

Анализ конструкций космических аппаратов и орбитального построения современных и перспективных зарубежных космических систем с СВЧ-радиометрами

И.А. Барсуков, В.В. Болдырев,
М.И. Гаврилов, С.А. Гришунин,
Г.Е. Евсеев, И.А. Зубков,
А.М. Стрельцов, В.В. Яковлев.

Отделение 60

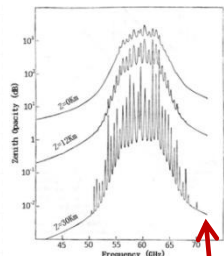
АО «Российские космические системы»



Преимущества спутниковой микроволновой радиометрии [1,2]



Глобальность



Регулярность
и обеспечение
непрерывного
наблюдения



Малые габариты,
масса и
энергопотребление



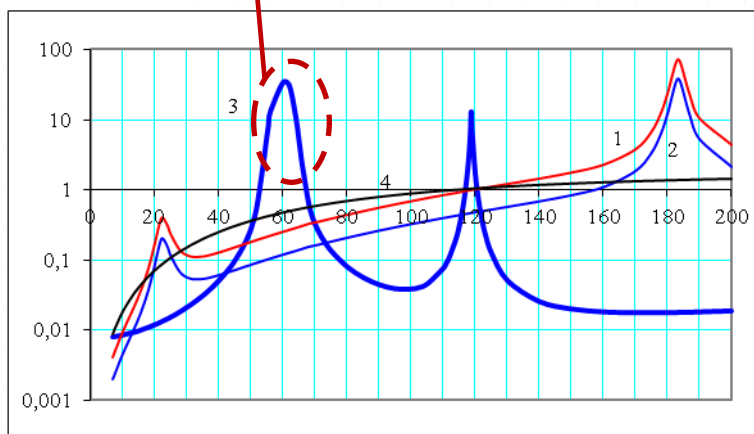
Независимость
от времени
суток



Независимость
от погодных
условий
(облачности)

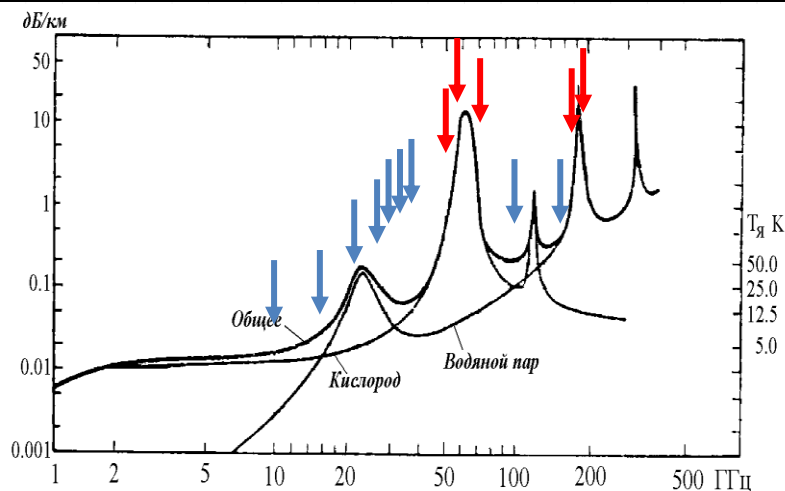


Возможность на основе обработки данных СВЧ-радиометров получать **количественные** характеристики атмосферы и подстилающей поверхности



а).

Спектры полного поглощения водяным паром при $V = 59$ и 28 кг/м^2 (кривые 1 и 2), молекул. кислородом (кривая 3) и облаками при $Q = 0.6$ кг/м^2 and $t_{cl} = 0^\circ\text{C}$ (кривая 4)



б).

Зависимости затухания радиоволн, связанные с наличием молекул кислорода и водяного пара в атмосфере Земли, а также расчетные значения яркостных температур

Основной недостаток СВЧ-радиометров – низкое пространственное разрешение данных

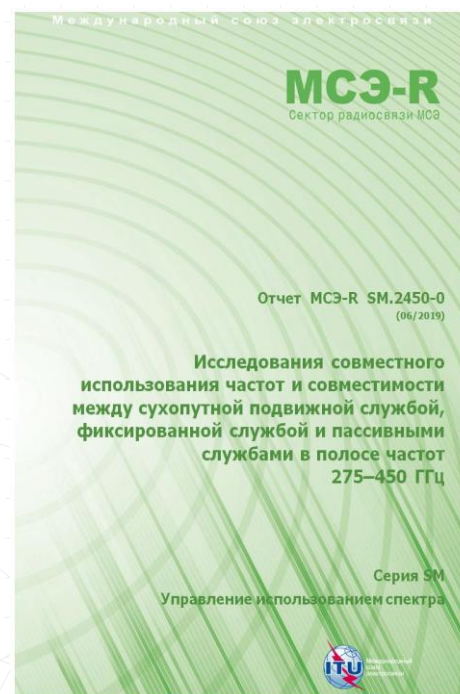
Диапазон частот, выделенный для пассивных микроволновых измерений, регламентирован рекомендациями Международного союза электросвязи, исходя из особенностей зондирования атмосферы и подстилающей поверхности



а).



б).



в).

В последние годы наметилась тенденция практического применения спутниковых данных в новых частотных диапазонах до 450-665 ГГц и выше. Проводятся исследования по определению условий совместного использования частот и совместимости между сухопутной подвижной и фиксированной службами связи и пассивными службами ССИЗ и РАС в полосе частот 275-450 ГГц (см. Рис.в). Кроме этого начались работы по определению полос частот для радиолокационной службы в диапазоне до 700 ГГц и рассмотрение вопроса распределений полос частот для всех служб радиосвязи (включая сети 5G, 6G и т.д.) в диапазоне 275-325 ГГц. Таким образом проводится работа по подготовке условий для начала активного использования частот выше 275 ГГц.

Частотные характеристики СВЧ-радиометров

Центральная частота, ГГц	Метеор-М	Метеор-МП	DMSP	WSF-M	SUOMI-NPP/JPSS	AWS	MetOP-SG			SMOS	GCOM-1	GOSAT-2	FY-3 (A, B, C, D)			FY-3G	HY-4
	MTB3A-ГЯ	MTB3A-МП ^P	SSMIS	MWIP	ATMS		MWI	MWS	ICI	MIRAS	AMS2-2	AMS2-3	MWTS	MWHS	MWRI	MWRI-RM	IMR
1.4										H,V							H,V
6.9	H,V	H,V		H,V							H,V	H,V					
7.3	H,V	H,V		H,V							H,V	H,V					
10.6	H,V	H,V		H,V ^P							H,V				H,V	H,V	
10.3/10.7												H,V/H,V					
18.7/19.1	H,V	H,V ^P	H,V	H,V ^P			H,V				H,V	H,V			H,V	H,V	
23.8	H,V	H,V	V	H,V	QV		H,V	QV/QH			H,V	H,V			H,V	H,V	
31.5	H,V	H,V			QV		H,V										
34.0	H,V	H,V															
36.5/37.0	H,V	H,V ^P	H,V	H,V ^P							H,V	H,V			H,V	H,V	
42.0	H,V	H,V															
45.0	H,V	H,V															
48.0	H,V	H,V															
89/91	H,V	H,V	H,V		QV	QV	H,V	QV/QH			H,V	H,V×2			H,V	H,V	
52-59	10V/H	10V/H	7 H		13 QH	8 QV	4H,V	14 QV/QH					4QH			4H,V	
60-66			6V+H														
118	-	-					4 V									4 V	
150/165.5	V, H	V, H	H		QH	QV	V	QV/QH				V		QV/QH	H,V	V	
183,31±1.0	V	V	H		QH	QV	V	QV/QH				V		QV			
183,31±1.8/2,0	V	V			QH	QV	V	QV/QH	V							/V	
183,31±3.0/3.4	V	V	H		QH	QV	V	QV/QH	V			V		QV		/V	
183,31±4.5	V	V			QH	QV	V	QV/QH									
183,31±7.0	V	V	H		QH	QV	V	QV/QH	V					QV		V	
229/243±2.5								QV/QH	V/H								
325,15±9.5/6.6						QV			V								
325,15±3.5/4.1						QV			V								
325,15±1.5/2.4						QV			V								
325,15±1.2						QV											
448±1.4									V								
448±3.0									V								
448±7.2									V								
664±4.2									V/H								

Гидрометеорологические параметры, определяемые с помощью данных СВЧ-радиометрии [6]:



– определение вертикального профиля температуры атмосферы;



– определение вертикального профиля влажности атмосферы;



– определение интегральной влажности атмосферы;



– определение водозапаса облаков;



– определение скорости и направления приводного ветра;



– определение температуры поверхности океана;



– определение зон и интенсивности осадков;



– мониторинг ледовых покровов: тип и возраст (однолетний, многолетний и зоны торошения), толщина льда;



– мониторинг снежных покровов (толщина, водный эквивалент);



– мониторинг тайфунов и ураганов, определение потенциальной энергии на ранней стадии зарождения;



– диагностика процессов деятельного слоя океана, мониторинг энергоактивных зон, течения и пр.

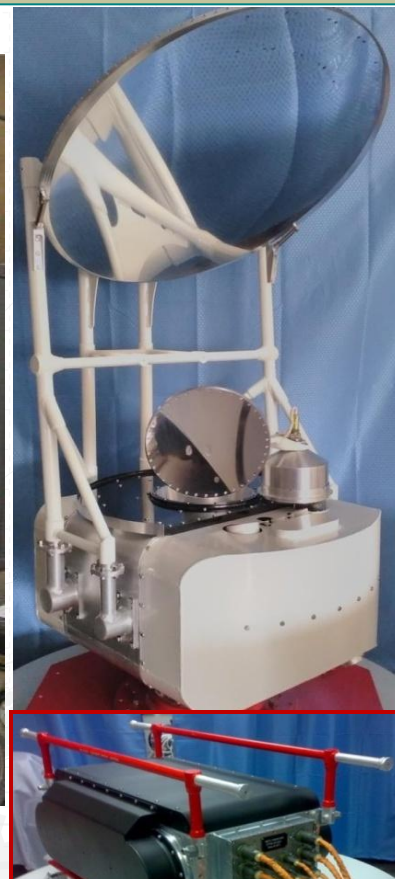
Антенный
модуль
СВЧ-радиометра
МТВЗА
КА «Метеор-3М»
Запуск - 2001 г.
19 каналов
в диапазоне
18,7 – 183 ГГц

Оптико-
микроволновый
сканер-зондировщик
МТВЗА-ОК
КА «Сич-1М»
Запуск - 2004 г.
Диаметр зеркала – 0,5 м
31 канал в диапазоне
6,9 – 183,31 ГГц

МТВЗА-ГЯ
КА «Метеор-М»
Запуск №1 - 2009 г.
Запуск №2 - 2014 г.
Запуск №2-2 - 2019 г.
Диаметр зеркала – 0,6 м
29 каналов в диапазоне
10,6 – 183,31 ГГц.

Модуль сканирующей
платформы (МСП) МТВЗА-ГЯ
КА «Метеор-М»
Запуск №2-3 - 2023 г.
Запуск №2-4 - 2024 г.
Диаметр зеркала – 0,67 м
40 каналов в диапазоне 6,9 –
183,31 ГГц.

Антенный модуль
СВЧ-радиометра МТВЗА-МП
КА «Метеор-МП»
(запуск – после 2032 г.)
Функции: сканер/зондировщик/
поляриметр
Диаметр зеркала – 1 м
40 каналов
в диапазоне 6,9 – 183,31 ГГц



Впервые в мире прибор, реализующий функции 3-х приборов, МТВЗА был запущен в составе КА «Метеор-3М» №1 в 2001 году.

Модуль МСДУ МТВЗА-ГЯ
КА «Метеор-М» №2-3 и №2-4

МТВЗА-ГЯ [5-9, 13-15]

Модуль Температурно-Влажностного Зондирования Атмосферы (МТВЗА-ГЯ) производит регистрацию данных о восходящем излучении атмосферы Земли в полосе до 1500 км (потенциально возможное значение – 2200 км) с пространственным разрешением от 9 до 75 км в диапазоне частот от 6,9 до 183 ГГц.



Запуск первого КА
серии «Метеор»
(«Космос-44»
состоялся 28.08.1964г.)



Внешний вид
КА «Метеор-М»

СВЧ-радиометр жестко связан с конструкцией КА (осями системы ориентации), поэтому любые отклонения или колебания вокруг осей влияют на точность географической привязки данных

Первый прибор МТВЗА-ГЯ был изготовлен для КА «Метеор-М» №1 (запуск осуществлен 17 сентября 2009 г.) и эксплуатировался более 5 лет. В период с 2014 по 2019 г.г.

Были осуществлены успешные запуски четырех КА «Метеор-М»: №2 (запущен в 2014 г.) и №2-2 (запущен в 2019 г.), №2-3 (запущен в 2023 г.) и №2-4 (запущен в 2024 г.)

В настоящее время на орбите функционируют два спутника «Метеор-М» № 2-3 и № 2-4 с приборами МТВЗА-ГЯ № 2-3 и № 2-4 соответственно.

В период до 2030 года планируются запуски еще 4-х КА «Метеор-М».

После 2032 года планируется развернуть ОГ метеоспутников следующего поколения – «Метеор-МП» с СВЧ-радиометром МТВЗА-МП, а после 2035 года осуществить запуск КА «Океан» с СВЧ-радиометром МИРОО.

МТВЗА-ГЯ и мировая тенденция развития спутниковой СВЧ-радиометрии [1-2, 5-7, 10-13]



Определение
вертикального
профиля
температуры
атмосферы

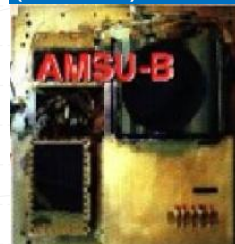
Определение
вертикального
профиля влажности
атмосферы

Определение
интегральных
параметров
атмосферы

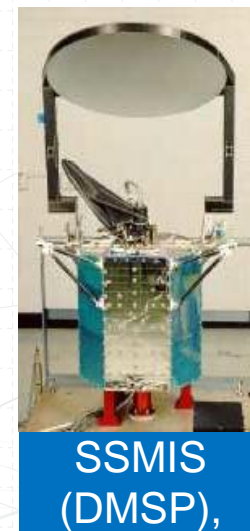
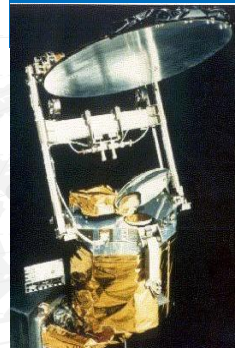
**AMSU-A
(NOAA),
1998**



**AMSU-B
(NOAA), 1998**



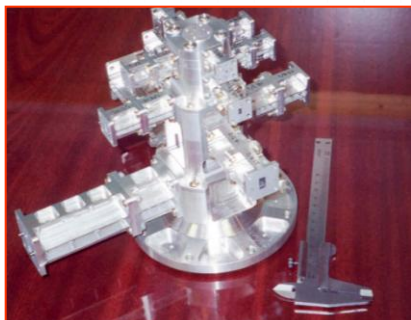
SSM/I



**SSMIS
(DMSP),
2003
США**

Впервые в мире прибор, реализующий функции 3-х приборов, МТВЗА был запущен в составе КА «Метеор-3М» №1 в 2001 году.

Новые технологии, реализованные в конструкции приборов МТВЗА-ГЯ [3-4, 6-7, 13-14]



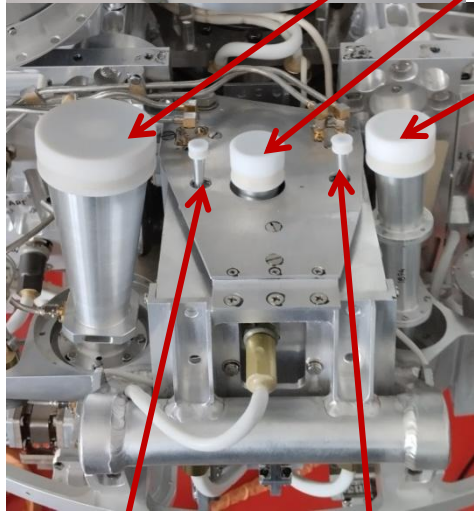
Применение технологии объединения информационных каналов в частотные группы и использование групповых частотных облучателей позволяет уменьшить габаритно-массовые характеристики приемного волноводного тракта и массу сканирующей платформы в целом.



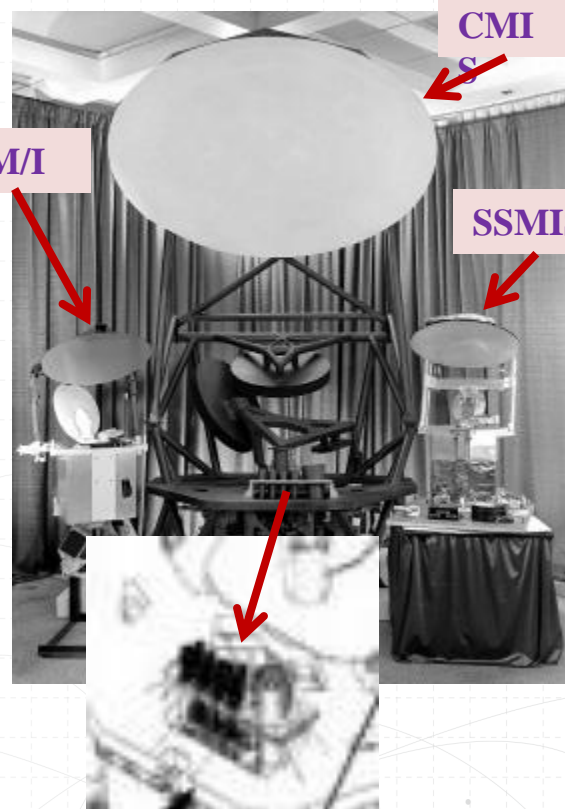
Многочастотный рупор группы каналов 6,9-23,8 ГГц

Многочастотный рупор группы каналов 52-58 ГГц и 91 ГГц

Многочастотный рупор группы каналов 31-48 ГГц



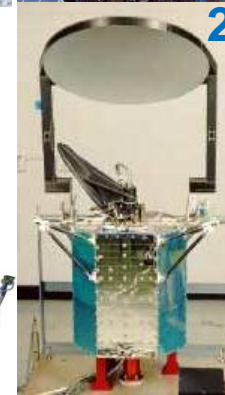
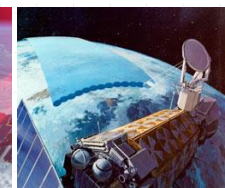
Многочастотный рупор группы каналов 165-190 ГГц



Группа из 12 рупоров НЧ каналов (6 -90 ГГц) и 4 рупора (2+2) с тыльной стороны сканирующей платформы для каналов на частоты 165-190 ГГц, а также сложная конструкция волноводного тракта - это привело к тому, что масса сканирующей платформы составила 144 кг, а общая масса прибора превысила 350 кг. Проект был остановлен.

Применение новой технологии использования групповых частотных облучателей позволило увеличить количество информационных каналов прибора МТВЗА-ГЯ для КА «Метеор-М» №2-3 и №2-4 с 29 до 40.

Параметр	Тип аппаратуры			
	МТВЗА-ГЯ	GMI	SSMIS	MRWI-RM
Диапазон частот, ГГц	10.6 ÷ 183.31	10.65 ÷ 183.3	19.35 ÷ 183.31	10.65 ÷ 183.3 (54, 118 и 183)
Количество каналов	29 (40)	13	24	26
Диаметр антенны, см	65 (67)	120	61 × 66	122
Тип сканирования	коническое	коническое	коническое	коническое
Угол визирования / падения	53.3° / 65°	45° / 53°	45° / 53.1°	53.3° / 65°
Частота сканирования, об / мин	24	32	32	35,3 (1,7сек)
Полоса обзора, км	1500	1700	1700	800
Чувствительность, К/пиксель	0.3 ÷ 1.7	0.57 ÷ 1.5	0.2 ÷ 1.23	
Пространственное разрешение (в зависимости от канала), км×км	89×198 52×116 42×94 35×76 30×67 26×60 24×43 14×30 21×48 9×21	19×32 11×18 9.2×15 8.6×14 4.4×7.2	42.4×70.1 27.5×44.2 17.5×25.8 13.1×14.4	
Режим работы на витке	непрерывный			
Информативность, Кбит/с	35 (45)	25	14.2	
Масса, кг	94	150	96	
Среднее энергопотребление, Вт	80	140	135	



МТВЗА-ГЯ

GMI

SSMIS

1) Тип КА (NASA, INPE (Бразилия), JAXA (Япония)):

GPM Core Observatory (2014 - 2017).

Тип аппаратуры:

GPM Microwave Imager (GMI).

2) Тип КА (Министерство обороны США):

DMSP- F16 (2003 - 2014); DMSP- F17 (2006 - 2014); DMSP- F18 (2009 - 2014); DMSP- F19 (2014 - 2019); DMSP- F20 (запуск отменен).

Тип аппаратуры:

Special Sensor Microwave - Imager/Sounder (SSMIS).

Направления модернизации космических средств СВЧ-радиометрии

Модернизация бортовых
СВЧ-радиометров

**Совершенствование
технических характеристик
бортовых
СВЧ-радиометров :**

- повышение чувствительности СВЧ-приемников;
- повышение пространственной разрешающей способности;
- повышение разрешающей способности в измерительных каналах.

**Совершенствование
функциональных характеристик
бортовых
СВЧ-радиометров :**

- повышение точности систем калибровки;
- расширение (обеспечение потенциальной) полосы обзора;
- повышение разрешающей способности зондирующих каналов.

Модернизация бортовых
систем платформ КА

**Совершенствование
технических характеристик
бортовых служебных систем
платформы КА:**

- повышение точности поддержания ориентации;
- увеличение количества (обеспечение требуемого количества) функциональных команд управления;
- увеличение количества датчиков и скорости передачи ТМИ;
- обеспечение требуемой скорости передачи ЦИ;
- обеспечение ЭМС СВЧ-радиометра с другими системами платформы.

Модернизация
наземных средств
НКУ/НКПОР

**Совершенствование
технических характеристик
Наземных средств НКУ/НКПОР:**

- повышение оперативности доставки информации (ТМИ, ЦИ и пр.);
- сокращение времени подготовки массивов принятой информации (ЦИ, ТМИ и пр.);
- сокращение времени предварительной обработки массивов принятой информации и доставки их тематическому потребителю.



В СССР в рамках природоресурсной исследовательской подпрограммы «Океан» в 1983-2005 г.г. была создана серия малых КА «Океан-Э», «Океан-ОЭ», «Океан-01» и большой аппарат «Океан-О»
Запуск космического аппарата «Океан-О» состоялся **17 июля 1999 года** с космодрома «Байконур»





Космический аппарат **DMSP** (Министерство обороны США), DMSP - F16 (2003 - 2014); DMSP - F17 (2006 - 2014); DMSP - F18 (2009 - 2014); DMSP F19 (2014 - 2019); DMSP - F20 (по решению Конгресса США запуск отменен).

Тип аппаратуры:

Микроволновый сканер/зондировщик Special Sensor Microwave - Imager/Sounder (**SSMIS**) по своим характеристикам аналогичен микроволновому сканеру/зондировщику **MTB3A**, запущенному 10 декабря 2001 года в составе КА «Метеор-3М» №1.

Прибор **MTB3A-ГЯ**, устанавливаемый на КА «Метеор-М», в частности на КА №2-3 и №2-4 существенно превосходит **SSMIS** по количеству информационных каналов и энергопотреблению.



WindSat - это поляриметрический микроволновый радиометр, разработанный ВМС США и Управлением интегрированных программ Национальной полярно-орбитальной оперативной спутниковой системы охраны окружающей среды (NPOESS) для измерения скорости и направления ветра у поверхности океана.

Запуск состоялся 06.01.2003 г. WindSat продемонстрировал перспективность использования поляриметрии для измерения вектора ветра из космоса и предоставления оперативной тактической информации подразделениям ВМФ и ВВС США.

Результаты разработки конструкции были использованы при разработке микроволнового сканера-зондировщика (**CMIS**). WindSat является основной полезной нагрузкой КА в программе космических испытаний Министерства Обороны США "Кориолис". Полезная нагрузка WindSat представляет собой многочастотный поляриметрический радиометр, номинально работающий на частотах 6,8, 10,7, 18,7, 23,8 и 37 ГГц. Используя конический параболический отражатель со смещением 1,83 м со множеством каналов, WindSat будет охватывать активную полосу протяженностью 1025 км (на высоте 830 км) и обеспечивать обзор полосы как спереди, так и сзади.



Космический аппарат **Weather System Follow-on-Microwave (WSF-M)** был успешно выведен на орбиту **8 апреля 2024** года в рамках миссии Космических сил США (USSF)-62 с базы военно-космических сил Ванденберг, Калифорния, Запуск **второго КА** запланирован на **2028 год**.

WSF-M (MWI)

Функции: сканер, поляриметр

-сканирование – коническое;

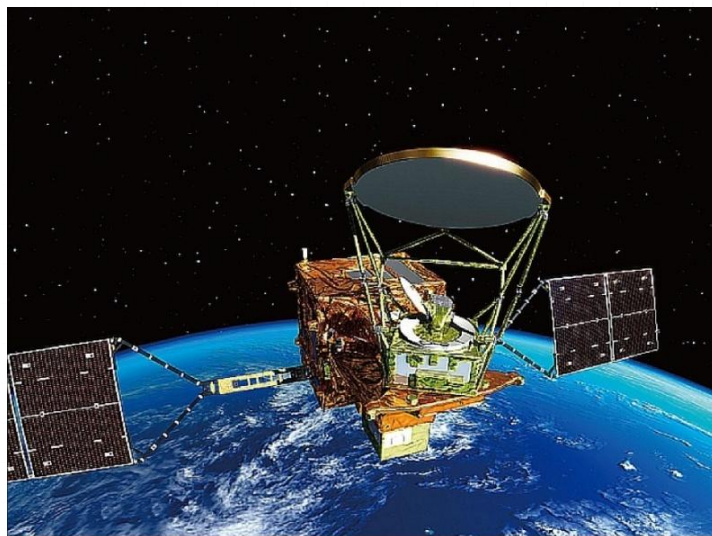
- высота орбиты – около 835 км;

--число каналов – 17;

-частотный диапазон – 6.9, 7.3, 10.85, 18.85, 23.8, 36.75, 37.3 и 89 ГГц.



GCOM-W1 ([англ.](#) *Global Change Observation Mission — Water 1*) — японский спутник дистанционного зондирования Земли. Космический аппарат был запущен 18 мая 2012 года и был рассчитан на пятилетний срок работы. В 2017 году [JAXA](#) объявило о полной работоспособности «Сидзуку» и продлении срока работы аппарата до исчерпания ресурса спутника. В 2013 году команде разработчиков и эксплуатантов «Сидзуку» была вручена японская экологическая премия Nikkei Global Environmental Technology Awards.



СВЧ-радиометр AMSR-2 (JAXA)

Функции – сканер, имеет самую большую на данный момент апертуру сканирующей антенны в мире -2 метра

- разрешение - 5 – 60 км
- полоса обзора – 1450 км
- число каналов – 16
- частотный диапазон – 6,9–89 ГГц

Используя высокочастотные каналы наблюдения в AMSR3, становится возможным получать информацию о свойствах облаков (вода или лед) и выпадении снега под облаками, которые не могут быть зафиксированы AMSR2.

Научные и практические задачи

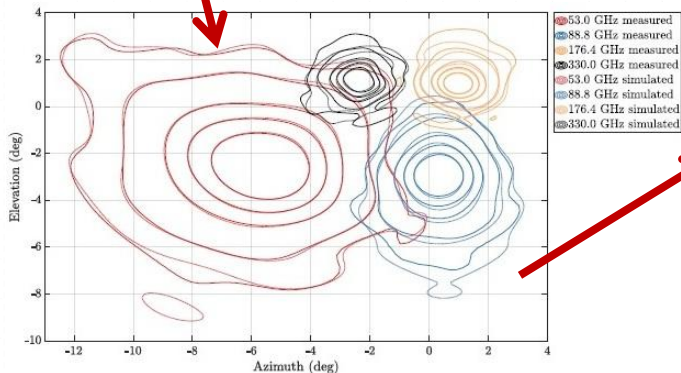
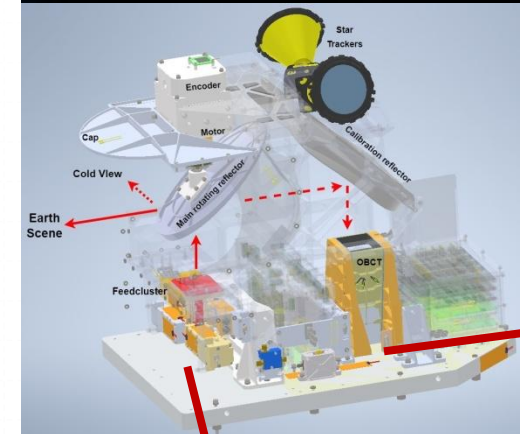
Спутник позволяет отслеживать важные геофизические параметры, связанные с температурой воды, снега, льда, влажностью и распределением влаги на поверхности Земли — всё это очень важно для понимания климатических изменений на планете. Микроволновой сканирующий радиометр AMSR-2 позволяет измерять различные параметры воды, водяного пара и определять степень влажности поверхности. Наблюдение за содержанием влаги в почве позволяет давать прогнозы, связанные с засухами и урожайностью сельскохозяйственных культур. Данные о температуре воды в океане позволяют определять повышать эффективность рыбных промыслов. После выхода из строя микроволнового сканера AMSR-E спутника Aqua 4 декабря 2015 года «Сидзуку» остался единственным аппаратом, дающим подобную информацию. **29 июня 2025 года осуществлен успешный запуск спутника для наблюдения за парниковыми газами и круговоротом воды («GOSAT-GW», «IBUKI GW») №1, будет контролировать влагосодержание атмосферы, цикличность ее изменчивости и Выбросы парниковых газов, предоставляя важную информацию международным организациям. В составе ЦА КА «GOSAT-GW» для этого функционирует СВЧ-радиометр AMSR-3 с расширенными характеристиками: По данным средств массовой информации AMSR3 совмещает функции сканера и влажностного зондировщика..**

Программа Европейского космического агентства AWS (Arctic Weather Satellite)

Запуск первого арктического метеорологического спутника ESA осуществлен 16 августа 2024 года. КА AWS (Arctic Weather Satellite) оснащен пассивным микроволновым зондировщиком специально разработанным для этой миссии..

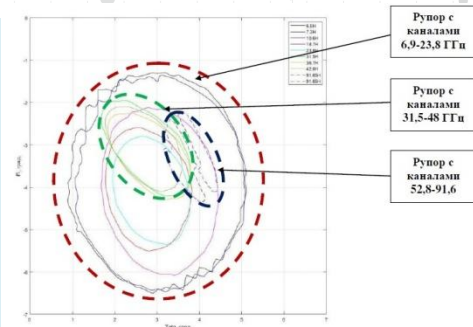
Микроволновый радиометр сконструирован по схеме сканирования поперек трассы, по характеристикам аналогичен ATMS (NOAA) или MWS (Metop-SG), но имеет новые частотные каналы, не используемые ранее. По функциональному назначению – зондировщик, объединяющий функции температурного и влажностного зондировщиков. Прибор функционирует в диапазоне частот от 50 до 325 ГГц, а 19 каналов сгруппированы в четыре группы в зависимости от частоты и функционального назначения и каждая группа каналов имеет свой приемный рупор и соответствующие приемные устройства.

ДН антенны, направленной на Землю, имеет форму круга.. Зеркало вращается с (регулируемой) постоянной угловой скоростью, оно прикреплено непосредственно к главной оси двигателя, что экономит пространство и стоимость, а также потенциально повышает надежность. Датчики на оси антенны, используемые для управления скоростью вращения и положением, являются избыточными. Двигатель - это единственный потенциальный источник (причина) выхода прибора из строя в одной точке, но его обмотки слишком велики для критического воздействия излучения космоса.



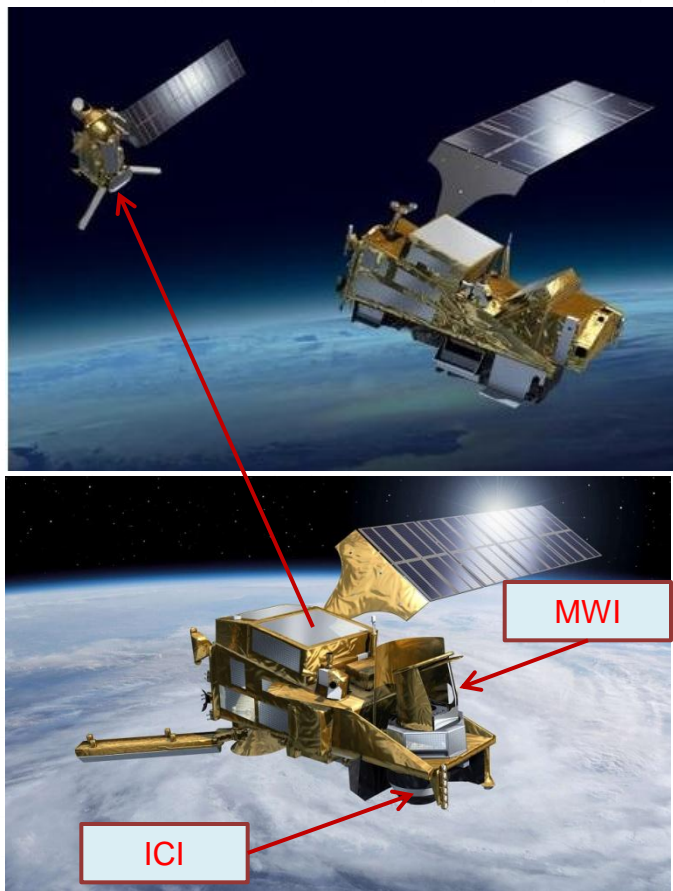
Сравнение измеренных и смоделированных характеристик антенны

ДН приемных рупоров не совмещены, что является конструктивным решением для создания компактного прибора. В результате лучи отклонены от нормали к сканирующему зеркалу и вращаются вокруг него в зависимости от угла сканирования. Хотя это усложняет геолокацию данных, поведение хорошо изучено.



Оценка ДН МТВ3А-ГЯ КА «Метеор-М» №2-4 по излучению Солнца

Европейская космическая система второго поколения MetOp-SG - тандем (развертывание ОГиз 6 КА планируется в период 2025-2039 г.г.)



В целом новая концепция системы MetOp-SG предусматривает использование шести спутников; запуск первого из которых осуществлен в январе 2025 года. Общий срок службы системы составляет 21 год; каждый спутник рассчитан на срок службы свыше восьми с половиной лет.

Программа MetOp-SG имеет своей целью получение согласованных долгосрочных данных дистанционного зондирования одинакового качества для оперативных служб анализа состояния мониторинга в области метеорологии и климата, прогнозирования и оперативного предоставления услуг, в контексте системы EPS-SG EUMETSAT.

ESA и EUMETSAT выбрали двух-спутниковую схему, а именно, спутники MetOp-SG-A и -B, обращающиеся по одной и той же солнечно-синхронной орбите. В отличие от существующей системы одинаковых спутников MetOp, функционирующих в группировке, система MetOp-SG предусматривает использование пары различных спутников, каждый из которых имеет на борту различные, но взаимодополняющие наборы приборов. Такая схема обеспечит преимущество данных и удовлетворит растущие потребности метеорологического сообщества в приборах с улучшенными характеристиками.

Прибор	Аналог	Спектральные диапазоны/каналы и краткое описание
METimage	AVHRR	20 спектральных каналов: 0.443 – 13.345 мкм; Пространственное разрешение 500 м; некоторые солнечные каналы имеют разрешение 250 м.
IASI-NG	IASI	Спектральный диапазон и радиометрическая точность в 2 раза лучше чем у IASI; размер пикселя 12 км, пространственная выборка 25 км, угол обзора 98° (такой же как и у IASI).
MWS	AMSU-A, MHS	24 канала в диапазоне: 23 – 229 ГГц; пространственное разрешение: 17 – 40 км.
SCA	ASCAT	5.3 ГГц радар, 6 фиксированных веерообразных лучей; средний луч с двойной поляризацией; Пространственное разрешение 25 км; динамический диапазон 4 – 40 м/с.
RO	GRAS	GPS & Galileo signals tracked (Glonass & Compass options); 1575 MHz, 1176 MHz frequencies; bending angle accuracy < 0.5 μ rad; >1100 occultations / day (per instrument).
	GOME-2	5 спектрометров: 0.27 – 2.385 мкм; пространственное разрешение 7.5 км.
MWI	SSM/I, MADRAS	26 каналов на 18 разных частотах: 18.7 – 183 ГГц; Пространственное разрешение: 10 - 50 км.
ICI		13 каналов на 11 разных частотах: 183 – 664 ГГц; пространственное разрешение: 15 км.
3MI	POLDER	12 спектральных каналов, 9 из которых обеспечивают поляризованные компоненты: 0.410 – 2.13 мкм; пространственное разрешение: 4 км.
Argos-4	A-DCS	400 МГц транспондер



Аппарат **FY-3G**, выведенный на орбиту 16 апреля 2023 г., первоначально создавался в рамках отдельного заказа под обозначением **FY-3RM-1**, где буквы RM указывали на его специализацию – мониторинг осадков (англ. Rainfall Mission). Это третий подобный метеоспутник в мире после американо-японских аппаратов **TRMM** (запущен в 1997 г.) и **GPM** (2014 г.). Параметры орбиты КА первоначально были также скопированы у GPM, но впоследствии наклонение 65° было заменено на 50° . Платформа **FY-3G** работает на орбите с номинальной высотой 407 км.

Радиолокатор осадков **PMR** (Precipitation Measurement Radar) предназначен для восстановления трехмерной структуры облачной системы – источника осадков и является аналогом американского двухчастотного радиолокатора DPR на спутнике GPM.

Микроволновой радиометр **MWRI-RM** (Micro-Wave Radiation Imager – Rainfall Mission) является аналогом инструмента GMI спутника GPM и предназначен для измерения микроволнового излучения поверхности суши и моря, а также от осадков и водяного пара в атмосфере. Радиометр с коническим сканированием с углом 53.1° от зенита ведет измерения в полосе шириной 800 км, имея три варианта длины цикла сканирования – 1.7, 1.8 и 2.0 сек.

MWRI-RM на борту КА **FY-3G** – это радиометр полной мощности с коническим сканированием. Как один из основных приборов, **MWRI-RM** является улучшенной версией радиометра **MWRI**, установленного на предшественниках серии **FY-3A-D**. **MWRI-RM** состоит из смещенного параболического отражателя с диаметром антенны 122 см, с 8-ю отдельными рупорами приемных устройств.

СВЧ- радиометр **GMI** (США),
Функции: сканер, влажностный
зондировщик;

- Апертура антенны -1,2 метра;
- разрешение – 4,5– 32 км;
- число каналов – 13;
- частотный диапазон – 10,65–183,3 ГГц;
- полоса обзора – 1700 км.



Эти 8 приемных рупоров расположены в 2 ряда с углами падения на землю $53^\circ \pm 1^\circ$ и $50^\circ \pm 1^\circ$ соответственно. По сравнению со стандартным **MWRI-II** спутников **FY-3F/3H**, **MWRI-RM** имеет расширенный набор функций и охватывает 17 частот и 26 каналов, включая диапазоны с частотой 54, 118 и 183 ГГц для измерения температуры и влажности. Пространственное разрешение **MWRI-RM** изменяется в зависимости от частоты. Мгновенное поле зрения инструмента находится в пределах от 21×35 км в канале 10.65 ГГц до 4×6 км в канале 165.5 ГГц.

Космический аппарат **Core Observatory GPM**
NOAA-NASA, INPE(Бразилия), **JAXA** (Япония)
и **Аргентина**) Запущен 27 февраля 2014 года

Определение солёности морской поверхности - SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) Mission



Солёность морской поверхности (SSS) является ключевым показателем в глобальном круговороте воды, но она не отслеживалась из космоса до 2010 года. Миссия **Aquarius** начала измерять глобальную SSS с беспрецедентным разрешением. Научные приборы включают в себя набор из трех радиометров, чувствительных к солёности (1,413 ГГц; L-диапазон), и скаттерометр, который корректирует неровности поверхности океана.



MIRAS (Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis)

Микроволновый радиометр с синтезированной апертурой (MIRAS) является основным прибором на спутнике для определения влажности почвы и солёности океана (SMOS). В MIRAS используется плоская антенна, состоящая из центрального корпуса (так называемого хаба) и трех телескопических выдвижных кронштейнов, всего на устройстве установлено 69 приемников. Каждый приемник состоит из одного легкого и экономичного входного модуля (LICEF), который регистрирует излучение в микроволновом L-диапазоне как в горизонтальной, так и в вертикальной поляризации. Апертура детекторов LICEF, расположенных на MIRAS в плоской форме, направлена непосредственно на поверхность Земли при движении спутника по орбите. Расположение и ориентация прибора MIRAS превращают его в двухмерный интерферометрический радиометр, который генерирует изображения яркостной температуры, на основе которых вычисляются обе геофизические переменные. Измерение солёности требует высокой производительности прибора с точки зрения калибровки и стабильности.



Copernicus Imaging Microwave Radiometer (CIMR)

Температура поверхности моря (SST), скорость океанского ветра (OWS), солёность поверхности моря (SSS) и концентрация морского льда (SIC) являются фундаментальными переменными для мониторинга, оценки и прогнозирования состояния океана и атмосферы. Они необходимы для правильного описания взаимодействия воздуха, моря и льда, происходящего на разных уровнях океанов, масштабах, вплоть до субмезомасштабных (Frenger et al., 2013; Perlin et al., 2014), и для определения граничных условий как для численного прогнозирования уровня океана, так и для моделей прогнозирования погоды

Частоты функционирования:

1.4, 6.9, 10.65, 18 и 36.5 ГГц.

Диаметр антенны – 7,5 м;

Полоса обзора – 1700 км;

Запуск запланирован на 2028 год.

Развитие низкоорбитальной гидрометеорологической космической системы Китая (продолжение)

Измеритель солености моря



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-4B №Y53) со спутником «Хайян-4» №01, предназначенным для определения солености океана.

«Хайян-4» №01 закрывает потребность Китая в высокоточных измерениях солености моря, улучшит возможности страны по определению элементов морской динамики и повысит точность и качество морских прогнозов. 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.

Аппарат оснащен двумя основными инструментами:

Двумерный интерферометрический радиометр L-диапазона IMR (Interferometric Microwave Radiometer), созданный по мотивам прибора MIRAS на спутнике SMOS. Радиометр IMR имеет антенну в форме трехлучевой звезды на надирной плоскости КА с 56 приемными элементами. Рабочая частота 1.4 ГГц, ширина снимаемой полосы 935 км, радиометрическое разрешение 1.6 К.

Пассивно-активная система MICAP (Microwave Imager Combined Active and Passive) включает одномерные интерферометрические радиометры L-, C- и Ka-диапазона (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.

Аппарат был успешно выведен на орбиту с параметрами:

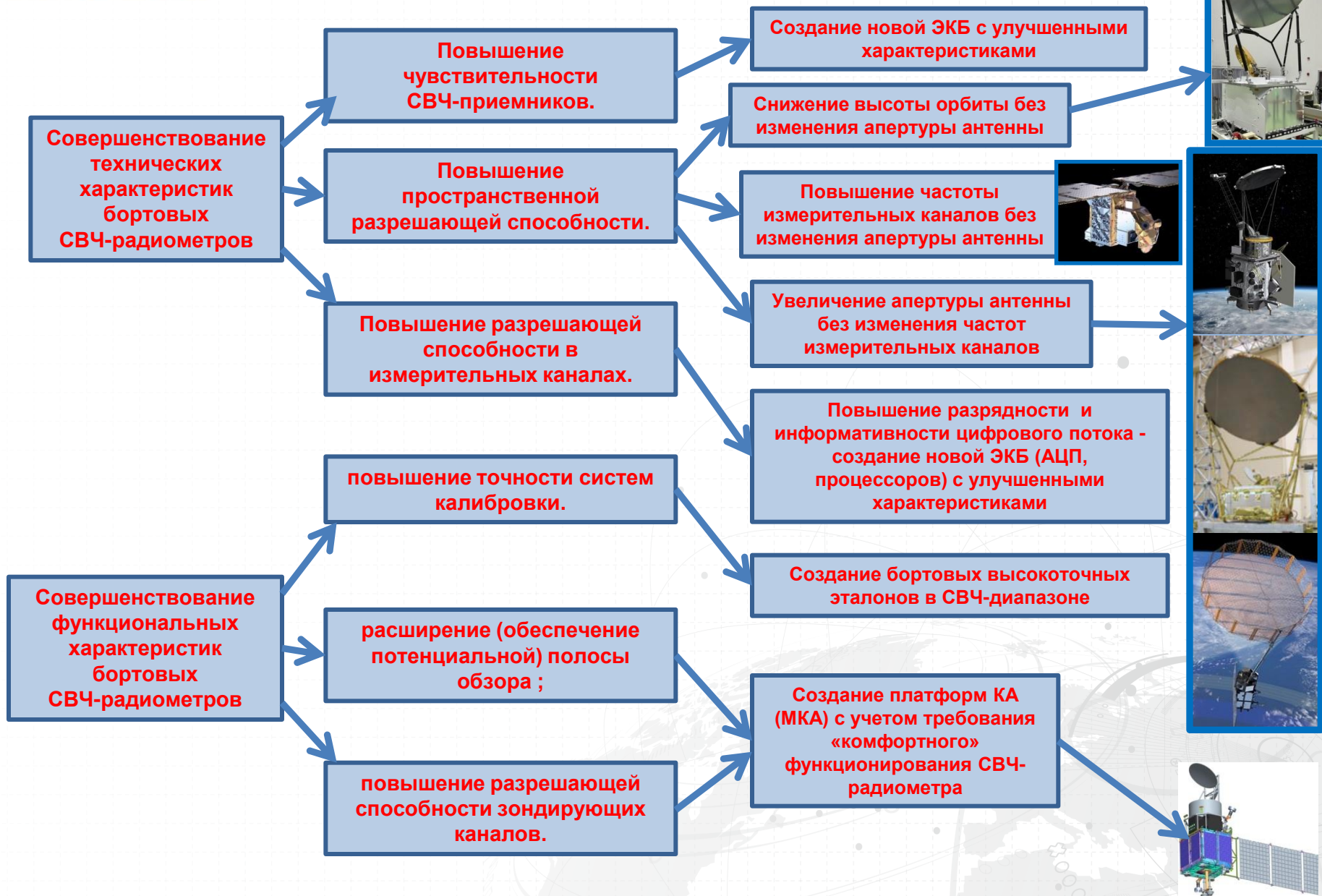
наклонение – 98.01° ;

минимальная высота – 632.8 км;

максимальная высота – 645.1 км;

период обращения – 97.50 мин.

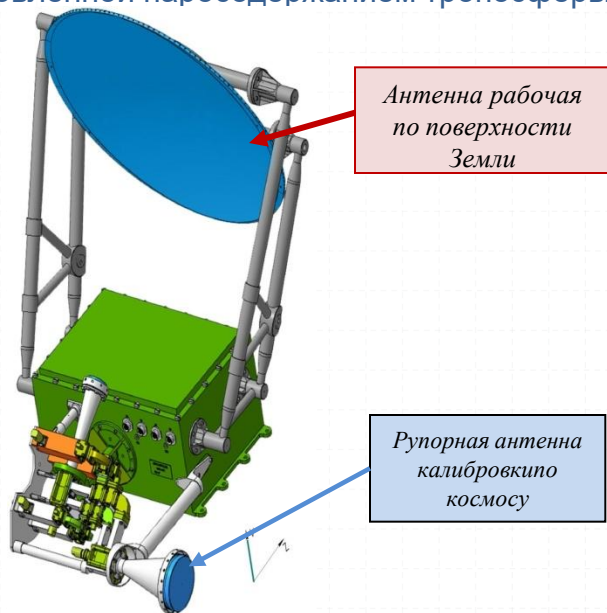
Направления модернизации бортовых СВЧ-радиометров



Перспективные СВЧ-радиометры для КА гидрометеорологического, геодезического назначения и ДЗЗ.

Проект МИРА-КГС

Назначение: МИРА-КГС предназначен для коррекции погрешности активных приборов (высокоточного радиовысотомера радиолокатора, скаттерометра) по дальности из-за рефракции, обусловленной паросодержанием тропосферы.

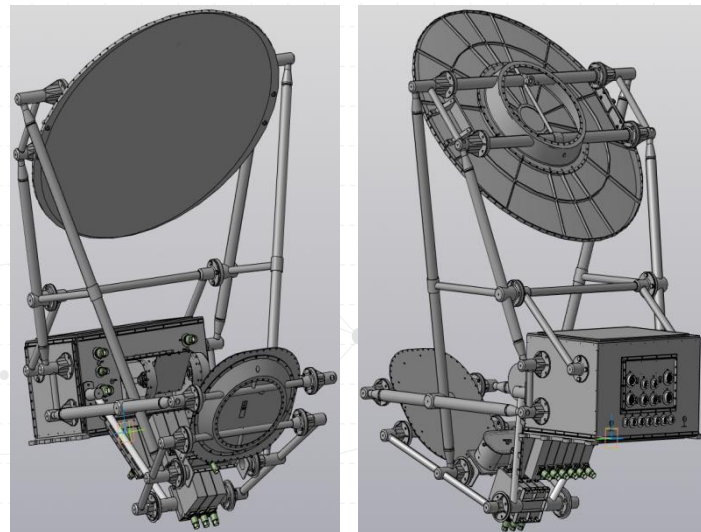


Характеристики радиометра МИРА-КГС:

Диапазон рабочих частот:	- 18.7, 23.8, 36.5 ГГц;
Режим работы	- трассовый;
Угол визирования	- в надир;
Апертура антенны, не менее.....	- 60 см;
Пространственное разрешение.....	- 15÷25 км;
Чувствительность, не хуже.....	- 0.3 К/пиксель;
Информационный поток.....	- 0.5 Кбит/с;
Потребление, не более.....	- 30 Вт;
Масса, не более.....	- 25 кг.

Проект МЛР-ГМ

Назначение: Получение данных лимбовых измерений излучения атмосферы Земли в линиях резонансного поглощения излучения молекулами парниковых газов в микроволновом диапазоне и получение независимой информации для диагностики и глобального мониторинга их содержания в верхней тропосфере, стратосфере и мезосфере.



Характеристики МЛР-ГМ:

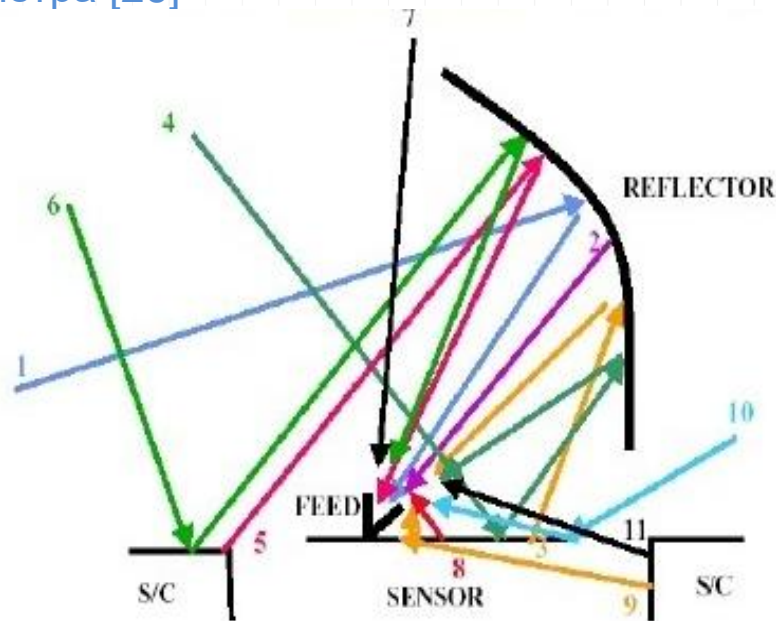
- рабочий диапазон частот - 107 - 245 ГГц (табл. 1);
- количество спектральных каналов – 18;
- режим сканирования атмосферы по высоте – 10÷95 км;
- горизонтальный размер пикселя – 10÷20 км;
- чувствительность – 0.3÷1.6 К;
- информационный поток – до 65 Кбит/с;
- апертура антенны – 0.7 м;
- потребление, не более 50 Вт;
- масса, не более - 45 кг;
- габариты - Ø800 мм × 1200 мм.

СВЧ-радиометр функционирует на частотах 107.014 ГГц, 110.201 ГГц, 115.271 ГГц, 116.950 ГГц, 118.750 ГГц, 177.261 ГГц, 181.595 ГГц, 183.31 ГГц, 200.975 ГГц, 204.352 ГГц, 206.132 ГГц и 243 ГГц.

Схема состава группового излучения, попадающего на вход СВЧ-радиометра [26]

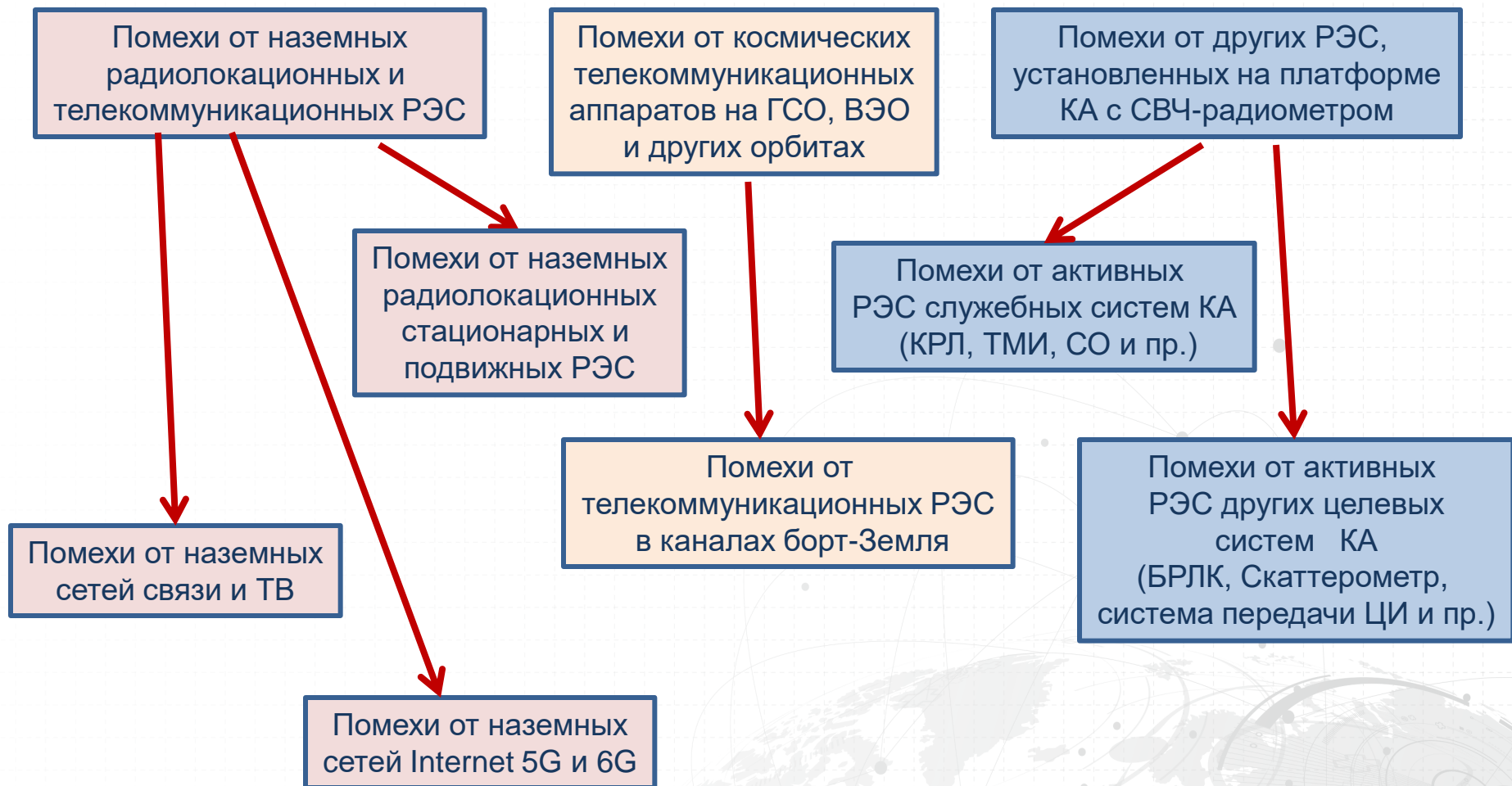
Излучение, попадающее на вход радиометра состоит из нескольких групп полезных и помеховых сигналов, в том числе излучение от Большого зеркала (рефлектора) антенной системы радиометра и переотражение сигналов от элементов конструкции КА и других источников:

1. Излучение атмосферы Земли, попадающее на вход СВЧ-радиометра, отражаясь от Большого зеркала (рефлектора) антенной системы.
2. Собственное излучение Большого зеркала антенной системы.
3. Излучение элементов конструкции КА, попадающее на вход СВЧ-радиометра, отражаясь от Большого зеркала (рефлектора) антенной системы.
4. Излучение космического пространства, отраженное от элементов конструкции радиометра, попадающее на вход СВЧ-радиометра, отражаясь от Большого зеркала (рефлектора) антенной системы.
5. Излучение корпуса космического аппарата, попадающее на вход СВЧ-радиометра, отражаясь от Большого зеркала (рефлектора) антенной системы.
6. Излучение космического пространства, отраженное от элементов конструкции КА, попадающее на вход СВЧ-радиометра, отражаясь от Большого зеркала (рефлектора) антенной системы.
7. Фоновое излучение непосредственно космического пространства.
8. Вторичное излучение от корпуса сканирующей платформы радиометра.



9. Побочный эффект, связанный с переотражением собственного излучения элементов конструкции КА, конструкцией радиометра и попадающего непосредственно на вход радиометра.
10. Побочный эффект, связанный с переотражением излучения космического пространства элементами конструкции радиометра и попадающего непосредственно на вход радиометра.
11. Вторичное излучение от элементов конструкции космического аппарата.

Обеспечение ЭМС СВЧ-радиометра с другими системами платформы. Виды помех и локализация их источников



Выводы

1. Характеристики существующих СВЧ-приборов для гидрометеорологического обеспечения Органов исполнительной власти, министерств и ведомств Российской Федерации начинают отставать от характеристик зарубежных аналогичных разработок, запуск которых осуществлен в 2023-2024г.г. Перспективные приборы, сроки создания которых постоянно сдвигаются, на момент их запуска могут уже не обеспечить передовые позиции России в космосе.
2. Коллектив отделения 60 АО «Российские космические системы» сохранил основных специалистов – проектантов по составным частям СВЧ-радиометров МТВЗА-ГЯ, МИРОО и МТВЗА-МП. Однако для дальнейшего развития направления, привлечения к работам и обучения молодых специалистов необходимо обеспечить ритмичное финансирование работ, включая НИР (научные и технологические), для совершенствования характеристик приборов.
3. Для совершенствования конструкции бортовых СВЧ-радиометров и освоения новых частотных диапазонов необходимо развитие электронной компонентной базы, технологических процессов производства, измерительного и испытательного оборудования на частоты до 240 ГГц, а в перспективе до 660 ГГц. Для обеспечения рентабельности затрат на разработку и производство новых элементов ЭКБ необходимо скоординировать усилия Госкорпорации «Роскосмос», Минцифры и т. д.
4. Для совершенствования бортовой целевой аппаратуры и конструкции КА, необходимо своевременно обновлять экспериментальную базу и программно-методическую документацию для проведения комплексных испытаний и моделирования условий функционирования БА в составе КА в процессе наземных испытаний.
5. Для совершенствования характеристик космических систем необходимо рассмотреть возможность создания в рамках «больших» ОКР составных частей ОГ на платформах малых аппаратов, что позволило бы сократить время выделения информационных потоков от целевых приборов из общего информационного потока от всего комплекса ЦА и сократить время доставки спутниковых данных потребителю после их предварительной наземной обработки

1. Рекомендация МСЭ-R RS.1861-1 (12/2021). Типовые технические и эксплуатационные характеристики систем спутниковой службы исследования Земли (пассивной), использующей распределения между 1,4 и 275 ГГц / Серия RS. Системы дистанционного зондирования Земли.
2. Jackson P. T. J., Hsu A. Y., Armand N., Kutuza B., Shutko A., Tishchenko Y., Petrenko B., Evtushenko A., Smirnov M., Savorskiy V., Sorokin I., Nikolaev A., Sidorenko A. Priroda passive microwave observations in the Southern Great Plains 1997 hydrology experiment // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'98). 1998. P. 1568–1570.
3. Черный И. В., Чернявский Г. М., Успенский А. Б., Пегасов В. М. СВЧ-радиометр МТВ3А спутника «Метеор-3М» № 1: предварительные результаты летных испытаний // Исследование Земли из космоса. 2003. № 6. С. 1–15.
4. Наконечный В. П., Панцов В. Ю., Прохоров Ю. Н., Стрельников Н. И., Черный И. В., Чернявский Г. М., Данилов С. Г., Казанцев О. Ю. Оптико-микроволновый сканер/зондировщик МТВ3А-ОК // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Вып. 1. Т 1. С. 197–203.
5. Чернявский Г. М. Отечественные технологии спутниковой СВЧ-радиометрии. Аэрокосмический курьер. 2007. № 6. С. 22–24.
6. Болдырев В. В., Ильгасов П. А., Панцов В. Ю., Прохоров Ю. Н., Стрельников Н. И., Черный И. В., Чернявский Г. М., Яковлев В. В. Спутниковый микроволновый сканер/зондировщик МТВ3А-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 243–248.
7. Барсуков И. А., Никитин О. В., Стрельцов А. М., Черный И. В., Чернявский Г. М. Предварительная обработка данных СВЧ-радиометра МТВ3А-ГЯ КА «Метеор-М» №1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 257–264.
8. Cherny I. V., Chernyavsky G. M., Mitnik L. M., Kuleshov V. P., Mitnik M. L. Advanced Microwave Imager/Sounder MTVZA-GY-MP for New Russian Meteorological Satellite // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2017. P. 1220–1223.
9. Cherny I. V., Mitnik L. M., Mitnik M. L., Uspensky A. B., Streltsov A. M. On-orbit calibration of the “Meteor-M” Microwave Imager/Sounder // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2010. P. 558–561.
10. Kunkee D. B., Hong Y., Thompson D. A., Werner M. F., Poe G. A. Analysis of the Special Sensor Microwave Imager Sounder (SSMIS) fields-of-view on DMSP F-16 // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2008. V. 46. No. 4. P. 934–945.
11. Weng F., Zou X., Sun N., Yang H., Tian M., Blackwell W. J., Wang X., Lin L., Anderson K. Calibration of Suomi National Polar-Orbiting Partnership (NPP) Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS) // J. Geophys. Research. Atmosphere. 2013. V. 118. P. 1–14.
12. Imaoka K., Kachi M., Rasahara M., Ito N., Nakagawa K., Oki T. Instrument performance and calibration of AMSR-E and AMSR2 // Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. Kyoto, Japan, 2010. V. 38. Pt. 8.
13. Барсуков И.А., Митник Л.М., Болдырев В.В., Кулешов В.П., Гришунин С.А., Евсеев Г.Е., Митник М.Л., Баранюк А.В. и Стрельцов А.М.: «Метеор-М» № 2-3: предварительные результаты микроволнового зондирования Земли», «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», т.22 №1 (2025) с.315-326.

Литература (продолжение)

14. James J. Jewell, Narinder S. Chauhan, David B. Kunkee, THE CONICAL MICROWAVE IMAGER/SOUNDER (CMIS): NEXT GENERATION CONICAL-SCANNING MICROWAVE RADIOMETER FOR NPOESS, *IEEE IGARSS*, 2002
15. Митник Л. М., Митник М. Л., Чернявский Г. М., Черный И. В., Выкочко А. В., Пичугин М. К. Приводный ветер и морской лёд в Баренцевом море по данным микроволновых измерений со спутников <<Метеор-М>> № 1 и GCOM-W1 в январе – марте 2013 г. // Исследование Земли из космоса. 2015. № 6. С. 1–11.
16. Чернявский Г.М., Митник Л.М., Кулешов В.П., Митник М.Л., Черный И.В. Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника Метеор-М №2. "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Сборник научных статей. Том 15, №3, 2018, с.152-174.
17. [PENG ZHANG](#), [SONGYAN GU](#), [LIN CHEN](#), [JIAN SHANG](#), [MANYUN LIN](#), [AIJUN ZHU](#), [HONGGANG YIN](#), [QIONG WU](#), [YIXUAN SHOU](#), AND [NAIMENG LU](#) // *JOURNAL OF REMOTE SENSING*, 19 Dec 2023, Vol 3, Article ID: 0097
18. <https://www.c4isrnet.com/battlefield-tech/space/2020/05/19/new-military-weather-satellite-passes-key-milestones/>
19. <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/wsf-m>
20. https://en.wikipedia.org/wiki/Weather_System_Follow-on_Microwave
21. https://www.ball.com/aerospace/Aerospace/media/Aerospace/Downloads/D3395_WSF-M_1217.pdf?ext=.pdf
22. [https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Meteorological_missions/Arctic Weather Satellite](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Meteorological_missions/Arctic_Weather_Satellite)
23. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Meteorological_missions/Arctic_Weather_Satellite/Arctic_Weather_Satellite_s_first_images_capture_Storm_Boris
24. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Meteorological_missions/MetOp/MetOp_Second_Generation_instruments
25. Overview of GPM Products, Version 2.1, January, 2017
26. Jeffrey R. Piepmeier *RFI Problems and Solutions in Spaceborne Microwave Radiometers*. // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'2005). 2005. P. 168–170.
27. Первый китайский дождемер - <http://novosti-kosmonavtiki.ru/articles/85869/>
28. Xinran XIA, Wenying HE, Shengli WU, Disong FU, Wei SHAO, Peng ZHANG, Xiangao XIA, «A Thorough Evaluation of the Passive Microwave Radiometer Measurements onboard Three Fengyun-3 Satellites», *Journal of Meteorological Research* > 2023 > 37(4): p.p.573-588
29. [https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2023/10/Copernicus Imaging Microwave Radiometer mission frequency bands](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2023/10/Copernicus_Imaging_Microwave_Radiometer_mission_frequency_bands)