

МИКРОВОЛНОВЫЙ СКАНИРУЮЩИЙ РАДИОМЕТР-ПОЛЯРИМЕТР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

А.В. Кузьмин, М.Н. Поспелов, Ю.Б. Хапин, Е.А. Шарков

*Институт космических исследований РАН,
117997 Москва, Профсоюзная 84/32
E-mail: Alexey.Kuzmin@iki.rssi.ru*

Представлен проект сканирующего многоканального микроволнового радиометра-поляриметра для дистанционного зондирования океана и атмосферы. Прибор подобен современным микроволновым радиометрам, таким как SSM/I или AMSR, функционирующим на борту зарубежных спутников дистанционного зондирования Земли. В то же время, предлагаемый радиометр обладает рядом преимуществ по сравнению с существующими аналогами. В частности, поляриметрические измерения обеспечат восстановление скорости и направления ветра над морской поверхностью. Спектральные измерения в линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц позволят с более высокой точностью восстанавливать интегральное содержание водяного пара над поверхностью не только океана, но и суши. Радиометр предназначен для глобального мониторинга ключевых параметров, определяющих взаимодействие океана и атмосферы и эволюцию климата: потоков тепла и импульса между океаном и атмосферой, вектора скорости ветра над океаном, интегрального содержания водяного пара в атмосфере, глобального распределения интенсивности осадков.

Введение

Современная концепция дистанционного зондирования атмосферы Земли и подстилающей поверхности предполагает переход от измерения характеристик, описывающих их состояние, к мониторингу ключевых параметров взаимодействия океана и атмосферы, которые, в свою очередь, определяют динамику эволюции климата [1]. К числу таких климатообразующих факторов относятся потоки тепла, влаги и импульса между океаном и атмосферой. Долговременный мониторинг указанных параметров в глобальном масштабе позволяет более обоснованно подходить к построению динамических моделей взаимодействия океана и атмосферы. В этом случае можно говорить об изучении климатических тенденций в системе океан-атмосфера и в целом на планете Земля.

Практически безальтернативным средством осуществления глобального мониторинга являются сегодня специализированные спутники дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Среди установленной на таких спутниках аппаратуры особо важную роль в исследовании океана и атмосферы играют микроволновые приборы, в том числе микроволновые радиометры. Использование последних связано с тем, что радиояркостьная температура подстилающей поверхности является высокоинформативным параметром, поскольку зависит от ее физической температуры и излучательной способности, определяемой диэлектрическими свойствами и геометрией (например, волнением на поверхности моря). В то же время, в диапазоне микроволн характеристики пропускания атмосферы меняются весьма значительно в зависимости от частоты, от малой степени затухания в так называемых "окнах прозрачности" до практически полного поглощения в линиях таких атмосферных составляющих, как кислород и водяной пар. Таким образом, микроволновая радиометрия с успехом используется и для зондирования подстилающей поверхности независимо от наличия облачности и внешнего подсвета (что выгодно отличает ее от аппаратуры видимого и инфракрасного диапазона), и для получения информации об атмосфере (интегрального содержания водяного пара и жидкокапельной влаги, высотных профилей температуры и влажности).

Предметом настоящей статьи является анализ состояния и тенденций развития спутниковой микроволновой радиометрии. На основе такого анализа и многолетнего опыта коллектива, к которому принадлежат соавторы, в разработке и использовании микроволновых радиометров формулируются предложения по созданию перспективного отечественного многочастотного радиометра для климатических исследований.

Современное состояние и перспективы развития спутниковой микроволновой радиометрии

История применения микроволновой радиометрии для дистанционного зондирования Земли берет свое начало в 1968 г. с запуска спутника "Космос-243". Как результат эволюции средств и методов ДЗЗ, в

настоящее время микроволновые радиометры установлены на многих спутниках, как отечественных, так и зарубежных. С их помощью на регулярной основе получают карты скорости ветра над океаном, ледового покрова, зон и интенсивности осадков, влагосодержания атмосферы и водозапаса облачности над океаном. По принципу своего устройства и характеру получаемой с их помощью информации существующие спутниковые радиометры могут быть подразделены на следующие типы: сканеры (в англоязычной литературе наряду с термином "scanning radiometer" часто используется "imager"), предоставляющие информацию о характеристиках подстилающей поверхности и интегральном содержании водяного пара в атмосфере и водозапасе облачности в широкой полосе обзора с пространственным разрешением, в зависимости от диапазона частот, от единиц до десятков километров; приборы трассерного типа, используемые, главным образом, как вспомогательное средство для коррекции данных микроволновых альтиметров; зондировщики ("sounders"), предоставляющие информацию о высотных профилях температуры и влажности атмосферы на основе спектрометрических измерений в линиях поглощения кислорода и водяного пара. Предметом дальнейшего рассмотрения будут сканирующие радиометры как наиболее универсальные и информативные приборы дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне.

Основные технические характеристики современных отечественных и зарубежных сканирующих радиометров приведены в таблице 1 (по данным [2]-[6]). Представлены данные установленных на спутнике "Метеор-3М" радиометров МИВЗА и МТВЗА, серийного радиометра SSM/I со спутников военной метеорологической программы США DMSP, японского радиометра AMSR со спутника ADEOS-II (подобный радиометр AMSR-E с несколько сокращенным набором каналов и уменьшенной до 1,6 м антенной установлен на спутнике NASA Aqua) и экспериментального радиометра-поляриметра WindSat, запущенного на спутнике Coriolis в интересах ВМС США в январе 2003 г.

Приведенные данные и анализ опубликованных проектов сканирующих радиометров, которые предполагается включать в состав аппаратуры спутников ДЗЗ в ближайшей перспективе, позволяют очертить круг принципиальных параметров, отличающих радиометры нового поколения от уже имеющихся в нашей стране и за рубежом. Это, прежде всего, параметры, определяющие измерительные свойства радиометра:

- погрешность измерения яркостной температуры во всем спектре рабочих частот прибора ~ 0,5 К (у современных приборов 2 К и более);
- высокая чувствительность на элемент разрешения ~ 0,1 К;
- высокая долговременная стабильность ~ 0,5 К;
- применение зеркальных антенн диаметром 1,5-2 метра;
- высокая потоковая эффективность антенны ~ 0,95 и выше;
- возможность проведения поляризационных измерений всех четырех параметров Стокса теплового радиоизлучения
- снижение веса и энергопотребления приборов благодаря применения монолитных интегральных СВЧ схем;
- возможность наблюдения одного и того же элемента поверхности под разными азимутальными углами при сканировании по полной образующей конуса;
- высокая оперативность обновления информации за счет одновременного получения данных с нескольких спутников, находящихся на различных орбитах.

Таблица 1. Основные технические характеристики современных радиометров

	МИВЗА	МТВЗА	SSM/I	AMSR	WindSat
Частота, ГГц	20; 35; 94	18,7; 22,2; 33,0; 36,5; 42,0; 58,0; 52,8; 53,3; 53,8; 54,64; 55,63; 91,65; 183,31	19,35; 22,235; 37,0; 85,5	6,925; 10,65; 18,7; 23,8; 36,5; 50,3; 52,8; 89,0	6,8; 10,7; 18,7; 23,8; 37,0
Количество каналов	5	21	7	16	22
Антенна, м	0,36	0,5	0,6	2	1,83
Количество облучателей	3	1	1	7	11
Погрешность Тя, К	2...3		3		
Чувствительность, К	0,08 - 0,15	0,25 - 0,5	0,45 - 0,9	0,3 - 1,8	0,37 - 0,55
Угол визирования, град.	42	51	45	47,4	45
Угол наблюдения, град.	49	65	53,1	55	49,9-53,5
Полоса обзора, км	1700	2600	1400	1600	1025

Возвращаясь к таблице 1, необходимо отметить, что аппаратура спутника "Метеор-3М" №1, так же как и ADEOS-II, уже не функционирует из-за аварий систем электропитания. Таким образом, в настоящее время радиометрическая информация поступает только с американских спутников, принадлежащих военным ведомствам и NASA. Понятно, что как с точки зрения обеспечения потребностей обороноспособности, так и предотвращения технологического отставания и зависимости от иностранных источников спутниковых данных в кризисных ситуациях, России необходима собственная система дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне. В то же время, учитывая тенденцию последнего десятилетия ко все более тесной международной интеграции космических средств сбора научной и метеорологической информации, эта национальная система должна органично вписываться в мировой ряд спутников ДЗЗ. Исходя из этих соображений и имеющегося научного и технологического задела, авторы, работающие в области микроволнового дистанционного зондирования Земли из космоса, предлагают проект микроволнового многочастотного сканирующего радиометра нового поколения МСРП.

Физические принципы, положенные в основу радиометров нового поколения

Развитие средств спутниковой микроволновой радиометрии до последнего времени шло, главным образом, по двум основным направлениям. Во-первых, расширялся частотный диапазон измеряемого из космоса радиотеплового излучения природных сред. Во-вторых, увеличивалась точность измерений, для чего разрабатывалась высокочувствительная приемная аппаратура, и повышалось пространственное разрешение путем увеличения размеров приемной антенны.

В последние годы наметился еще ряд перспективных направлений развития спутниковой радиометрии, основанных на новых физических принципах и обещающих дальнейшее увеличение точности и расширение перечня определяемых дистанционно параметров. Во-первых, это поляризационные микроволновые измерения [7]. Как известно, поляризационное состояние частично поляризованного теплового электромагнитного излучения полностью может быть описано четырьмя параметрами Стокса. Однако в ДЗЗ общепринятым стандартом до последнего времени было использование в радиометрах, предназначенных для исследования подстилающей поверхности, только двух ортогональных линейных поляризаций: вертикальной и горизонтальной. Это связано с тем, что при зондировании на этих поляризациях радиояркостная температура водной поверхности достигает своих экстремальных значений вследствие различия коэффициентов Френеля для электромагнитных волн указанных поляризаций. Лишь относительно недавно было осознано, что измерения в полном поляризационном базисе способны повысить информативность данных дистанционного зондирования. Большая заслуга в развитии микроволновой поляриметрии принадлежит исследователям из Института космических исследований, впервые продемонстрировавшим возможность восстанавливать скорость и направление ветра над поверхностью океана из поляризационных радиометрических измерений [8]-[10]. С точки зрения задач дистанционного зондирования, микроволновые поляризационные измерения дадут возможность:

- измерять одновременно скорость и направление ветра над океаном, выделять поляризованное излучение морской поверхности на фоне слабо поляризованного излучения облаков и осадков;
- определять влажность почвы и зоны осадков над сушей;
- измерять параметры спектра морского волнения в гравитационно-капиллярной области.

Во-вторых, все более широкое применение в системах ДЗЗ находят принципы микроволновой спектроскопии. В спутниковых радиометрах-зондировщиках спектроскопические измерения в области частот 52-60 ГГц вблизи группы линий поглощения молекулярного кислорода используются для восстановления профиля температуры в тропосфере, а область частот вблизи линии поглощения водяного пара 183,4 ГГц аналогичным образом используется для восстановления высотного профиля его концентрации. Перспективным представляется использование подобного подхода и в сканерах при измерении вблизи линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц. До настоящего времени измерения в этом диапазоне использовались для восстановления интегрального по высоте содержания водяного пара в атмосфере над океаном, причем в спутниковых радиометрах измерения проводились на одной частоте, либо в центре линии, либо при небольшой отстройке в ту или иную сторону. Модельные расчеты [11] и результаты наземных экспериментов [12] дают основания полагать, что спектроскопические измерения в центре и на склонах линии 22,235 ГГц позволят повысить точность дистанционного определения содержания водяного пара, а также проводить измерения над сушей. Принципиальным здесь является тот факт, что радиотепловое излучение водяного пара в окрестности линии поглощения носит резонансный характер, в то время как излучение подстилающей поверхности и капельной влаги облаков слабо зависит от частоты.

Наконец, можно было бы упомянуть возможность применения в спутниковой радиометрии принципов синтеза антенной апертуры, блестяще зарекомендовавших себя в радиолокации. Особенно актуальным применение синтезированной апертуры было бы в длинноволновом диапазоне (на длинах волн 6 см и

более), используемом для дистанционного измерения температуры и солености поверхностного слоя океана. Для достижения приемлемого пространственного разрешения размеры спутниковых антенн этих диапазонов должны доходить до 10 метров и более, что вызывает вполне понятные технические затруднения. Однако до настоящего времени разработки в области применения синтезированных антенн в радиометрии не вышли за рамки лабораторных и самолетных прототипов. Принципиальные трудности применения в радиометрии принципов синтеза апертуры связаны с шумовым характером принимаемого сигнала, в частности, за увеличение пространственного разрешения приходится расплачиваться потерей чувствительности. Поэтому в описанном ниже проекте сканирующего радиометра предлагается использовать традиционную однозеркальную антенну и ограничиться частотами зондирования 6,8 ГГц и выше (т.е. длинами волн короче 4,4 см).

Краткое описание радиометра-поляриметра

Микроволновый сканирующий радиометр-поляриметр МСРП предназначен для измерения с высокой точностью радиотеплового излучения Земли с борта космического аппарата в широком спектре частот 6,8 – 89 ГГц и формирования полей радиоярких температур. Потребителям информации, наряду со значениями радиоярких температур, могут быть предоставлены следующие информационные продукты:

- поля вектора скорости ветра над морской поверхностью с точностью порядка 1-2 м/с по скорости и 10-20° по направлению;
- глобальные поля количества осадков;
- распределение интегральной влажности атмосферы над сушей и морем;
- данные о климатообразующих параметрах взаимодействия атмосферы и океана (потoki тепла, влаги, импульса);
- данные о водности облаков и их эффективной температуре;
- поля температуры поверхности океана с точностью порядка 0,5-1°С;
- данные о возрасте и сплоченности льда;
- данные о границе и высоте снежного покрова;
- температура поверхности суши и ее влажность.

Прибор реализуется в виде единого модуля для применения как на негерметичных космических платформах, так и на платформах с гермоотсеком. Общий вид радиометра приведен на рис. 1.

Многоканальный радиометр МСРП состоит из:

- ❖ термостатированного высокочастотного блока (БСВЧ);
- ❖ блока калибровки (БКЛ);
- ❖ блока привода (БП);
- ❖ блока управления (БУ)

Блок СВЧ (БСВЧ) включает в себя:

- параболическую однозеркальную антенну;
- многолучевой облучатель;
- малошумящие приемные устройства (МШУ);
- устройство сбора данных (УСД);
- вращающееся контактное устройство (ВКУ);
- вторичные источники питания (ВИП).

Блок калибровки (БКЛ) состоит из: “горячего” излучателя и зеркала “холодного” космоса.

Блок привода (БП) обеспечивает требуемый режим конического сканирования блока СВЧ.

Блок управления (БУ) обеспечивает работу привода и формирует поток данных для передачи их в радиолинию.

Габаритные размеры радиометра МСРП: в транспортном положении (антенна сложена) – 1100 мм х 600 мм х 1100 мм, в рабочем положении (антенна развернута) – 1100 мм х 1850 мм. Общая масса прибора порядка 55 кг; потребляемая мощность – 90 Вт. Апертура антенны -1000 мм; при необходимости диаметр антенны может быть уменьшен или увеличен.

Основные характеристики радиометра-поляриметра приведены в Таблице 2. Из этой таблицы и рисунка 1 видно, что по конструкции и набору частот радиометр подобен современным зарубежным приборам, таким как SSM/I и AMSR-E. В то же время, он обладает принципиальными отличиями, позволяющими расширить круг и повысить точность измеряемых параметров. Во-первых, возможность измерения первых трех параметров Стокса в частотных каналах 10,65, 18,7 и 36,5 ГГц позволит решать задачу определения не только скорости, но и направления ветра над морской поверхностью. Во-вторых, предлагаемый радиометр обладает и свойствами спектрометра благодаря наличию трех близко расположенных частотных каналов – в центре и на обоих склонах линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц. Это позволит повысить точность определения интегрального влагосодержания атмосферы, а также реализовать его не только над морской поверхностью, но и над сушей.



Рис. 1. Общий вид микроволнового сканирующего радиометра-поляриметра

Таблица 2. Технические характеристики радиометра – поляриметра МСРП

Частота, ГГц	6,8	10,65	18,7	20-24	36,5	89,0
Полоса, ГГц	0,1	0,2	0,2	0,3	1	5
Количество каналов	2	4	4	3	4	6
Вид канала	поляр.	поляр.	поляр.	спектр.	поляр.	поляр.
Поляризация*	Г В	Г В $\pm 45^\circ$	Г В $\pm 45^\circ$	Г	Г В $\pm 45^\circ$	Г В
Динамич. диапазон, К	3-330					
Чувствительность**, К	0,05	0,1	0,15	0,15	0,15	0,3
Калибровка	Космос и БШИ (≈ 300 К), погрешность калибровки $\leq 0,5$ К					
Диаграмма направленности по уровню 3 дБ, град.	3,1	2,0	1,1	0,95	0,65	0,25
Полоса обзора, км	1200 ... 1600 ($H_{\text{орб.}} = 600$ км) при угле визирования $45-49^\circ$					
Элемент разрешения при высоте орбиты 600 км, км	80	55	36	22	15	6
Сканирование	Вращение по конусу, период сканирования 1 с					
Информац. поток, Кбит/с	20					

* В, Г, $\pm 45^\circ$ – поляризации: вертикальная, горизонтальная и под углом $+45^\circ$ и -45° по отношению к вертикальной, соответственно.

** Чувствительность дана для температуры фона 300 К.

Базовая конструкция модуля позволяет использовать его в качестве инструмента, на основе которого могут быть созданы радиометры различного назначения и массогабаритных характеристик, адаптированные под конкретные аппараты. К примеру, это могут быть:

- 2-х частотный восьмиканальный ветровой радиометр на частоты 18,7 и 36,5 ГГц, определяющий скорость и направление ветра над поверхностью океана;
- 3-х частотный шестиканальный дождевой радиометр на частоты 10,65; 18,7 и 36,5 ГГц;

- профильный спектрометр, работающий в диапазоне 50...60 и 179...190 ГГц;
- многочастотный радиометр-поляриметр, в котором также имеются 2 частоты в 5-мм линии кислорода для мониторинга изменчивости температуры нижней тропосферы, как это сделано, например, в AMSR.

Заключение

В заключение необходимо еще раз подчеркнуть, что микроволновое радиометрическое зондирование Земли – это та область космических исследований, где Россия исторически имела значительные достижения. Ее дальнейшее развитие крайне важно как для целей фундаментальных исследований в области динамики климата и физики атмосферы и океана, так и для практических целей метеорологического прогнозирования, мореплавания и рыбодобычи, а также обеспечения деятельности военно-морских сил.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 00-05-64508-а и 05-05-64451-а) и INTAS (проекты 97-10569 и 03-51-4789).

Литература

1. Ланно С.С., Арманд Н.А., Волков А.М., Копелевич О.В., Кравцов Ю.А., Кузьмин А.В., Пелевин В.Н., Переслегин С.В., Пичугин А.П., Смирнов М.Т., Тищенко Ю.Г., Трохимовский Ю.Г. О концепции развития космической океанологии в России на 1996-2015 гг. // Исслед. Земли из космоса, 1997, №2, 70-80.
2. Алексеев П.В., Викторов А.С., Волков А.М., Гончаров А.К., Гордон З.И., Данекин А.И., Кочеров С.А., Некрасов В.В., Пахомов Л.А., Прохоров Ю.Н., Феоктистов А.А., Хапин Ю.Б. Микроволновый сканирующий радиометр интегрального влажностного зондирования атмосферы (МИВЗА) // Исслед. Земли из космоса, 2003, №6, 68-76.
3. Cherny I.V., Chernyavsky G.M., Gorobetz N.N., Nakonechny V.P., Pantsov S.Y., Zazinov A.N., Bordugov L.G., Satellite "Meteor-3M" Microwave Radiometer MTVZA // Proc. IGARSS'98, Seattle, USA, July 1998, 556-558.
4. Hollinger J.P., Peirce J.L. and Poe G.A. SSM/I Instrument Evaluation // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1990, Vol. 28, No. 5, 781-790.
5. http://sharaku.eorc.nasda.go.jp/AMSR/index_e.htm.
6. Gaiser P.W. and St. Germain K.M. Spaceborne polarimetric microwave radiometry and the Coriolis WindSat system // IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2000, Vol. 5, 159-164.
7. Поспелов М.Н. Применение микроволновой поляриметрии для дистанционного зондирования морской поверхности // Исслед. Земли из космоса, 2005, № 1.
8. Беспалова Е.А., Веселов В.М., Готов А.А., Милицкий Ю.А., Мировский В.Г., Покровская И.В., Попов А.Е., Раев М.Д., Шарков Е.А., Эткин В.С. Исследование анизотропии ветрового волнения по вариациям поляризованного теплового излучения // Докл. АН СССР, 1979, т. 246, №6, 1482-1485.
9. Беспалова Е.А., Веселов В.М., Гершензон В.Е., Милицкий Ю.А., Мировский В.Г., Покровская И.В., Раев М.Д., Семин А.Г., Смирнов Н.К., Скачков В.А., Трохимовский Ю.Г., Хапин Ю.Б., Чистяков В.Н., Шарков Е.А., Эткин В.С. Об определении скорости приповерхностного ветра по измерениям поляризационной анизотропии собственного и рассеянного СВЧ-излучения // Исслед. Земли из космоса, 1982, №1, 87-94.
10. Дзюра М.С., Кузьмин А.В., Поспелов М.Н., Трохимовский Ю.Г., Эткин В.С. Способ дистанционного определения скорости и направления ветра над водной поверхностью, А.С. 1582849 от 23.05.1988, // Бюл. изобретений, 1993, № 45-46.
11. Perfiliev Y.P. Recovering of atmospheric water vapor and liquid water contents by multifrequency radiometer: Experiments and modeling // Proc. Int. Geosci. and Remote Sensing Symp. (IGARSS'96), 1996, Lincoln, Nebraska, USA, 1701-1703.
12. Перфильев Ю.П., Трохимовский Ю.Г. Определение влагосодержания атмосферы и водозапаса облаков с использованием двухчастотного радиометра // Изв. АН, Физ. атмосферы и океана, 1997, т. 33, №5, 687-691.