Moisture Active and Passive (SMAP). Для всех миссий характерно использование больших антенн оригинальной конструкции. Основной задачей для всех миссий являлось получение информации о глобальных распределениях солености вод Мирового океана и картировании полей влажности суши.

Помимо получения собственно научных данных о глобальном распределении солености Мирового океана и влажности почвы в различных регионах суши, мировое научно-техническое сообщество было крайне заинтересовано исследованием возможностей самой технологии апертурного синтеза на примере первой орбитальной системы такого рода – РМС “MIRAS” на спутнике SMOS [2]. Рассматривался целый ряд проектов с дальнейшим использованием технологии апертурного синтеза для разных частотных диапазонов и рабочих высот от орбиты МКС (~400 км) и до геостационара (35786 км). Однако, несмотря на все усилия, за истекший период был разработан и выведен на рабочую орбиту лишь единственный ИСЗ с РМС апертурного синтеза на борту - китайский океанологический спутник «Хайян-4» №01 (см.рис.4). Проект был утвержден к реализации Государственным управлением оборонной науки, техники и промышленности Китая в ноябре 2020 г., а уже 14 ноября 2024 г. в 06:42 по пекинскому времени (13 ноября в 22:42 UTC) со стартового комплекса №9 Центра космических запусков Тайюань был выполнен успешный пуск РН «Чанчжэн-4В» (CZ-4В №Y53) со спутником «Хайян-4» №01, предназначенным для определения, в первую очередь, солености верхнего слоя океана [5,9]. Аппарат был успешно выведен на орбиту с параметрами:

- наклонение – 98.01°;
- минимальная высота – 632.8 км;
- максимальная высота – 645.1 км;
- период обращения – 97.50 мин.

Спутник разработан в рамках средне- и долгосрочного плана развития национальной гражданской космической инфраструктуры Китая (2015–2025гг.). В области океанологии этот план включает также создание спутников ДЗЗ для максимально полного изучения динамики океана и его непрерывного мониторинга. Спутник для измерения солености усилил подгруппу изучения динамики океана, в рамках которой ранее были запущены спутники для отслеживания изменения цветности и прозрачности, измерения уровня морской поверхности, полей приповерхностного ветра и температуры верхнего слоя воды. Его данные могут использоваться для мониторинга круговорота воды, прогнозирования морской экологии, краткосрочных климатических прогнозов и исследований в области глобального климата, а с учетом информации о влажности почвы – в интересах сельского хозяйства, метеорологии и смежных отраслей.



Рис. 4. Проектный облик ИСЗ «Хайян-4» №01.

На официально опубликованном изображении (рис.4) проектный облик ИСЗ «Хайян-4» №01 представлен в виде базового параллелепипеда с “хвостом” большой панели солнечной батареи и размещением основных элементов измерительного комплекса на надирной и передней сторонах корпуса. Аппарат, в отличие от своего предшественника - спутника SMOS с единственной PMC MIRAS на борту, оснащен двумя основными инструментами многоканального радиометрического зондирования:

- двумерный (2-d) интерферометрический радиометр L-диапазона IMR (Interferometric Microwave Radiometer), созданный по аналогии с прибором MIRAS на европейском спутнике SMOS. Радиометр IMR также имеет Y-образную антенну с 56 приемными элементами (элементами антенной решетки) размещенную на надирной плоскости спутника. Рабочая частота 1.4 ГГц, ширина снимаемой полосы 935 км, радиометрическое разрешение 1.6 К, пространственное – около 35-40 км;

- пассивно-активная система MICAP (Microwave Imager Combined Active and Passive) включает одномерные (1-d) интерферометрические радиометры L-, C- и Ka-диапазонов (1.4, 6.9 и 18.7 ГГц соответственно) и скаттерометр L-диапазона (1.26 ГГц) с цифровым формированием луча. Все эти устройства работают через общую антенну в виде сегмента цилиндра длиной 5.5 м и шириной 3 м, ориентированного поперек направления полета. Поле зрения инструмента свыше 1000 км, пространственное разрешение в направлении вдоль трассы составляет для указанных диапазонов 65, 15 и 5 км, а чувствительность по яркостной температуре – 0.1 К в диапазоне L и 0.5 К в остальных.

Оба радиометрических инструмента, включая и активный радиолокационный датчик - скаттерометр L-диапазона (1.26 ГГц), работают совместно, что позволяет существенно улучшить качество конечного продукта по сравнению с вариантом PMC MIRAS на спутнике SMOS [5,9,10]. При этом радиометр IMR имеет лучшее пространственное разрешение (около 35 км), в то время как радиометр L-диапазона в составе MICAP имеет гораздо лучшую радиометрическую чувствительность благодаря большему времени накопления (см. выше). Радиометры C- и Ka-диапазона позволяют более точно учитывать влияние вариаций температуры поверхностного слоя воды и поля приводного ветра в алгоритме обработки, скаттерометр также предоставляет необходимую информацию о волнении и ветре, а дополнительная аппаратура мониторинга радиоспектра отслеживает источники искусственных радиоизлучений, таких как навигационные спутники и средства мобильной связи и т.п. Разработчикам пришлось

немало поработать над созданием точных и стабильных приемников L-диапазона, средств калибровки радиометра, электромагнитной совместимостью активных и пассивных компонентов, а также над технологией разработки и развертывания больших антенн.

Заключение

В мировом научно-техническом сообществе спутниковая СВЧ (микроволновая) радиометрия по-прежнему воспринимается как краеугольный камень глобальной системы наблюдений за климатом. РМС космического базирования предоставляют беспрецедентные возможности для непрерывного мониторинга основных климатических переменных в региональном и глобальном масштабах. Для мониторинга текущей метеообстановки и краткосрочного (3-5 суток) прогнозирования ее изменений особое значение имеет зондирование атмосферы в высокочастотной части СВЧ диапазона (выше 20 ГГц). Это направление, включая реализацию алгоритмов совместной обработки с данными зондирования в ИК и видимом диапазонах, развивается наиболее активно. Вместе с тем, несмотря на ряд существующих физических ограничений и технических трудностей, не снижается интерес к радиометрическому зондированию поверхности Земли в сантиметровом и дециметровом диапазонах (частоты от 1 до 15 ГГц). Идет постоянная борьба за улучшение показателей пространственного и радиометрического разрешений, ширины полосы захвата, уровня сторонних шумов и т.д.

Современные разработки СВЧ радиометрических систем нового поколения, такие как AMR-CR, AMSR3, CIMR и «Хайянь-4» обещают значительно расширить возможности ДЗЗ и повысить результативность наблюдений за счет существенного улучшения технических характеристик радиометров, включая расширение спектра рабочих частот, уменьшения пространственного разрешения, совершенствование элементной базы и антенных систем. Представленные в данной работе материалы свидетельствуют о наличии у мирового научно-технического сообщества, включая разработчиков аппаратуры и потребителей конечного продукта, долгосрочного интереса к развитию данной научной тематики и продолжению поиска оптимальных вариантов конструкции многоканальных спутниковых РМС, предназначенных как для исследования атмосферы, так и для радиотеплового зондирования поверхности суши и Мирового океана.

Литература

1. Кутуза Б.Г., Данилычев М.В., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности // М.: Ленанд, 2024 г., 338 с. ISBN 978-5-9710-5229-6.
2. Данилычев М.В., Кравченко В.Ф., Кутуза Б.Г., Чуриков Д.В. Спутниковые СВЧ радиометрические комплексы дистанционного зондирования Земли. Современное состояние и тенденции развития // Физические основы приборостроения, 2014, т.3, №1, с. 3-25.
3. Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США (NASA). URL: <https://www.nasa.gov/> (дата обр. 06.05.2026).
4. Национальная администрация по океаническим и атмосферным исследованиям США (NOAA). URL: <https://www.noaa.gov/> (дата обр. 06.05.2026).
5. Китайское национальное космическое управление (CNSA). URL: <https://www.cnsa.gov.cn/english/index.html> (дата обр. 06.05.2026).
6. Европейское космическое агентство (ESA). URL: <https://www.esa.int/> (дата обр. 06.05.2026).
7. Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA). URL: <https://global.jaxa.jp/>

8. Индийская организация космических исследований (*ISRO*). URL: <https://www.isro.gov.in/> (дата обр. 06.05.2026).
9. Новости космонавтики. URL: <https://novosti-kosmonavtiki.ru/articles/206009/> (дата обр. 06.05.2026).
10. Yan Li, Mingsen Lin, Xiaobin Yin and Wu Zhou Analysis of the Antenna Array Orientation Performance of the Interferometric Microwave Radiometer (IMR) Onboard the Chinese Ocean Salinity Satellite // *Sensors* 2020, 20, 5396; doi:10.3390/s20185396