

Многоцелевой радиолокационный самолетный комплекс исследования Земли "МАРС"

А. И. Калмыков, В. Н. Цымбал, А. С. Курекин, В. Б. Ефимов, А. Я. Матвеев,
А. С. Гавриленко, В. В. Иголкин

Центр радиофизического зондирования Земли им. А. И. Калмыкова НАНУ и НКАУ
Украина, 310085, г. Харьков, ул. Ак. Проскуры, 12

Статья поступила в редакцию 22 июня 1998 г.

В работе рассматривается концепция создания многоцелевых многочастотных радиолокационных комплексов дистанционного зондирования Земли. Сформулированы требования к параметрам многочастотных комплексов с учетом физических особенностей рассеяния радиоволн различными типами земной поверхности для решения широкого круга практических и исследовательских задач. Приведены описание особенностей реализации самолетного многоцелевого 4-частотного комплекса "МАРС" и результаты многочастотной радиолокационной съемки земной поверхности.

У роботі розглянуто концепцію створення багаточастотних багаточастотних радіолокаційних комплексів дистанційного зондування Землі. Сформульовано вимоги до параметрів багаточастотних комплексів з урахуванням фізичних особливостей розсіяння радіохвиль різними типами земної поверхні для вирішення широкого кола практичних та дослідницьких задач. Наведено опис особливостей реалізації авіаційного багаточастотного 4-частотного комплексу "МАРС" та результати багаточастотної радіолокаційної зйомки земної поверхні.

1. Введение

В последние годы многие промышленно развитые страны интенсивно создают многочастотные радиолокационные комплексы (МРЛК) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с аэрокосмических носителей. Примерами могут служить космический комплекс SIR-C/X-SAR (США, Италия, Германия), работающий в X, C и L диапазонах, который предполагается дополнительно оснастить радиолокатором (Р диапазона) с синтезированием апертуры (РСА), а также целый ряд самолетных комплексов, среди которых наиболее известны C/X-SAR (Канада), P3-SAR (США), E-SAR (Германия), IMARC (Россия), MARS (Украина) и др. [1].

Особенностью космических радиолокационных комплексов является возможность обзора, независимо от погодных условий и освещенности, глобальных земных территорий, даже удаленных и труднодоступных.

Самолетные комплексы, в свою очередь, позволяют организовать на ограниченных территориях многократные и регулярные наблюдения, что особенно необходимо при контроле за быстропротекающими процессами природных и техногенных катастроф (при разливе нефтепродуктов на морской поверхности, при наводнениях, лесных

пожарах и т. п.). Кроме того, зондирование с самолета позволяет оперативно оптимизировать условия съемки по высоте, направлению, углам освещенности и т. п.

Одним из важных этапов создания новых систем дистанционного зондирования (в т. ч. и космических) является проведение отработок и испытаний этих систем и их узлов на самолетах.

2. Концепция создания многочастотных радиолокационных комплексов

Создание дорогостоящих многочастотных радиолокационных комплексов становится экономически выгодным только в случае их универсальности при реализации возможности решения широкого круга практических и исследовательских задач, который во многом определяется тем, как информация от каждого из радиолокаторов комплекса дополняет (а не дублирует) одна другую. Оптимальный выбор параметров радиолокаторов существенным образом зависит как от особенностей рассеяния радиоволн различными образованиями природной среды, так и специфики решения задач дистанционного зондирования. Рассмотрим основные требования к параметрам

радиолокаторов при решении наиболее важных задач.

Море. Методы радиолокационного зондирования морской поверхности базируются на эффектах, связанных с рассеянием радиоволн взволнованной морской поверхностью [2-4]. При этом зондирование морской поверхности в коротковолновой части сантиметровых волн позволяет наблюдать пространственную изменчивость гравитационно-капиллярных составляющих спектра морского волнения, генерация которых вызвана прежде всего приводным ветром. Известно, что спектральная плотность рассеивающих морских волн $S(\bar{\chi})$ (где $\bar{\chi} = 2\pi/\lambda$ – волновое число поверхностных волн), а следовательно, и удельная эффективная поверхность рассеяния σ^0 зависят от скорости приводного ветра W ($\sigma^0 \sim S(\bar{\chi}) \sim W^n$), а пространственные вариации отраженных сигналов – от пространственной структуры неоднородностей поля приводного ветра. В сантиметровом диапазоне показатель степени $n \sim 1 \div 2$, в то время как в дециметровом диапазоне зависимость σ^0 от скорости приводного ветра W значительно слабее ($n \sim 0,1$), что позволяет исключить флуктуации поля ветра и измерить его усредненные значения, а также параметры крупного волнения. Совместное использование коротких сантиметровых и дециметровых волн дает возможность получать более точную информацию об интенсивности и пространственном распределении приводного ветра и о состоянии морской поверхности.

Кроме ветра, генераторами широкого спектра колебаний морской поверхности (от капиллярных до гравитационных) являются мощные морские течения типа Гольфстрим, зоны апвеллинга, районы подводной вулканической деятельности. Для их диагностики необходимо использовать максимально широкий диапазон радиочастот, включая и метровый.

Для решения экологических задач весьма важно обнаружение пленок поверхностно-активных веществ (ПАВ) и оценка их основных характеристик. Анализ полученных результатов показывает, что для этих целей необходимо проводить их наблюдения как минимум на 3-х частотах в диапазонах миллиметровых, сантиметровых и дециметровых волн [5]. При этом легко решается задача отбора сликов, вызванных разливами нефтепродуктов, среди сликов естественного происхождения (например, ветровые аномалии).

Радиолокационные методы ДЗЗ также могут быть использованы при поиске промысловых районов рыбы. Косяки рыбы у поверхности становятся источниками аномальных колебаний морской поверхности, и их селекция на фоне ветрового волнения возможна при использовании специальных методик одновременного зондирования в

миллиметровых, сантиметровых и дециметровых диапазонах длин волн.

При зондировании морской поверхности предпочтительна вертикальная поляризация излучения и приема. Это обеспечивает при фиксированном потенциале радиосистемы максимальный уровень рассеянного сигнала и, соответственно, наибольшую полосу обзора морской поверхности.

Пространственное разрешение должно быть разным для решения различных задач. Так, для изучения спектров волнения, течений, обнаружения сликов и рыбных косяков необходимо разрешение в десятки метров. Для наблюдения зон штормов, фронтальных зон и т.п. разрешение может составлять от сотен метров до километров. Полосы обзора при этом должны быть не менее 50÷100 км.

Льды. Условия мореплавания в ледовых районах в большой степени определяются состоянием ледяного покрова на этих акваториях, вследствие чего возникает постоянная необходимость в текущей и прогностической информации о состоянии ледяного покрова на региональном уровне. Получение достоверной информации о состоянии ледяного покрова, особенно в приполярных зонах во время полярной ночи и в плохих погодных условиях, могут обеспечить радиолокационные средства ДЗЗ.

Многолетний опыт использования для радиолокационного (РЛ) зондирования морских льдов одночастотных систем (самолетных радиолокаторов бокового обзора (РБО) "Торос", "Нить" [6], а также космических РБО типа ИСЗ "Космос-1500"/"Океан"/, "Сич-1" [7]) свидетельствует о высокой эффективности РЛ данных, получаемых в коротковолновой части сантиметрового диапазона радиоволн, для определения характеристик морских льдов и их картографирования при обеспечении мореплавания. Вместе с тем, получение ряда необходимых параметров ледяного покрова одночастотными системами не всегда является возможным.

Одним из путей повышения информативности данных радиолокационных наблюдений является использование многочастотных методов зондирования. Отметим, что совместное использование традиционных РБО сантиметрового диапазона с радиолокаторами дециметрового и метрового диапазонов радиоволн во многом объясняется существенно большей, чем в сантиметровом диапазоне, глубиной проникновения радиоволн в толщу ледяного покрова из-за более слабого поглощения. При этом толщина деятельных слоев, оказывающих влияние на процессы рассеяния радиоволн дециметрового и метрового диапазонов, может быть близкой к общей толщине льда. К тому же неоднородность структуры морского льда в вертикальном направлении вносит существенно

различный вклад в результаты зондирования в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах радиоволн.

Для многолетних льдов σ^0 монотонно увеличивается с ростом частоты и в диапазоне 9÷17 ГГц ее значение на 10÷14 дБ выше, чем у однолетних льдов. На частоте 1÷2 ГГц σ^0 однолетних льдов несколько больше, чем на 9 ГГц, и практически совпадает с величиной σ^0 многолетних льдов [8]. Интенсивность рассеяния многолетних льдов на частотах 9÷17 ГГц определяется, в основном, эффектами объемного рассеяния в деятельных слоях многолетнего льда [9,10]. В дециметровом диапазоне влияние рассеяния в деятельных слоях незначительно, так как эти слои имеют достаточно низкую плотность, а характерные размеры неоднородностей существенно меньше длины радиоволны. В этом случае интенсивность рассеянных радиосигналов определяется электрофизическими параметрами и флуктуациями диэлектрической проницаемости слоев льда, расположенных ниже деятельных. Поскольку существенно отличия структурно-физических характеристик и распределений показателя преломления в вертикальном направлении толстого однолетнего и монолитного многолетнего льда, расположенного ниже деятельного слоя, не наблюдается [11], значения σ^0 многолетних и однолетних льдов на частотах 1÷2 ГГц и ниже могут быть близкими. При этом величина σ^0 будет зависеть от параметров неоднородностей диэлектрической проницаемости, а не от возраста льда.

Перспективным представляется также использование многочастотных методов зондирования для диагностики соленых морских льдов осеннего и зимнего периодов образования. Спектральные характеристики неоднородностей диэлектрической проницаемости этих льдов оказывают различное влияние на результаты, получаемые в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах радиоволн [12].

Отмеченные обстоятельства свидетельствуют о возможности получения дополнительной информации об исследуемом ледяном покрове при многочастотном зондировании, что повышает достоверность интерпретации данных РЛ съемки.

Поляризация практически не сказывается на результатах зондирования: отличие может быть только на величину коэффициентов Френеля. Вместе с тем использование горизонтальной или кросс-поляризации подчеркивает структуру границ, что важно для обнаружения разводей во льдах. При использовании кросс-поляризации потенциал радиолокатора должен быть на 7÷10 дБ выше из-за малых значений σ^0 .

Полосы обзора радиолокационных систем (РЛС) зондирования льдов должны составлять по крайней мере 50÷100 км для решения тактических

задач (обнаружение каналов во льдах для проводки судов, контроль динамики границы лед-вода).

Пространственное разрешение РЛС для исследования структуры льдов во многом определяется требованиями оперативности использования информации [13]. Информация высокого разрешения (5÷20 м) требует более оперативного использования, чем информация среднего разрешения (50÷100), из-за существенно разного времени существования ледовых образований различных масштабов.

Для решения тактических задач разрешение должно быть не хуже 50÷100 м, при этом информация должна обрабатываться на борту самолета и затем передаваться на суда, ледоколы, в штабы проводки.

Суша. Отсутствие теоретических моделей, способных описать особенности обратного рассеяния от всего многообразия типов поверхности суши, не позволяет достаточно точно сформулировать основные требования к параметрам многочастотных радиолокационных систем. Однако многочисленные экспериментальные исследования и электродинамические оценки дают возможность выделить основные особенности зондирования суши в различных диапазонах радиоволн.

В миллиметровом диапазоне радиоволн интенсивность отражения от верхнего слоя растительного покрова связана с влагосодержанием этого слоя. Эффект влагосодержания также проявляется и на волнах длиной 3÷5 см. При этом возрастает глубина проникновения радиоволн внутрь слоя растительности и определяющим в рассеянии становится тип растительного покрова. Вследствие этого оценка влагозапаса растительности в сантиметровом диапазоне оказывается более достоверной, чем в миллиметровом. Радиоволны дециметрового диапазона, проникая под слой растительности, позволяют получить информацию о влажности верхнего слоя почвы. Одновременное зондирование в миллиметровом, сантиметровом и дециметровом диапазонах дает возможность по оперативной информации о росте сельскохозяйственных культур и влажности почвы осуществлять управляемое земледелие для получения гарантированных урожаев.

Использование радиоволн метрового диапазона направлено на решение многих задач региональной геологии, географии, гидрологии, сельского хозяйства и связано с их высокой проникающей способностью. Глубина проникновения радиоволн в грунт δ определяется как [14]:

$$\delta \cong \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\sqrt{\epsilon'}}{\epsilon''}$$

где ϵ' и ϵ'' – вещественная и мнимая части диэлектрической проницаемости почвы. Для сухих мате-

риалов ($\epsilon' = 1 \div 5$, $\epsilon'' < 0,1$) $\delta \gg \lambda$, что позволяет решать задачи подповерхностного зондирования слабопоглощающих сред (например, изучать структуру ледников, обнаруживать трещины во льдах под толстым слоем снега, исследовать зоны вечной мерзлоты и пустыни).

С ростом влажности почвы глубина проникновения экспоненциально уменьшается. Учитывая различную глубину проникновения радиоволн разной длины в толщу почв, принципиально возможно измерить глубинное распределение влажности при многочастотном зондировании.

Для получения исчерпывающей информации об исследуемых объектах поверхности суши радиолокаторы многочастотных комплексов должны измерять полную матрицу рассеяния, т. е. излучать и принимать радиосигналы на одинаковых и кросс-поляризациях (ВВ, ГГ, ВГ и ГВ). Однако

для большинства решаемых задач коротковолновым (миллиметровый и сантиметровый диапазоны) радиолокаторам достаточно иметь только ВВ поляризацию.

Опыт эксплуатации МРЛК показывает, что выбор пространственного разрешения радиолокаторов комплекса – 20÷50 м – является оптимальным с точки зрения технической реализации и достаточности для решения большинства научно-практических задач, а возможность регистрации радиоголограмм позволяет получать изображения с высоким разрешением при наземной обработке. Такой подход значительно сокращает затраты на изготовление аппаратуры для бортовой обработки сигналов.

Полосы обзора радиолокаторов должны быть не менее 30 км.

Таблица 1 Основные характеристики МРЛК "МАРС"

Характеристики	РБО-0.8	РБО-3	РСА-23	РСА-180
Длина волны, см	0,8	3	23	180
Длительность зондирующего импульса, мкс	0,15	0,15		
сжатого ЛЧМ импульса, мкс			0,15	0,25
растянутого ЛЧМ импульса, мкс			7	28
Мощность излучения в импульсе, кВт	50	100	1,5	0,3
Ширина спектра, МГц	6,5	6,5	12	6,5
Частота повторения зондирующих импульсов, Гц	1000	1000	1000	1000
Чувствительность приемника, Вт	10^{-12}	10^{-13}	10^{-14}	$5 \cdot 10^{-14}$
Коэффициент усиления антенны, дБ	33	30	19,4	11
Ширина диаграммы направленности антенны, град:				
в азимутальной плоскости	0,3	0,6	3,6	35
в угломестной плоскости	50	42	63	70
Тип антенны	Антенна дифракционного излучения	Волноводно-щелевая антенна	АФАР	ФАР
Управление положением ДН в азимутальной плоскости			32 шага ($\pm 10^\circ$)	
Поляризация	ВВ, ГГ, ВГ	ВВ	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ	ВВ, ГГ, ВГ, ГВ
Полоса обзора, км	15	2×45	15; 30	30; 60
Начальный угол обзора, град	20	20	20	20
Пространственное разрешение, м	30...50 ^а	20...50 ^а	25...50 ^а 2,5...25 ^б	50...100 ^а 10...50 ^б
Выходной поток данных, Мбит/с			0,128...6,4 ^б	
Радиометрическое разрешение, дБ			5...0,5 ^б	

^а цифровая бортовая обработка
^б цифровая наземная обработка

3. Особенности построения многоцелевого радиолокационного самолетного комплекса дистанционного исследования Земли МРЛК "МАРС"

В соответствии с рассмотренной выше концепцией в 1988-89 гг. в ИРЭ НАНУ был создан и установлен на борт самолета-лаборатории ИЛ-18Д МРЛК "МАРС". На рис. 1 приведена укрупненная структурная схема МРЛК "МАРС", а в таблице 1 – основные характеристики комплекса. Необходимо отметить, что параметры радиолокаторов комплекса оптимизированы для решения широкого круга научных и практических задач. Пространственное разрешение комплекса определялось характерными размерами исследуемых пространственных образований, процессов и явлений (например, размеры неоднородностей полей ветра $\approx 30 \div 50$ м), а полосы обзора выбирались исходя из размеров объектов исследования ($15 \div 60$ км).

Особенностями реализации МРЛК являются:

1. Высокая контрастно-фоновая чувствительность радиолокаторов комплекса.
2. Возможность абсолютной калибровки радиолокаторов комплекса.
3. Использование навигационных данных GPS – спутниковой системы позиционирования.
4. Совмещение в комплексе двух коротковолновых радиолокаторов бокового обзора (РБО-0,8, РБО-3), выполненных по классической схеме импульсного радиолокатора с реальной апертурой, и двух длинноволновых радиолокаторов с синтезированием апертуры (РСА-23, РСА-180).
5. Применение в РСА-23 активной фазированной решетки (АФАР) с электронным управлением положением диаграммы направленности в пространстве для компенсации угла сноса самолета.
6. Бортовая обработка в реальном времени для получения оперативной информации.
7. Запись голограмм исследуемых объектов для дальнейшей наземной обработки с целью получения радиолокационных изображений с высоким разрешением.

4. Некоторые результаты работы МРЛК "МАРС"

С 1989 г. по 1995 г. с помощью МРЛК "МАРС" был проделан большой комплекс исследований и практических работ, который проводили сотрудники ИРЭ НАНУ, ГМНП "Экорадар" и ЦРЗЗ им. А. И. Калмыкова НАНУ и НККАУ (г. Харьков) совместно с ГОСНИИГА (Россия, г. Москва), АА НИИ (Россия, г. Санкт-Петербург), ПИНРО (Россия, г. Мурманск).

В этот период регулярно осуществлялись морские исследования и проводка караванов судов во

льдах Арктики, проводились поиски рыбных косяков и нарушителей лова рыбы в Баренцевом, Норвежском и Северном морях, контролировались разливы нефтепродуктов в Каспийском и Черном морях, проводились геологические исследования, оценивались паводковые ситуации и качество полива полей на Украине, осуществлялся мониторинг Чернобыльской зоны и др. По результатам работы МРЛК "МАРС" составлен банк данных. Некоторые из результатов приведены ниже.

На рис. 2 приведены синхронные радиолокационные изображения участка Тихого океана возле о. Беринга, в 3-см и 23-см диапазонах длин волн, а также интерпретационная карта, построенная по данным съемки. На карте показаны параметры поля приводного ветра, указано положение холодного атмосферного фронта, а также основное направление движения и средняя длина крупномасштабных морских волн. Практическое использование такой информации обеспечивает удешевление морских транспортных перевозок и повышение их безопасности.

Синхронные изображения участка Каспийского моря вблизи нефтедобывающих платформ месторождения "Нефтяные камни" в 3-см и 23-см диапазонах длин радиоволн, полученные во время проведения операции по ликвидации катастрофического разлива нефти на морской поверхности, представлены на рис. 3. Сравнение изображений позволяет выделить наиболее опасные участки (2), покрытые толстой пленкой нефти.

На рис. 4 приведены радиолокационные изображения участка поливных полей в районе Каховского водохранилища, полученные в 3-см и 23-см диапазонах длин радиоволн. На рисунке в виде окружностей видны поля (некоторые из них показаны стрелкой), орошение которых производится поливными установками типа "Фрегат". Различия в интенсивности отраженных от этих полей радиосигналов зависят от вида выращиваемой культуры, биомассы растительности и степени увлажненности почвы.

Синхронная 4-частотная съемка одного из островов архипелага Земля Франца-Иосифа (см. рис. 5) показывает существенные различия в РЛ изображениях, вызванные физическими особенностями рассеяния радиоволн разных диапазонов различными типами морских льдов и неоднородностями внутренней структуры ледников.

Возможности подповерхностного зондирования МРЛК "МАРС" демонстрируются на рис. 6. Здесь на РЛ изображении аэродрома в выделенном пунктиром прямоугольнике в 3-см диапазоне радиоволн видна взлетная полоса, на месте которой в изображении дециметрового диапазона начинает проявляться, а в изображении метрового диапазона четко видно подземное строение.

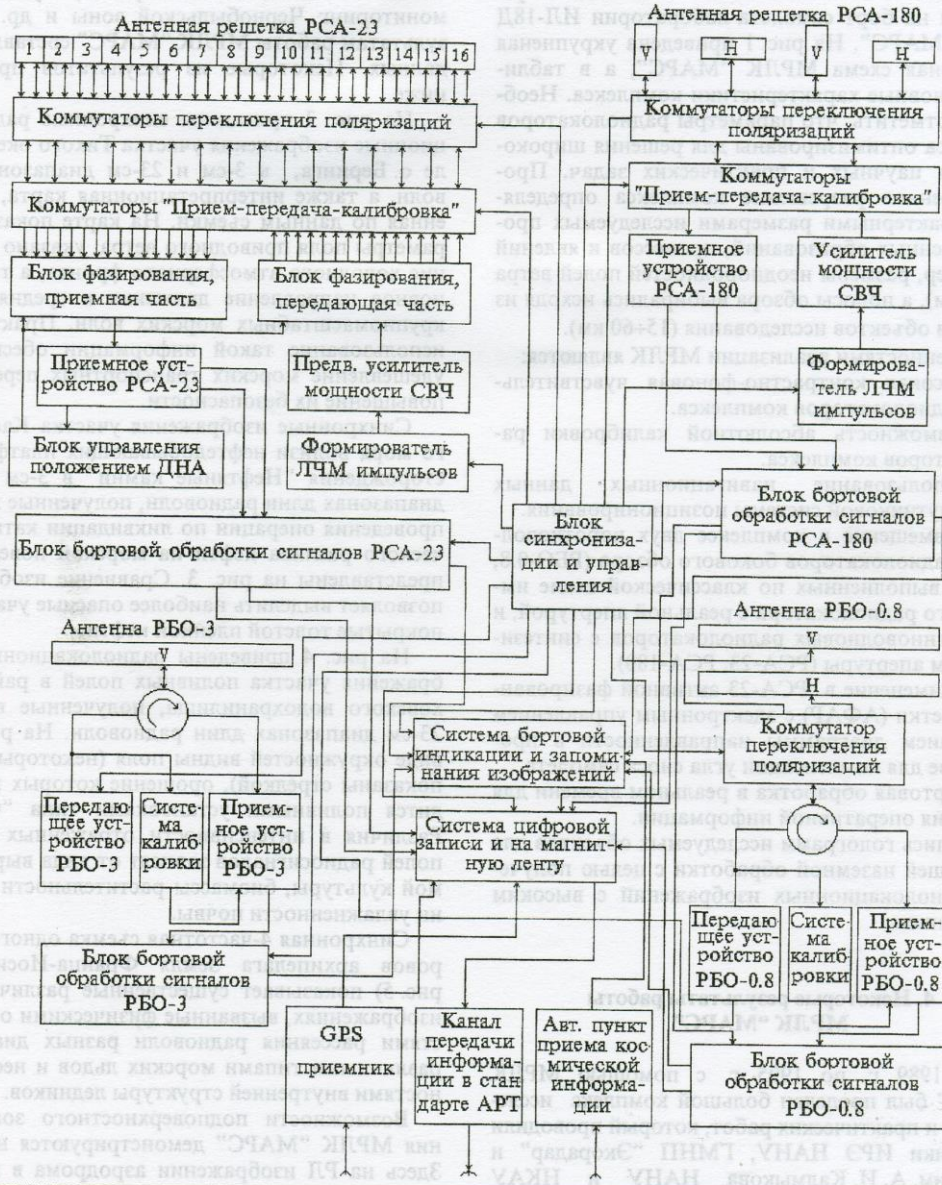


Рис. 1. Структурная схема МРЛК "МАРС"

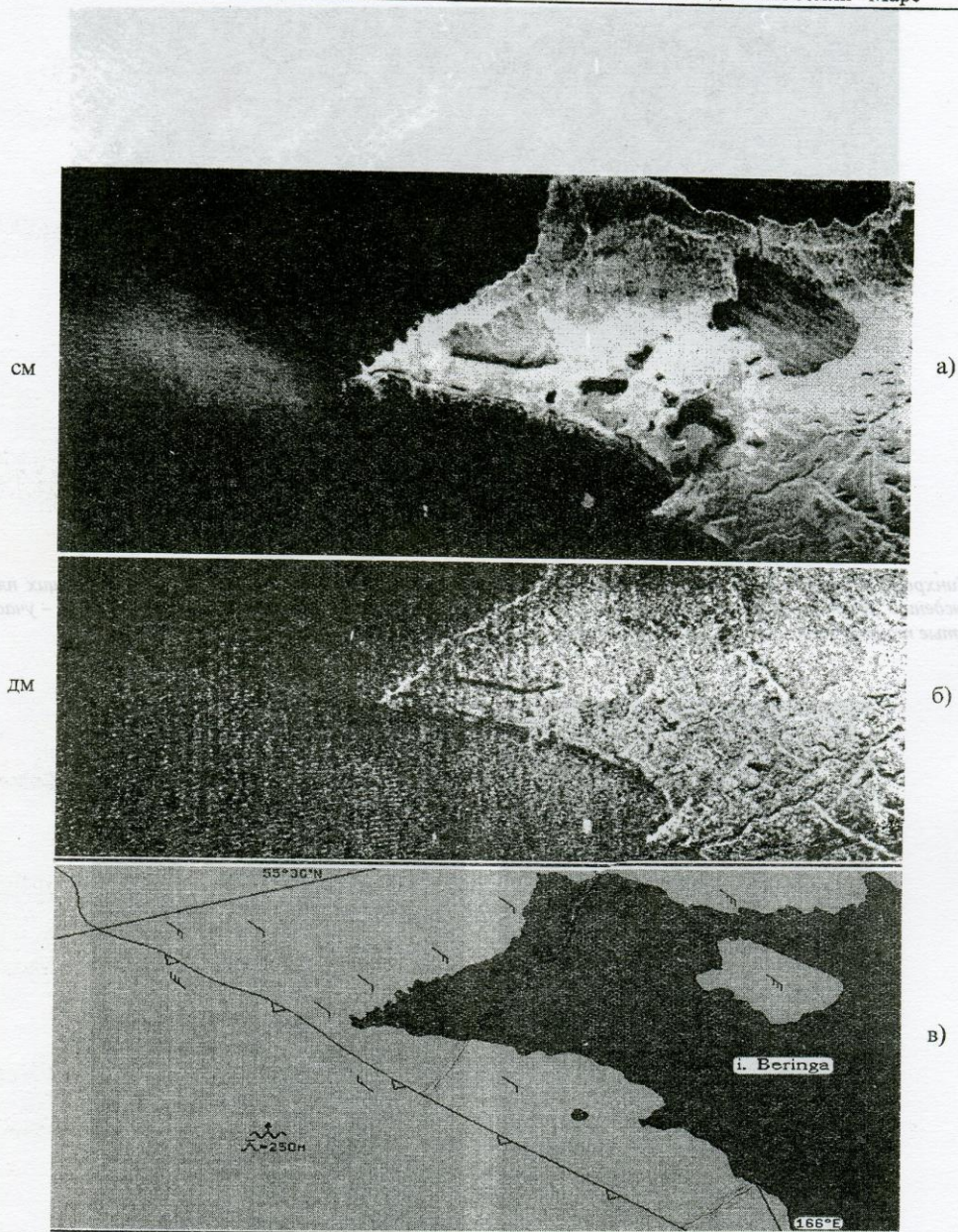


Рис. 2. Синхронные радиолокационные изображения участка Тихого океана возле о. Беринга, полученные МРЛК "МАРС" в 3-см (а) и 23-см (б) диапазонах длин радиоволн, а также интерпретационная карта (в), построенная по данным съемки

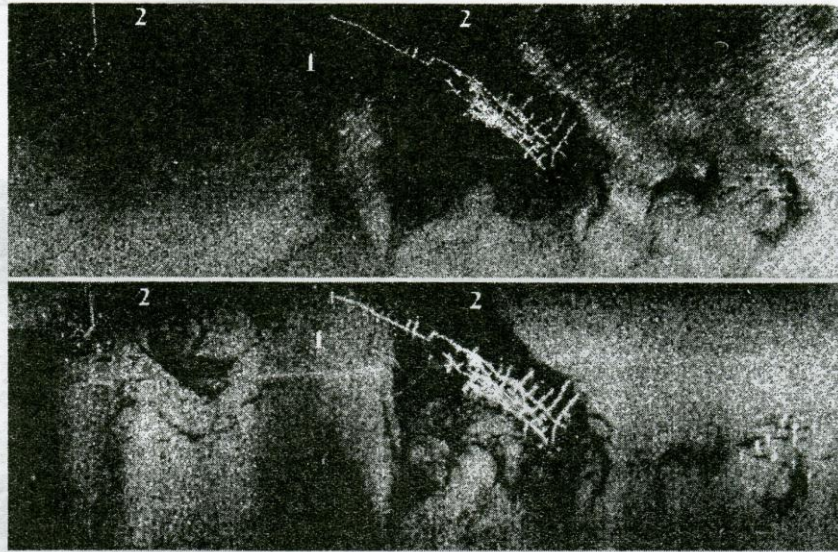


Рис. 3. Синхронные радиолокационные изображения участка Каспийского моря вблизи нефтедобывающих платформ месторождения "Нефтяные камни", полученные МРЛК "МАРС" в 3-см и 23-см диапазонах длин волн. 1 – участки моря, покрытые тонкой ($\delta < 0,1$ мм), 2 – более толстой ($\delta > 0,5$ мм) нефтяной пленкой

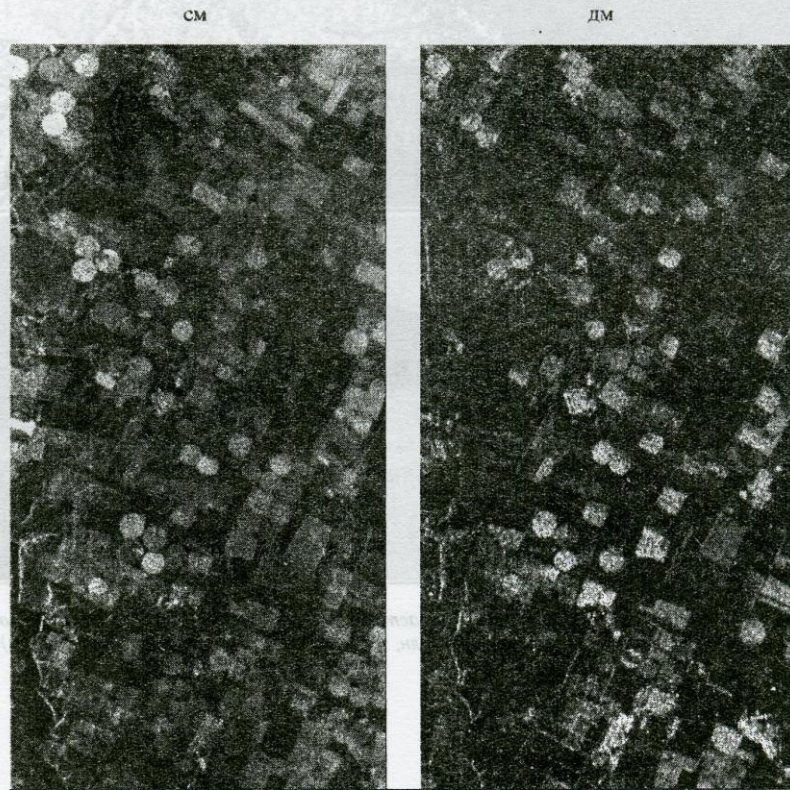


Рис. 4. Синхронные радиолокационные изображения участка поливных полей в районе Каховского водохранилища, полученные МРЛК "МАРС" в 3-см и 23-см диапазонах длин радиоволн

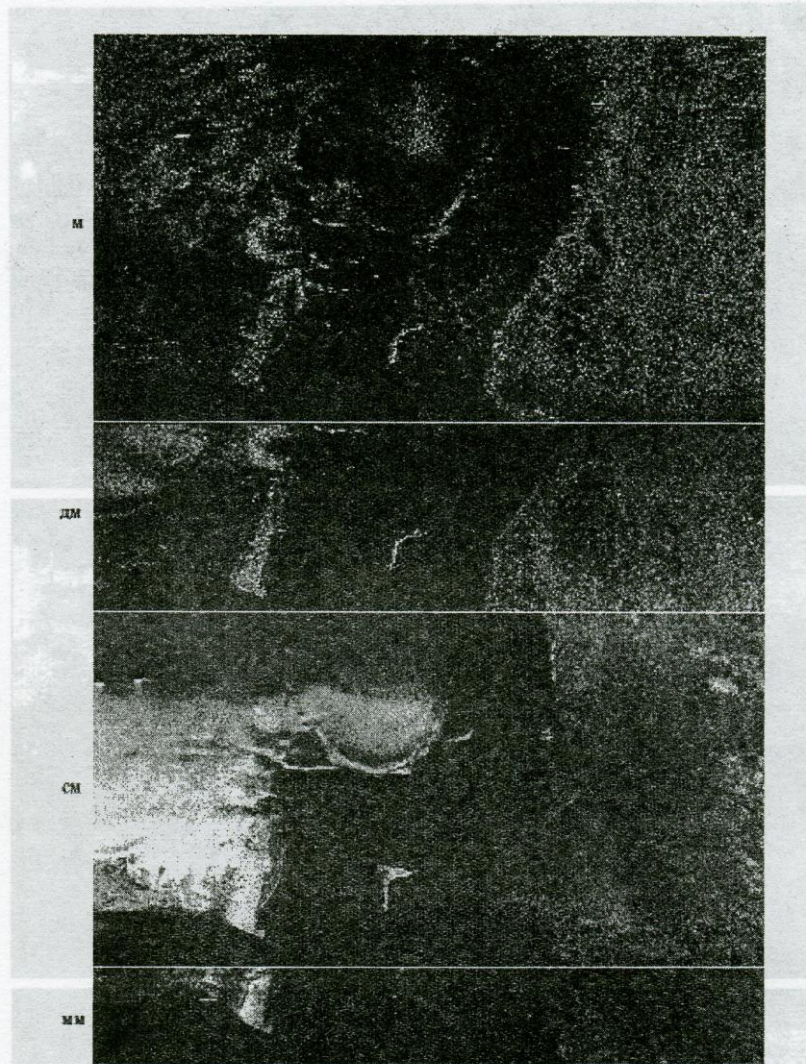


Рис. 5. Синхронное 4-частотное изображение одного из островов архипелага Земля Франца-Иосифа, полученное с помощью МРЛК "МАРС"

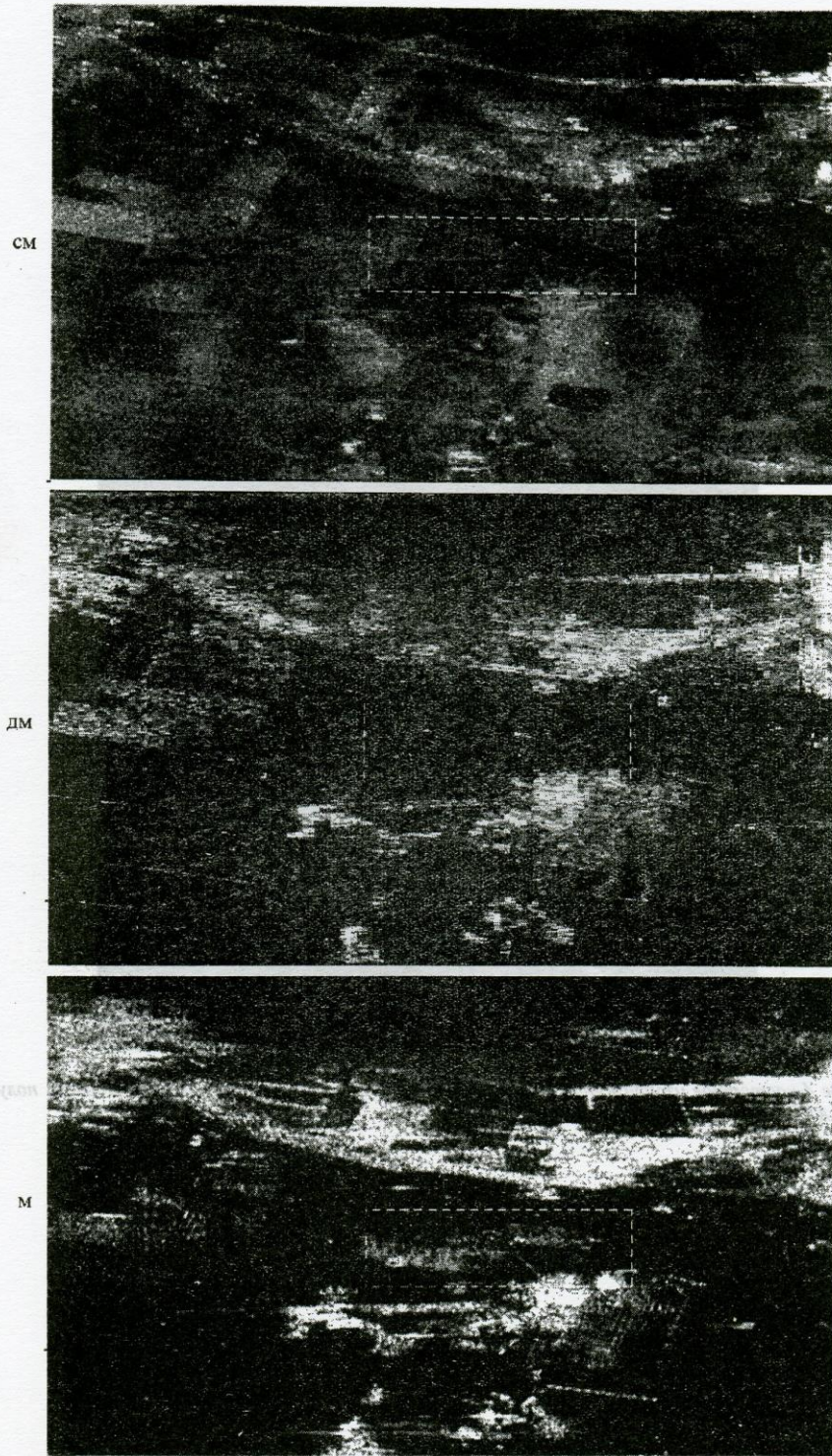


Рис. 6. Многочастотные радиолокационные изображения одного и того же участка суши, полученные МРЛК "MARS" в сантиметровом, дециметровом и метровом диапазонах радиоволн

5. Заключение

В данной статье проиллюстрирован методический подход к выбору основных параметров многоцелевых радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли. Результаты работы созданного МРЛК "МАРС" подтверждают правильность такого подхода. Необходимо отметить, что достоверность информации и круг решаемых задач могут быть значительно расширены при совместном использовании радиолокационных систем с традиционными средствами ДЗЗ (оптические и ИК-системы), для которых уже разработан ряд методик исследования различных видов земной поверхности.

В заключение авторы благодарят всех сотрудников ИРЭ НАНУ и ЦРЗЗ им. А. И. Калмыкова НАНУ и НКАУ, принимавших участие в создании МРЛК "МАРС", проведении исследований и обработке полученных результатов.

Литература

1. W. Keydel. Proc. European Conf. on Synthetic Aperture Radar, EUSAR'96: 26-28 March 1996. Königswinter (Germany). VDE-VERLAG GMBH *Berlin*Offenbach, 1996, pp. 19-24.
2. F. G. Bass, I. M. Fuks, A. I. Kalmykov, I. M. Ostrovsky, A. J. Rosenberg. IEEE Trans. Antennas and Propag. 1968, AP-16, No. 5, pp. 554-568.
3. Ф. Г. Басс, И. М. Фукс. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. Москва, Наука, 1972, 424 с.
4. А. И. Калмыков, В. Н. Цымбал, А. Н. Блинков, А. С. Курекин, Г. П. Кулемин. Препринт ИРЕ АН УССР. Харьков, 1990, № 90-21, 35 с.
5. А. Г. Боев, Г. Э. Карвицкий. Радиофизика и радиоастрономия. 1997, 2, №3, с. 281-287.
6. А. В. Бушуев, Ю. Д. Быченков, В. С. Лошилов, А. Д. Масанов. Исследование ледяного покрова с по-

- мощью радиолокационных станций бокового обзора (РЛС БО). Ленинград, Гидрометеиздат, 1985, 264 с.
7. Радиолокация поверхности Земли из космоса. Под ред. Л. М. Митника, С. В. Викторовой. Ленинград, Гидрометеиздат, 1990, 200 с.
8. R. Q. Onstott, R. Q. Moor, W. F. Weeks et al. IEEE Trans. Geosci. Electronic. 1979, GE-17, No. 1, pp. 78-85.
9. П. А. Никитин. Труды Гос. НИЦИПР. Ленинград, Гидрометеиздат, 1986, вып. 25, с. 85-92.
10. L. Tsang, J. A. Kong. Radio Science. 1976, 11, No. 7, pp. 593-598.
11. Г. П. Хохлов. Труды АА НИИ. Ленинград, Гидрометеиздат, 1978, 359, с. 4-12.
12. А. И. Калмыков, В. Б. Ефимов, А. С. Курекин и др. В сб.: Тез. докл. Международного научного семинара по аэрокосмическому мониторингу земных покровов и атмосферы. Киев, Общество "Знание", 1993, с. 33-36.
13. А. И. Калмыков, В. Н. Цымбал, С. А. Величко и др. Препринт ИРЕ АН УССР. Харьков, 1989, №380, 27 с.
14. F. Ulaby, R. Moore, A. Fung. Reading, M., Addison-Wesley, 1982.

Multipurpose Airborne Earth's Remote Sensing Radar System "MARS"

A. I. Kalmykov, V. N. Tsymbal, A. S. Kurekin, V. B. Yefimov, A. Ya. Matveyev, A. S. Gavrilenko, V. V. Igolkin

This paper deals with the concept of developing a multipurpose multifrequency radar systems of the Earth's remote sensing. The requirements are formulated for the multifrequency system parameters in which the physical properties of radio wave scattering from various types of the Earth's surface have been taken into account to solve a wide range of practical and research problems. The implementation of the airborne multipurpose four-frequency system "MARS" is described and the results of the multifrequency radar surveying of the Earth's surface are presented.