

ПАССИВНОЕ МИКРОВОЛНОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ И ПЛАНЫ НА БУДУЩЕЕ

Е.А. Шарков

*Институт космических исследований РАН
E-mail: esharkov@iki.rssi.ru*

Стремительное внедрение за последние 10–15 лет методов и средств микроволнового зондирования при аэрокосмических наблюдениях явилось следствием принципиально новой (по отношению к оптическому и инфракрасному диапазонам) физической информативности микроволнового зондирования при изучении земных объектов (поверхности и атмосферы). Развитие и эволюция приборного парка и научно-исследовательских проектов микроволнового зондирования происходило, разумеется, весьма неоднородным и неравномерным образом. Тем не менее на сегодняшний день ни одна потенциальная крупная спутниковая миссия по исследованию Земли не обходится без включения в нее пассивных и активных радиофизических приборов в той или иной конфигурации. В настоящей работе анализируются некоторые исторические элементы развития микроволновых миссий (включая вопросы развития приборного парка), современное состояние и некоторые планы на будущее.

Введение

Включение в 1970-е гг. прошедшего столетия методов и средств микроволновой диагностики в аэрокосмические наблюдения явилось, несомненно, знаменательной вехой в развитии всего дистанционного зондирования Земли. Изучение и понимание микроволновых образов системы земная поверхность – атмосфера обеспечили принципиально иную (чем при использовании только оптического и инфракрасного диапазонов) физическую информативность микроволнового зондирования при изучении земных объектов. Именно это обстоятельство кардинально изменило как облик потенциальных спутниковых систем, предназначенных для зондирования Земли, так и характер и информативную насыщенность всего дистанционного зондирования. Очевидные достоинства микроволновой диагностики — возможность получения информации в любое время суток, широкий погодный диапазон, независимость от солнечного освещения — привлекли к ним внимание большого числа исследователей. Причем, в целом ряде случаев именно эти обстоятельства были решающими на первых этапах внедрения радиофизических методов в задачи дистанционного зондирования. Однако дальнейшее развитие этих методов показало, что принципиальная значимость введения радиофизических методов в дистанционное зондирование лежит совсем в другой плоскости, а именно, в дифракционной природе взаимодействия электромагнитных волн микроволнового диапазона с шероховатыми элементами земной поверхности и с метеоструктурами в земной атмосфере, и, с другой стороны, с особенностями квантового излучения физических объектов газовой фазы в микроволновом диапазоне (*Sharkov, 2003*).

Развитие и эволюция приборного парка и научно-исследовательских проектов микроволнового зондирования происходило, разумеется, весьма неоднородным и неравномерным образом. Тем не менее ситуация на сегодняшний день в дистанционном зондировании такова, что ни одна потенциально крупная спутниковая миссия по исследованию Земли не обходится без включения в нее пассивных и активных радиофизических приборов в той или иной конфигурации. В настоящей работе анализируются некоторые исторические элементы развития микроволновых миссий (включая вопросы развития приборного парка), современное состояние и некоторые планы на будущее.

1. Элементы истории микроволнового зондирования

Изучение и понимание микроволновых образов системы земная поверхность – атмосфера кардинально изменило как облик существующих спутниковых систем, предназначенных для зондирования Земли, так и характер и информативную насыщенность всего дистанционного зондирования. Однако первоначально микроволновая радиометрия зарождалась в недрах радиоастрономии как своего рода вспомогательное направление, призванное обеспечивать нужды наземной радиоастрономии, которая в 1940–50-е гг. прошлого столетия проходила этап становления и бурного развития. В первую очередь, здесь шла речь об исключении влияния дисперсной составляющей (а затем и газовой составляющей) излучения атмосферы в микроволновом диапазоне на высокоточные радиоастрономические измерения, проводимые с поверхности Земли. На это и были направлены специальные методики проведения радиоастрономических экспериментов (например, метод диаграммной модуляции) (*Есепкина и др.*, 1973). По этим причинам первые микроволновые исследования базировались целиком на аппаратурной основе и на методологической основе радиоастрономии.

Первые микроволновые исследования радиоизлучения атмосферы были выполнены профессором Дике в 1946 г. на длине волны 1,5 см при помощи предложенного им же модуляционного метода измерения шумового сигнала. Указанный метод и способ построения аппаратуры активно стал развиваться и совершенствоваться радиоастрономами в самых различных диапазонах электромагнитного спектра (*Троцкий*, 1951; 1954).

Однако дальнейшее развитие и освоение короткосантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн поставило на повестку дня проблемы детального спектрального исследования характеристик распространения радиоволн в атмосфере и плазмopodobных средах и собственного излучения геофизических сред в этих диапазонах (*Жевакин, Наумов*, 1967; *Башаринов и др.*, 1968). Стали подвергаться серьезной реконструкции как сама приборная база радиоастрономии, так и методики измерений. В первую очередь, это было связано с малым временем наблюдения исследуемого объекта (малым временем накопления) и ярко выраженными поляризационными свойствами геофизических объектов. Встала также проблема создания достаточно малогабаритных приборов и антенных систем, которые должны быть расположены на движущихся платформах и на летательных аппаратах. Радиоастрономические приборные стационарные комплексы и методики стационарных (наземных) измерений необходимым требованиям явно не удовлетворяли. Как ни удивительно, но исторически первым выходом в космос микроволновой аппаратуры явился запуск космического корабля MARINER-2 в 1962 г. для исследования структуры и физико-химического состава облачных слоев Венеры (а именно, поиск водяного пара) при помощи двухчастотной методики, которая станет впоследствии совершенно стандартной и общепринятой в системе космических зондирующих атмосфер Земли. Естественный (как мы теперь знаем) отрицательный научный результат миссии был, тем не менее, важным шагом в исследовании планет, и он подтвердил научную значимость микроволнового зондирования в бортовом исполнении.

В середине 1960-х гг. начался трудный этап формирования микроволнового зондирования как самостоятельного направления – был создан целый ряд радиометрических комплексов самолетного и аэростатного базирования для метеорологических исследований и военно-технического применения (см. *Ходырев и др.*, 1972). Важным шагом этого этапа были создание впервые в СССР многочастотного бортового радиотеплового комплекса и установка его на ИСЗ «Космос-243», который был запущен в 1968 г. Значение этого космического эксперимента трудно переоценить. По существу, была продемонстрирована принципиальная возможность получения физической и геофизической информации при помощи радиотепловых систем из космоса. Кроме того, были получены серьезные научные результаты по соотношению глобального интегрального содержания водяного пара и жидко-

капельной воды в атмосфере, а также ряд других. Этот космический эксперимент был повторен в 1970 г. на ИСЗ «Космос-384». Однако при этом стали очевидны и ограничения использованной измерительной методологии, а именно — чисто трассовый режим измерений при установке антенного луча строго в нади́р. При таком режиме наблюдения невозможно получить пространственную карту распределения поля излучения геофизических объектов и их поляризационные характеристики.

Важным шагом в этом направлении было создание и запуск на ИСЗ NIMBUS-5 (1972) панорамного сканирующего радиотеплового комплекса ESMR на частоте 19,35 ГГц с полосой обзора 3000 км и мгновенным пространственным разрешением 29 км. Сканирование осуществлялось поперек трассы движения аппарата при помощи электронной фазированной решетки. Вторым комплексом был первый вариант радиотеплового зондировщика, который включал три канала в 5-мм линии кислорода и два канала для зондирования по двухчастотной методике. Этот комплекс работал в трассовом режиме. На этом этапе, по существу, произошло формирование и разделение микроволновых систем наблюдения на системы трассового типа, панорамного (или сканерного) типа и измерительные системы (или атмосферные зондировщики) (рис. 1). В дальнейшем эта тенденция укрепилась. Однако, в свою очередь, каждый из этих каналов продолжал работать в режиме моноконфигурационного типа, т. е. одна частота / одна поляризация / один угол.



Рис. 1. Системы микроволнового зондирования первоначального этапа

Помимо использования сантиметрового диапазона, в 1973 г. была предпринята попытка создания бортового радиометра дециметрового диапазона (длина волны 21 см) с угловым разрешением 150° и работы этой системы на борту КК Skylab. На этой же станции был установлен радиотепловой комплекс сантиметрового диапазона с антенной системой параболического типа со значительной апертурой (диаметр 117 см) и механическим сканированием.

Следующим шагом в микроволновом зондировании было включение поляризационных измерений — на ИСЗ «Метеор» (1974) в трассовом режиме и на ИСЗ NIMBUS-6 прибор ESMR (37 ГГц) панорамного типа работал в режиме двух поляризаций. Зондировщик SCAMS также уже работал в сканерном режиме. Важно заметить, что в микроволновой системе ESMR последний раз использовалась фазированная решетка в качестве сканирующей антенной системы. Связано это, в первую очередь, с большими электромагнитными потерями в системе управления лучом и, соответственно, большим шумовым вкладом в измеряемый сигнал. Кроме того, определенные сомнения были у специалистов по поводу выбранного типа сканирования поперек трассы движения. Это связано с тем, что элементы исследуемой поверхности рассматриваются в одном кадре под различными углами и, поскольку земная и морская поверхность обладают в микроволновом диапазоне ярко выраженными (в отличие от оптического и ИК-диапазонов) поляризационными свойствами, то

возникает серьезная неопределенность в интерпретации микроволновых изображений. Эта проблема была решена разработкой и введением нового типа сканирования, а именно — конусного типа, когда все элементы исследуемой поверхности наблюдаются под строго фиксированным углом. Разработанный многочастотный (пять частот) и двухполяризационный (вертикальная и горизонтальная) панорамный комплекс SMMR был запущен в 1978 г. сразу на двух КА — NIMBUS-7 и SEASAT (Njoku et al., 1980). Если КА SEASAT проработал всего три месяца, то NIMBUS-7 успешно функционировал девять лет (до 1988 г.). По данным радиотеплового комплекса SMMR была получена целая серия интересных результатов по исследованию состояния поверхности Мирового океана, снежного и ледового покровов, влажности почв и грунтов. Несомненно, успешное функционирование радиотеплового комплекса SMMR знаменовало собой конец первоначального этапа (1968–1978) и начало современного этапа микроволнового космического зондирования в сантиметровом и миллиметровом диапазонах.

Не оставлялись, однако, попытки продвинуться и в дециметровый (и даже в метровый) диапазон с приемлемыми пространственными разрешениями. Так, успешный запуск и функционирование на российской обитаемой космической станции «Салют-6» в 1979 г. космического раскладывающегося радиотелескопа КРТ-10 с диаметром антенного зеркала 10 м и на длинах волн 72 и 12 см (Данилов и др., 1979) породили среди российских и зарубежных специалистов в конце 1970-х гг. надежды на быструю реализацию амбициозных проектов по созданию гигантских радиоантенн с диаметром зеркала от 100 м до 10 км (!) (Буякос и др., 1978; Card et al., 1978; Blume et al., 1978) для задач радиоастрономии и микроволнового радиозондирования. Однако этим надеждам не суждено было сбыться. И лишь в самое последнее время аналогичные проекты стали активно обсуждаться в научной прессе (Wilson et al., 2000), а проект «Радиоастрон» (Кардашев, 2000) находится на стадии промышленного исполнения.

2. Современные микроволновые миссии и тенденции их развития

Рассмотрим кратко основные космические миссии по изучению и мониторингу геофизических и метеорологических параметров системы океан – атмосфера. Главной особенностью этих миссий является непременно включение в состав аппаратурных комплексов пассивных микроволновых систем как основного наблюдательного элемента дистанционных систем (рис. 2).

Миссия DMSP. Программа DMSP (запуск в 1987 г.), курируемая Министерством обороны США, направлена на исследование задач океанографии и солнечно-земной физики и с успехом длится более 15 лет. Каждый из спутников этой серии находится на полярной солнечно-синхронной орбите, пересекает каждую точку поверхности Земли два раза в сутки и обеспечивает полное покрытие поверхности каждые шесть часов. Специальная оптическая и тепловая ИК-системы обеспечивают съемки как освещенного, так и ночного полушарий Земли. Главной дистанционной системой миссии является микроволновый комплекс — четырехчастотный и семиканальный сканер SSM/I, работающий на частотах 19,35; 22,235; 37,0 и 85,5 ГГц (табл. 1). Данные используются для получения синоптических карт атмосферных, океанологических параметров и ряда параметров суши, например, поле приповерхностного ветра, покрытие льдом поверхности океанов, осадки над океаном и суши, интегральное водосодержание в атмосфере капельной влаги, влажность почв, покрытие снегом. Второй микроволновый прибор SSM/T является зондировщиком и имеет пять каналов около частоты 183,31 ГГц. Прибор предназначен для глобального мониторинга содержания водяного пара при любых атмосферных условиях. Дальнейшее развитие эти технологии получили в определенном синтезе прибора сканер-зондировщик SSMIS на борту спутника DMSP F16 и в планах создания приборного комплекса CMIS (Flaming, 2000).

Современное состояние микроволновой радиометрии

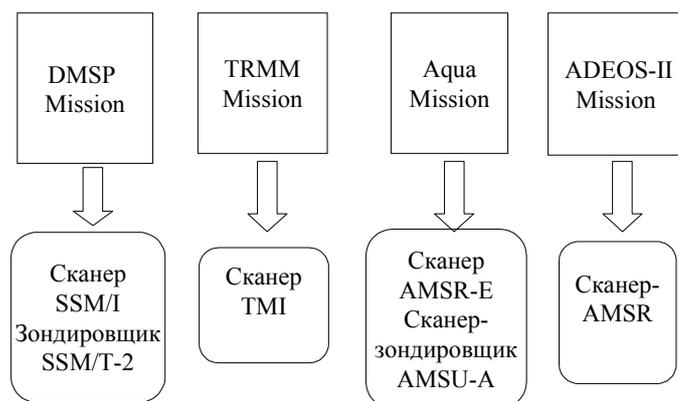


Рис. 2. Современные космические микроволновые комплексы

Таблица 1. Характеристики спутниковых микроволновых систем

Параметр	Прибор				
	SSM/I	TMI	AMSU-A	AMSR-E	AMSR
Полоса обзора, км	1400	760	1650	1445	1600
Элемент разрешения	15–60	6–50	40	5–60	5–50
Частота, ГГц	19,3–85,5 4 канала	10,7–85,5 5 каналов	15–90 15 каналов	6,9–89 6 каналов	6,9–89 8 каналов
Год запуска, спутник	1987, DMSP	1997, TRMM	2002, AQUA	2002, AQUA	2002, ADEOS-II

Миссия TRMM. Интернациональная (США, Япония и еще ряд стран) миссия (запуск в 1997 г.) призвана выполнять достаточно специфическую задачу — мониторинг полей осадков в тропической зоне земной атмосферы при помощи синхронно работающих активного (радиолокационного), пассивного (радиотеплового) и оптических сканеров. Для выполнения задач была выбрана низкая орбита (350 км) и наклонение 35°.

Пассивный микроволновый сканер TMI, работающий на четырех частотах (см. табл. 1) и двух поляризациях, совместно с активным радиолокатором обеспечивает первичный набор данных для измерения поля осадков.

Миссии AQUA и ADEOS-II. Космические аппараты рассматриваемых миссий были выведены на орбиты практически одновременно (в 2002 г.) и содержат как основной приборный элемент многочастотный радиотепловой комплекс (AMSR-E на КА AQUA и AMSR на КА ADEOS-II) с очень близкими параметрами (см. табл. 1). Главной особенностью этого комплекса является введение низкочастотных каналов (до 6,9 ГГц) и повышенная разрешающая способность (до 5 км). Две поляризации принимаются на всех частотных каналах в режиме конического сканирования. Помимо указанного комплекса на КА AQUA установлен 15-канальный микроволновый зондировщик AMSU-A, предназначенный для детального анализа профиля температуры как в нижней тропосфере, так и в стратосфере (до 40 км). В качестве зондировщика профиля водяного пара на этом аппарате установлен четырехчастотный микроволновый прибор (HSB), при этом один канал настроен на частоту 150 ГГц, а три других канала — на частоты, близкие к 183 ГГц.

После ряда наладочных процедур оба аппарата в настоящее время работают в оперативном режиме.

3. Потенциальные космические микроволновые миссии

В настоящее время потенциальные направления развития систем микроволнового зондирования достаточно многообразны (рис. 3). Это диктуется как необходимостью решения конкретных геофизических и гидрометеорологических задач, так и логикой развития самих радиофизических систем и методов обработки дистанционного сигнала.

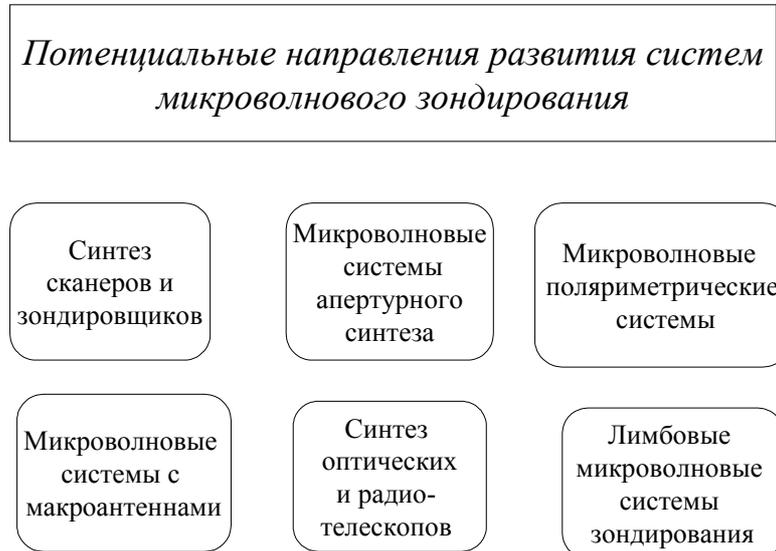


Рис. 3. Потенциальные направления развития космических микроволновых систем

На рис. 3 представлен ряд потенциальных направлений развития космических микроволновых систем. Во-первых, следует отметить направление, связанное с естественным синтезом систем сканерного типа и зондировщиков. Второе важное направление связано с попытками сформировать радиотепловые изображения, наподобие того, как это используется в радиоастрономии и активном апертурном синтезе. Особый класс наблюдательных приборов в настоящее время представляют собой радиотепловые системы, регистрирующие тонкие поляризационные (дифракционные) эффекты в собственном излучении от сложных шероховатых поверхностей (морская поверхность). Геофизические гидрологические задачи и океанологические задачи по изучению полей солености Мирового океана приводят к необходимости рассмотреть класс микроволновых систем с макроантеннами, т. е. с размерами апертур, достигающими 10–12 м и более. Естественным направлением является также рассмотрение возможностей комплексирования оптических и микроволновых систем (в короткомиллиметровом и субмиллиметровом диапазонах) в единый блок своего рода оптикорадителескопа. Исследование газовых компонент и следов водяного пара в стратосфере и нижней термосфере приводит к необходимости использования особого метода наблюдения, а именно скользящего (лимбового) метода измерения собственного радиотеплового сигнала.

Кратко представим ряд потенциальных космических миссий по изучению и мониторингу геофизических и метеорологических систем Земли по направлению синтеза сканеров и зондировщиков, по апертурному синтезу и систем с макроантеннами. Каждая из этих миссий находится на совершенно различных стадиях подготовки — от готового к запуску летного образца до проведения проектных и технологических работ. Каждая из этих миссий направлена на решение различных геофизических и гидрометеорологических задач, но при этом важнейшим элементом каждой миссии является включение в ее состав микроволновых пассивных комплексов как главной составной части космической наблюдательной системы.

Синтез сканеров и зондировщиков

Целый спектр потенциальных миссий предназначен для решения поставленной задачи. В первую очередь, здесь надо отметить российский проект комплекса МТВЗА-ОК, который будет выведен на орбиту на украинском ИСЗ «Сич-1М». Важно отметить, частотные каналы сканерного типа (9 частот) от 6,9 до 89 ГГц и каналы измерительного типа (13 частот) будут совмещены на одну антенну, и таким образом полосы наблюдения обоих типов будут совмещены.

Миссия МТВЗА-ОК (РФ), ИСЗ «Сич-1М» (Украина)

- Частотные каналы (сканерного типа) — 6,9; 10,6; 18,7; 23,8; 31; 36,5; 42; 48; 89 ГГц. Каждый канал с двумя поляризациями.
- Частотные каналы измерительного типа — 10 каналов в полосе поглощения кислорода 5 мм; 3 канала в полосе поглощения водяного пара (183 ГГц).
- Основная апертура антенны — 60 см.
- Полоса конического обзора — 2000 км.
- Элемент разрешения — от 7 до 200 км.
- Угол наблюдения (на поверхности Земли) — 65°.

Важным направлением будущей американской программы наблюдения и мониторинга поверхности и атмосферы Земли является разработка и создание новой (начиная с 2008 г.) системы спутников дистанционного наблюдения оперативного типа (NPOESS) (рис. 4). Эта система будет базироваться на опыте и аппаратурных достижениях известных систем NOAA и DMSP. Причем отметим, что основную роль в этих наблюдательных системах будут играть радиотепловые системы, объединенные в комплекс сканера-зондировщика CMIS (*Flaming*, 2000). По мере разработки настоящего комплекса количество измерительных каналов (частота – поляризация) стремительно нарастает и к концу 2003 г. составило фантастическое число — 77. И, видимо, это не предел.

Микроволновый сенсор Conical Microwave Imager/Sounder (CMIS) (США)

- Частотные каналы (сканерного типа) — 6, 10, 18, 23, 36, 89 ГГц. Каждый канал с двумя поляризациями.
- Частотные каналы измерительного типа — в полосе поглощения кислорода 5 мм и в полосе поглощения водяного пара 183 ГГц.
- Поляриметрический канал (параметры Стокса) — 18 ГГц.
- Измерительные каналы — 77.
- Два рефлектора с апертурами 220 и 70 см.
- Полоса конического обзора — 1700 км.
- Элемент разрешения — от 7 до 200 км.
- Угол наблюдения (на поверхности Земли) — 53–58° (рис. 4).

Интересно проанализировать эволюцию параметров микроволновых систем за последние 15–20 лет (табл. 2). Первым и важным обстоятельством является резкое возрастание числа измерительных каналов от 7 (у прибора SSM/I) до 77 (у будущего комплекса CMIS). Также существенно увеличиваются апертуры антенных систем от 60 до 220 см. При этом, несомненно, технологические достижения позволяют общую массу аппаратуры увеличить всего в пять раз, так же как и потребляемую мощность. Обращает на себя внимание и возрастание уверенного времени жизни комплексов.

Важно отметить, что, помимо оперативных систем комплексного типа (т. е. предназначенного для мониторинга всей поверхности земного шара), в настоящее время разрабатываются наблюдательные космические системы для специализированных (и довольно

специфических) научных задач и для конкретных регионов. В качестве примеров рассмотрим проект ESA CLOUDS и совместный проект CNES/ISRPO MEGHA-TROPIQUES (рис. 5, 6).

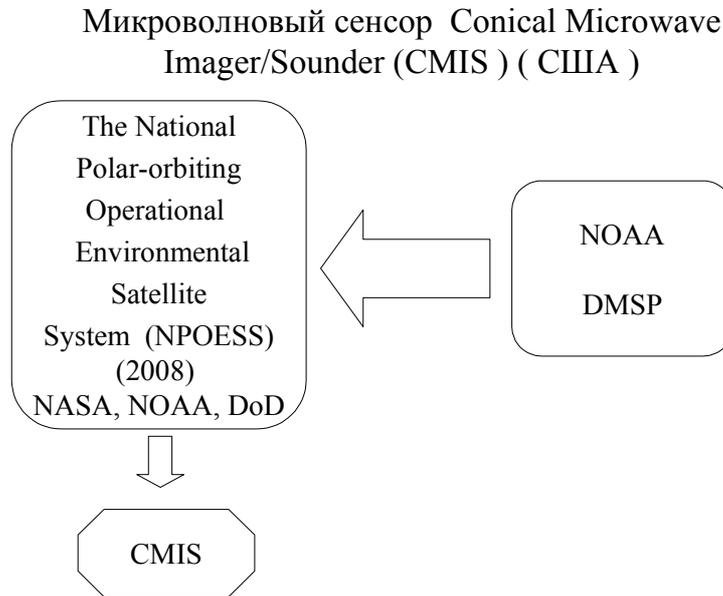


Рис. 4. Проект NPOESS

Таблица 2. Эволюция микроволновых систем

Параметр	Прибор				
	SSM/I	TMI	SSMIS	AMSR-E	CMIS
Диаметр антенны, м	0,6	0,6	0,7	1,6	2,2
Число измерительных каналов	7	9	24	12	77
Масса, кг	56	62	96	324	250
Мощность, Вт	45	50	135	350	225
Время жизни, лет	3	3	5	6	7

Цель проекта ESA CLOUDS — разработка нового поколения спутниковых систем для детального и длительного мониторинга облачных систем и связанных с ними радиационных процессов. Важными приборами на этом комплексе являются миллиметровый и субмиллиметровый сканер (CIWSIR) для исследования структуры ледяных облаков и содержания водяного пара (рис. 5) и сканер-зондировщик (CLAPMIR), объединяющий функции сканера с достаточно стандартным набором частот и зондировщика.

Целью проекта MEGHA-TROPIQUES является разработка нового поколения спутниковых систем для быстрого мониторинга конвективных тропических облачных систем и связанных с ними массо и энергообмена в тропической зоне (рис. 6). В виду специфической задачи исследования тропической зоны орбитальные параметры спутника предполагаются достаточно неординарными — наклон орбиты должен составлять 220°, а время просмотра элемента поверхности — около 2 ч. Микроволновый прибор SAPHIR предназначен в первую очередь для измерения содержания водяного пара (с приемлемой точностью 10–20 %) в нижней тропосфере в присутствии облачных систем. Микроволновый прибор MADRAS предназначен для изучения и мониторинга конвективных облачных систем и выпадающих из них осадков.

Cloud and Radiation monitoring satellite (CLOUDS) project (ESA)

Цель проекта — разработка нового поколения спутниковых систем для детального и долговременного мониторинга облачных систем и связанных с ними радиационных процессов.

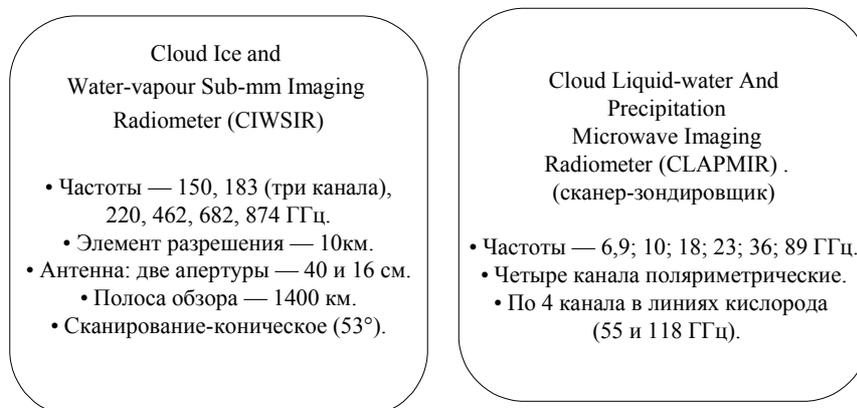


Рис. 5. Проект CLOUDS

MEGHA-TROPIQUES project (CNES/ISRPO)

Цель проекта — разработка нового поколения спутниковых систем для быстрого мониторинга конвективных тропических облачных систем и связанных с ними массо- и энергообмена в тропиках (наклонение орбиты — 22°, время обзора — до 2 ч).

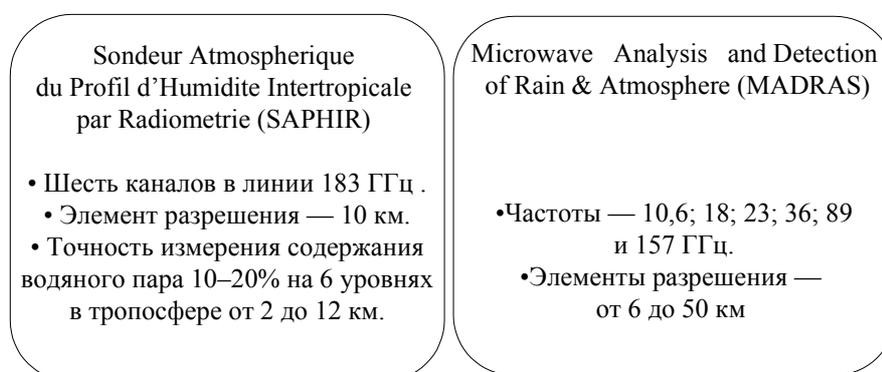


Рис. 6. Проект MEGHA-TROPIQUES

Микроволновые системы апертурного синтеза

- Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission (ESA).
— Требования I этапа (ESA) — пространственное разрешение от 30–60 км для диапазона 21 см (L-band).
— Требования II этапа (NASA) — пространственное разрешение 10 км.
- GEO/SAMS Mission (NASA).
— Synthetic thinned array radiometry (STAR) technology. Антенна — решетка облучателей в виде буквы Y.
— Антенна — случайное поле небольших антенн (либо фиксированных, либо перемещающихся хаотическим образом в пространстве (покрытие плоскости UV)).

Целый спектр гидрологических задач, а также проблемы мониторинга полей солёности Мирового океана приводят к принципиально необходимости привлечения микроволновых систем дециметрового диапазона волн, именно там, где собственное излучение земных покровов чувствительно как к содержанию объёмной влаги, так и содержанию солей в растворах (морская вода). Наиболее оптимальным частотным диапазоном, исходя из целого ряда требований, является диапазон 21 см (L-band). Однако при этом возникает серьёзная проблема пространственного разрешения. Для задач указанного типа ESA установило некоторый предел для пространственного разрешения в 30–60 км, в то время как NASA рассчитывает на потенциальное разрешение в 10 км. Существующие в настоящее время спутниковые апертуры антенн позволяют получить в этом частотном диапазоне пространственное разрешение около 120–160 км, что, разумеется, не может считаться удовлетворительным.

Несомненные успехи радиоастрономии в задачах апертурного синтеза внеземных радиоисточников послужили стимулом к активному рассмотрению методических и аппаратных вопросов синтеза радиотеплового изображения при наблюдении поверхностных покровов Земли из космоса. В настоящее время прорабатывается целый спектр разнообразных подходов, начиная от классического подхода в радиоастрономии при построении решетки единичных облучателей в виде буквы “У”, до сложных систем в виде случайного поля небольших антенн (фиксированных или перемещающихся в пространстве). Однако, несмотря на значительные материальные и научные усилия в этой области, следует признать, что до настоящего времени не получены практически значимые результаты.

Микроволновые активно-пассивные системы с макроантеннами

Ocean-salinity Soil-moisture Integrated Radiometer-radar Imaging System (OSIRIS):

- Частоты радиометра — 1,41 и 2,69 ГГц.
- Поляризации — В и Г (для 1,41 ГГц — режим поляриметрический).
- Частота радара — 1,26 ГГц.
- Поляризации радара — ГГ, ВВ, ГВ, ВГ.
- Апертура антенны — 600 см (1200 см).
- Элемент разрешения — 35×45 км.
- Угол наблюдения — 40°.
- Полоса сканирования — 900 км.

Определенные сложности, возникшие при проектировании систем апертурного синтеза, заставили разработчиков микроволновых систем вернуться к своего рода классическому пути, а именно — к созданию микроволновых систем с антеннами больших размеров. Используемые технологические приемы для формирования больших апертур достаточно разнообразны — от металлизированных надувных оболочек до решетчатых раздвижных структур. Интересным примером может служить активно-пассивная микроволновая система OSIRIS, обладающая двумя частотными каналами на прием собственного излучения, и многополяризационный скаттерометр, работающий в этом же диапазоне длин волн.

Заключение

Стремительное внедрение за последние 10–15 лет методов и средств микроволновой диагностики в аэрокосмические наблюдения явилось следствием принципиально новой (по отношению к оптическому и инфракрасному диапазонам) физической информативности микроволнового зондирования при изучении земных объектов (поверхности и атмосферы). Развитие и эволюция приборного парка и научно-исследовательских проектов микровол-

нового зондирования происходили, разумеется, весьма неоднородным и неравномерным образом. Тем не менее, как мы видим, на сегодняшний день ни одна потенциальная крупная спутниковая миссия по исследованию Земли не обходится без включения в нее пассивных и активных радиофизических микроволновых приборов в той или иной конфигурации. Несомненно, эта тенденция сохранится и в ближайшей перспективе. И, более того, относительный вес микроволновых систем наблюдения в общей системе дистанционного зондирования, скорее всего, будет, без сомнения, увеличиваться.

Литература

Башаринов А. Е., Тучков Л. Т., Поляков В. М., Ананов Н. И. Измерения радиотепловых и плазменных излучений в СВЧ-диапазоне. М.: Совет. радио. 1968. 320 р.

Буякос В. И., Гвамичава А. С., Гориков Л. А. и др. Неограниченно наращиваемый космический радиотелескоп // Космич. исслед. 1978. Т. 16. № 6. С. 924–936.

Данилов Ю., Кулешов Ю., Рудаков В. Первый космический радиотелескоп // Наука и жизнь. 1979. № 11. С. 2–6.

Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. М.: Наука. 1973. 250 с.

Жевакин С. А., Наумов А. П. Распространение сантиметровых, миллиметровых и субмиллиметровых волн в земной атмосфере // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1967. Т. 10. № 9-10. С. 1213–1243.

Кардашев Н. С. Радиотелескоп больше Земли («Радиоастрон») // Земля и вселенная. 2000. № 4. С. 3–10.

Троицкий В. С. К теории измерения слабых сигналов с протяженным спектром // Журн. технич. физики. 1951. Т. 21. № 3. С. 994–1003.

Троицкий В. С. К теории радиоизлучения Луны // Астрономич. журн. 1954. Т. 31. № 6. С. 511–528.

Ходырев Ю. К., Беспалова Е. А., Пашин Ю. Н., Полянина Г. Д., Серебрякян А. Л., Струков И. А., Шахно О. Ф., Шарков Е. А., Эткин В. С. Вопросы применения радиофизических методов для изучения атмосферы и поверхности Земли с помощью космических аппаратов. М.: ИКИ РАН. Препринт Пр-112. 1972. 50 с.

Blume H., Kendall B., Swift C. Advanced systems requirements for ocean observations via microwave radiometers // AIAA Paper. 1978. N 1737. P. 6.

Njoku E. G., Stacey J. M., Barath F. T. The Seasat scanning multichannel microwave radiometer (SMR): instrument description and performance // IEEE J. Ocean. Eng. 1980. V. 5. N 2. P. 100–115.

Card M., Kruszewskii E., Guanstaferro A. Technology assessment and outlook // Astronautics and Aeronautics. 1978. V. 16. N 10. P. 48–54.

Flaming M. The conical microwave imager sounder // The Earth Observer. 2000. V. 132, N 3. P. 18–21.

Sharkov E. A. Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: Physical Foundations. Springer/PRAXIS. ISBN 3-540-43946-3. Berlin, Heidelberg, New York, Paris, Tokyo. 2003. 612 p.

Wilson W. J., Njoku E. G., Yueh S. H. Active/passive microwave system with deployable mesh antenna for spaceborne ocean salinity measurements // Proc. IEEE IGARSS'2000. V. VI. N. Y. 2000. P. 2549–2551.