

Модели рассеяния радиоволн подстилающими поверхностями и их учет в системах радиолокационного зондирования

А.И.Калмыков* , И.М.Фукс**

*Центр радиофизического зондирования Земли Национальной Академии наук и
Национального космического агентства Украины
Украина, 310085, Харьков, ул.ак.Проскуры,12**

*Радиоастрономический институт Национальной Академии наук Украины
Украина, 310002, Харьков, ул.Краснознаменная,4***

Статья поступила в редакцию 18 января 1996 г., после переработки 10 июля 1996 г.

Проведен сравнительный анализ существующих систем дистанционного радиозондирования Земли (ДРЗ) радиофизическими методами с борта аэрокосмических носителей с помощью радиолокаторов бокового обзора (РБО) и радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА). Перечислены наиболее важные задачи ДРЗ, решаемые в диапазоне см-дм радиоволн с борта искусственных спутников Земли и летающих самолетов-лабораторий, а также наиболее распространенные теоретические модели, привлекаемые для интерпретации данных ДРЗ. Приведены оригинальные экспериментальные результаты ДРЗ, полученные с борта самолета-лаборатории с помощью РБО в диапазоне волн 0.8 см и 3 см и РСА на волнах 23 см и 180 см на вертикальной и горизонтальной поляризации. Отмечены особенности радиолокационных контрастов (РЛК) изображений подповерхностных объектов (типа металлических труб, пластин, слоев с повышенной влажностью и т.д.) - слабая зависимость РЛК от ориентации объекта, превышение РЛК на горизонтальной поляризации над вертикальной, увеличение РЛК с ростом угла падения и длины волны излучения. Предложена модель формирования РЛК, в которой определяющую роль играет диффузное рассеяние на неровностях земной поверхности сигналов, зеркально отраженных от подповерхностного объекта в виде плоского слоя или пластины конечных размеров. Приведены результаты расчетов РЛК для двух типов грунта - сухого песка и влажной глины.

Виконано порівняльний аналіз існуючих систем дистанційного радіозондування Землі (ДРЗ) радіофізичними методами з борта аерокосмічних носіїв за допомогою радіолокаторів бокового огляду (РБО) та радіолокаторів з синтезованою апертурою (РСА). Дано перелік найбільш важливих задач ДРЗ, що вирішуються в діапазоні см-дм радіохвиль з борта штучних супутників Землі та літаків-лабораторій, а також найбільш поширених теоретичних моделей, що застосовуються для інтерпретації даних ДРЗ. Наведено оригінальні експериментальні результати ДРЗ, які одержано на борту літака-лабораторії за допомогою РБО на радіохвилях 0.8см та 3см, а також РСА на хвилях 23см та 180см на вертикальній та на горизонтальній поляризації випромінювання. Відзначено особливості радіолокаційних контрастів (РЛК) зображень підповерхневих структур (типа металевих труб, пластин, шарів з підвищеною вологістю та інші) - слабка залежність РЛК від орієнтації об'єктів, перевищення РЛК на горизонтальній поляризації порівняльно з вертикальною, збільшення РЛК при зростанні кута падіння та довжини радіохвилі. Запропонована модель формування РЛК, у якій визначну роль відіграє дифузне розсіяння на шерехатостях земної поверхні радіохвиль, які дзеркально відбиваються від підповерхневого об'єкту у вигляді плоского шару або пластівки кінцевого розміру. Наведено результати розрахунків РЛК для двох типів ґрунтів - сухого піску та вологої глини.

Радиолокационные системы изначально создавались для обнаружения целей, и лишь в последние четверть века используются при решении различных народнохозяйственных задач. Одно из важнейших направлений широкомасштабного внедрения радиолокационных (РЛ) систем в народное хозяйство и радиофизических методов в научные исследования связано с дистанционным радиозондированием

(ДРЗ) природной среды. Огромным преимуществом РЛ систем ДРЗ поверхности Земли с аэрокосмических носителей в диапазоне 100 МГц - 1 ГГц по сравнению с системами оптического и инфракрасного (ИК) диапазона является их всепогодность, которая обеспечивается малым затуханием радиоволн при распространении их в облаках, тумане и даже в осадках, а также высокая оперативность получения потребите-

лями информации как при бортовой, так и при наземной обработке. Независимость результатов ДРЗ от наличия облачности и условий освещенности позволяет использовать их круглосуточно и на высоких широтах даже в условиях полярной ночи, когда традиционные оптические системы являются малоэффективными. Кроме этого, высокая проникающая способность радиоволн по сравнению с электромагнитными волнами других диапазонов позволяет успешно решать и задачи подповерхностного ДРЗ. Единственный параметр, по которому РЛ системы ДРЗ до последнего времени уступали оптическим, это существенно меньшее пространственное разрешение РЛ изображений

по сравнению с оптическими. Однако разработка радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) позволила получить и в радиодиапазоне рекордное разрешение в единицы метров. Кроме того, следует отметить, что для решения целого ряда практических задач ДРЗ нет необходимости в столь высокой разрешающей способности: многие проблемы, связанные с метеопрогнозами и с получением информации о состоянии атмосферы, океана и ледовых покровов, могут успешно решаться и при разрешении в несколько сотен метров (или даже нескольких километров), но при этом необходимо обеспечивать широкую полосу обзора - до тысячи километров.

Таблица 1

Космические радиолокационные системы

Тип радиолокатора	Программа/Спутник	Год пуска/Время работы	Длина волны (см)/Поляризация	Полоса обзора (км)	Разрешение	Обработка информации
Скаттерометер	SEASAT ERS-1	1978/3мес 1991/	2,1/ВВ,ГГ 6 / ВВ	500 500	50 км 50 км	на Земле на Земле
Радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА)	SEASAT	1978/3 мес.	23 / ГГ	100	25 м	на Земле
	SIR-A SHUTTLE	1981/ 5 дн.	23/ ГГ	54.6	37 м	на Земле
	SIR-B SHUTTLE	1984/ 7 дн.	23/ ГГ	50	35 м	на Земле
	КОСМОС - 1870	1987/ 24 мес.	10/ВВ	20	25 м	на Земле
	АЛМАЗ	1991/	10/ВВ	20	20 м	на Земле
	ERS-1	1992/	6/ВВ	100	30 м	на Земле
	JERS-1	1992	23/ ГГ	75	18 м	на Земле
	SHUTTLE	1994	6/ВВ			на Земле
SIR-C/X-SAR	1995	3/ВВ			на Земле	
ERS-2	1995	6/ВВ		100	30 м	на Земле
Radarsat	1995	6/ ГГ		100	30 м	на Земле
Радиолокатор бокового обзора (РБО)	КОСМОС-1500 КОСМОС-1602 КОСМОС-1766 КОСМОС-1869 ОКЕАН-1 ОКЕАН-2 ОКЕАН-3 ОКЕАН-4 Сич-1	1983/33 мес. 1984 1986 1987 1988 1990 1991 1994 1995	3,1/ ВВ	475	0,8 x 2,5 км	на борту

Уникальные научные эксперименты, выполненные с борта ИСЗ SEASAT, SHUTTLE, АЛМАЗ, ERS-1 с использованием РСА [1] (таблица 1), а также практическое использование данных радиолокаторов бокового обзора (РБО) ИСЗ типа Космос-1500/Океан [2] подтверждают перспективность РЛ систем ДРЗ для решения широкого спектра фундаментальных и прикладных проблем. Эффективность использования и масштабность внедрения РЛ систем ДРЗ определяется тремя основными факторами: уровнем и результатами научных

исследований, разработкой основанных на них методов и возможностями их технической реализации.

Среди научных проблем важнейшими являются фундаментальные исследования механизма рассеяния радиоволн объектами природной среды. Следует напомнить, например, что природа рассеяния СВЧ радиоволн морской поверхностью изучалась еще со времен второй мировой войны [3]. И лишь с конца 60-х годов, когда был выяснен физический механизм и разработана адекватная модель рассеяния СВЧ

радиоволн морской поверхностью [4], открылись возможности широкомасштабного внедрения радиолокационных систем, в том числе и на аэрокосмических носителях, для ДРЗ океана [5]. Как отмечают океанологи, именно с развитием РЛ методов созданы принципиально новые возможности оперативного получения информации о состоянии не только поверхности океана [6], но и скорости и направления приповерхностного ветра и течений, наличия пленок поверхностно-активных веществ (ПАВ), мощности и возраста ледовых полей и т.д.

Интерпретация РЛ данных ДРЗ основана на нескольких основных моделях рассеяния радиоволн объектами природной среды. В большинстве случаев основной вклад в РЛ сигнал вносит рассеяние на границе раздела воздух-среда (океан, льды, суша), которая может рассматриваться как статистически неровная поверхность, описываемая в рамках теории случайных полей с помощью функций распределения вероятностей, пространственно-временных автокорреляционных функций, энергетических спектров и т.д. Если для решения задач ДРЗ океана поверхностное рассеяние является единственным механизмом формирования РЛ сигнала, то при ДРЗ льдов и суши необходимо, вообще говоря, учитывать и объемное рассеяние внутри среды, так как глубина проникновения радиоволн в сухие пески и пресные льды может достигать десятков и даже сотен метров, что, собственно, и позволяет проводить их подповерхностное ДРЗ.

1. В настоящее время отсутствуют точные аналитические методы решения задачи рассеяния (дифракции) волн на статистически неровной границе раздела двух сред. Возможности прямого компьютерного моделирования процесса рассеяния ограничиваются быстродействием и объемом памяти даже современных ЭВМ: максимум, чего удалось достичь на этом пути - это решение задачи о дифракции на идеально проводящей поверхности с двумерными неровностями (типа шифера) с 20-30 точками дискретизации значений поля и профиля поверхности [7], т.е. по сути решалась задача о дифракции на совокупности ограниченного числа дискретных отражателей, а не на непрерывной поверхности. Поэтому до сих пор основную эвристическую и практическую роль играют приближенные аналитические методы расчета рассеянного поля и создаваемые на их основе модели (см., например, [8]).

1. Метод малых возмущений (ММВ) используется при решении задачи рассеяния волн на поверхности с низкими (по сравнению с

длиной волны) неровностями, когда выполняется условие малости параметре Релея P :

$$P = (2kh \cos \Theta)^2 \ll 1, \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$, λ - длина волны излучения, h - высота неровностей (дисперсия отклонений ординат поверхности от средней плоскости), Θ - угол падения (между направлением облучения и нормалью к средней плоскости). Горизонтальный размер неровностей l (радиус корреляции) может быть сколь угодно большим, но при этом они должны быть достаточно пологими $\gamma_0^2 = h^2/l^2 \ll 1$ (γ_0^2 - дисперсия наклонов неровностей). Удельная (отнесенная к единице освещенной площади S) поляризационная матрица рассеянного сигнала определяется через напряженность рассеянного электрического поля $\bar{E}(\bar{R})$ в дальней зоне формулой

$$\begin{aligned} \sigma_{p_1 p_2}^{p_0} &= 4\pi R^2 \langle (\bar{E}_{p_1}) (\bar{E}_{p_2})^* \rangle / S |E_0|^2 = \\ &= 16\pi k^4 F_{p_1}^{p_0} (F_{p_2}^{p_0})^* S_\zeta(\bar{q}), \end{aligned} \quad (2)$$

где R - расстояние до облучаемой поверхности, E_0 - напряженность поля падающей волны у поверхности, \bar{p}_0 - единичный вектор ее поляризации, $\bar{p}_{1,2}$ - единичные векторы поляризации приемной системы (вообще говоря, комплексные для эллиптической поляризации);

$$S_\zeta(\bar{q}) = 1/(2\pi)^2 \iint W_\zeta(\bar{\rho}) \exp(i\bar{q}\bar{\rho}) d^2\bar{\rho} \quad (3)$$

пространственный энергетический спектр неровностей поверхности, описываемой уравнением $Z = \zeta(\bar{r})$, $(\bar{r} = (x, y))$, а $W(\bar{\rho}) = \langle \zeta(\bar{r} + \bar{\rho}) \zeta(\bar{r}) \rangle$ - их автокорреляционная функция; $\bar{q} = \bar{k}^1 - \bar{k}$ - вектор рассеяния, \bar{k} - волновой вектор падающего поля, \bar{k}^1 - рассеянного поля; $F_p^{p_0}$ - длина рассеяния, которая в радиолокационном случае ($\bar{k}^1 = -\bar{k}$) следующая [9]:

$$F_p^{\bar{h}_0} = (\varepsilon - 1)(1 + V_\Gamma) \times \\ \times \left[(1 + V_\Gamma)(\bar{p}_0 \bar{p}) + (1 - V_B^2) p_z p_{0z} (\varepsilon - 1) / \varepsilon \right] / 4 \quad (4)$$

ε - комплексная диэлектрическая проницаемость отражающей среды, $V_{\Gamma, B}(\Theta)$ - коэффициенты Френеля на горизонтальной и вертикальной поляризации соответственно. Из формул (2), (3) следует, что рассеяние на слабошероховатой поверхности является резонансным: в любом заданном направлении \bar{k}^1 рассеивает только одна пространственная гармоника поверхности с волновым вектором $\bar{q}_1 = \bar{q} - \bar{e}_z(\bar{q} \cdot \bar{e}_z)$ (\bar{e}_z - орт вдоль оси Z , направленный по нормали к средней плоскости). В частности, интенсивность радиолокационных отражений обеспечивается только теми пространственными Фурье-компонентами поверхности (плоскими поверхностными волнами), образующие которых перпендикулярны к направлению облучения, а пространственный период равен $\lambda/2 \sin \Theta$.

2. Метод касательной плоскости (МКП), или метод Кирхгофа, применяется для решения задачи рассеяния на поверхности с большими по сравнению с длиной волны неровностями $z = Z(\bar{r})$. При этом допустимы сколь угодно большие значения параметра Релея, однако неровности должны быть достаточно гладкими в масштабе длины волны - $ka \cos^3 \Theta \gg 1$ (a - характерный радиус кривизны поверхности). При $R \ll 1$ и в направлениях рассеяния, близких к направлению зеркального отражения от средней плоскости $z = 0$, результаты, полученные с помощью МКП, совпадают с результатами ММВ. В обратном предельном случае ($R \gg 1$) МКП приводит к формулам геометрической оптики. В частности, в радиолокационном направлении

$$\sigma_{\bar{p}_1 \bar{p}_2}^{\bar{p}_0} = \pi \delta_{\bar{p}_0 \bar{p}_1} \delta_{\bar{p}_1 \bar{p}_2} |V(0)|^2 / \cos^4 \Theta W(\bar{\Gamma}_0), \quad (5)$$

где

$$V(0) = (1 - \sqrt{\varepsilon}) / (1 + \sqrt{\varepsilon}),$$

$\delta_{\bar{p}_0 \bar{p}}$ - символы Кронекера, $W(\bar{\Gamma}_0)$ - плотность распределения вероятностей тех наклонов неровностей $\Gamma = \nabla Z(\bar{r})$, которые обеспечивают зеркальное отражение назад (нормаль \bar{n} к

поверхности в этих точках направлена по вектору - $\bar{k} : \bar{n}_0 = -\bar{k}/k = (\bar{e}_z - \bar{\Gamma}_0) / \sqrt{1 + \Gamma_0^2}$.

3. Двухмасштабная модель (ДММ) - применяется для интерпретации экспериментальных данных о рассеянии радиоволн на естественных поверхностях с широким спектром вертикальных h и горизонтальных l масштабов, когда не выполняются условия применимости ни ММВ, ни МКП. Рассеивающая поверхность в ДММ рассматривается как суперпозиция мелкомасштабной ряби $z = \zeta(\bar{r})$, для расчета рассеяния на которой применим ММВ, и гладких крупномасштабных неровностей $z = Z(\bar{r})$ с наклонами $\Gamma = \nabla Z(\bar{r})$ и нормальными $\bar{N} = (\bar{e}_z - \bar{\Gamma}) / \sqrt{1 + \Gamma^2}$, удовлетворяющими условиям применимости МКП. В результате средняя удельная эффективная поверхность рассеяния (УЭПР) может быть записана в виде суммы зеркальной компоненты (5) и диффузной, представляющей собой усредненное по направлениям нормали

$\bar{N} = (\bar{e}_z - \bar{\Gamma}) / \sqrt{1 + \Gamma^2}$ значение (УЭПР) σ_N для мелкой ряби (2):

$$\sigma = \iint d^2 \bar{\Gamma} W(\bar{\Gamma}) \left[(\bar{N} \bar{k}) / k N_z \right] \sigma_N \quad (6)$$

4. Метод малых наклонов (ММН) [10] применяется для расчета рассеяния на поверхности с неровностями произвольной высоты, но достаточно пологих. При $R \ll 1$ ММН приводит к формулам ММВ, при $R \gg 1$ - к МКП. Первый член построенного в [10] ряда по малым наклонам нормальной (гауссовской) поверхности для УЭПР σ получается из (2) путем формальной замены:

$$S_\zeta(\bar{q}) \Rightarrow 1 / (2\pi q_z)^2 \iint \exp\left(i\bar{q} \cdot \bar{\rho} - \frac{1}{2} q_z^2 D_\zeta(\bar{\rho})\right) d^2 \bar{\rho} \quad (7)$$

где $D_\zeta(\bar{\rho}) = \left\langle \left[\zeta(\bar{r} + \bar{\rho}) - \zeta(\bar{r}) \right]^2 \right\rangle$ - структурная функция неровностей.

5. Метод локальных возмущений (МЛВ) [11] позволяет получить решение задачи рассеяния в виде итерационного ряда, представляющего собой асимптотические разложения по двум малым параметрам - характерному наклону неровностей $\gamma_0^2 = h^2/l^2$ и их кривиз-

не. С помощью этого метода в [11] были рассчитаны поправки к яркостной температуре и параметрам Стокса собственного теплового радиоизлучения среды, ограниченной неровной поверхностью, связанные с дифракцией на ее шероховатостях.

II. Перечисленные выше методы расчета применимы непосредственно только к идеализированным моделям границ раздела природных сред, которые могут быть описаны однозначными плавными функциями пространственных переменных. Решающее слово о возможностях применимости той или иной модели рассеяния принадлежит, в конечном счете, натурным экспериментам.

1. Экспериментальные исследования, выполненные в широком диапазоне радиоволн - от миллиметровых до гектаметровых [12], убедительно подтвердили факт (резонансного - в указанном выше смысле) избирательного рассеяния радиоволн морской поверхностью. Для интерпретации данных рассеяния декаметровых и более длинных волн оказывается вполне достаточным ММВ и, в частности, формулы (2). Для более коротких волн - от метровых до миллиметровых - приходится применять МКП для квазизеркальной компоненты и ДММ - для диффузного рассеяния. При этом задание пространственного энергетического спектра S_c мелкой ряби (размеры которой соизмеримы с длиной волны излучения) позволяет рассчитать по формуле (2) σ_N , а модуляция этой величины наклонами $\bar{\Gamma}$ крупных волн приводит к контрастам РЛ изображений различных участков крупной волны при высоком пространственном разрешении [13]. Усреднение по наклонам $\bar{\Gamma}$ в соответствии с формулой (6) дает возможность рассчитывать среднюю УЭПР протяженных участков поверхности (с линейными размерами, значительно большими длинами волны энергонесущих составляющих морского волнения). Хорошее согласие расчетов с экспериментальными данными позволило на основании приведенных выше теоретических представлений о механизме рассеяния в рамках ДММ разработать и методы решения обратной задачи - определение параметров морского волнения и, в частности, его пространственно-углового энергетического спектра по данным ДРЗ [14]. Высокая информативность РЛ изображений и их тесная связь с параметрами гравитационно-капиллярной ряби позволяет не только определять параметры морского волнения, но и измерять приповерхностную скорость и направление ветра на больших акваториях

практически одновременно [15]. Благодаря определяющей роли мелкой ряби в формировании РЛ изображений оказывается возможным решать и актуальные экологические задачи. Так, например, демпфирование (гашение) ряби в присутствии нефтяной пленки на поверхности существенно уменьшает РЛ сигнал и успешно используется для РЛ обнаружения разливов нефтепродуктов. Контраст РЛ изображений загрязненных участков часто превышает 10 дБ [16], что позволяет надежно обнаруживать нефтяные пленки с толщиной всего около 0,1 мкм. При самолетном патрулировании акваторий на РЛ изображениях видны места разлива даже незначительного количества нефти (≈ 1 л).

Технология патрулирования загрязнений при этом состоит из решения двух задач. На первом этапе сантиметровый радиолокатор обнаруживает факт разлива и картирует место разлива. Затем с использованием дециметрового радиолокатора выделяются наиболее опасные участки загрязнения зоны толстых пленок. После этого решается задача ликвидации этих наиболее опасных источников загрязнения.

2. Радиолокационные методы изучения океана из космоса позволяют приступить к решению важнейшей проблемы - обнаружению критических ситуаций в природной среде и предупреждению природных катастроф [7]. Так, например, радиолокационное обнаружение ураганов на ранней стадии позволяет оценить их опасность. Радиолокационные измерения поля ветра в урагане позволяют установить мощность урагана, что принципиально для принятия решения об их опасности [18].

3. Более сложными являются задачи интерпретации рассеяния СВЧ радиоволн льдами и объектами суши. Как отмечалось выше, здесь возникает проблема учета проникновения и рассеяния радиоволн в толще этих сред. Радиолокационные отражения во льдах возникают, в частности, от границы раздела за счет различия диэлектрических проницаемостей воздуха и льда, и это рассеяние является преобладающим для начальных стадий образования льда. Для толстых льдов, в особенности многолетних, определяющим является объемное рассеяние на внутренних неоднородностях льда (каналы, пузыри воздуха и т.п.); это рассеяние наблюдается в коротковолновой части диапазона СВЧ. Радиолокационные наблюдения состояния и структуры льдов широко используются на практике. РБО типа Космос - 1500/Океан применяется для ледовой разведки полярных районов Арктики и Антарктики [19]

. Напомним ледовые операции по спасению с помощью РБО Космос - 1500 каравана судов в проливе Лонга (1983 г.) и выводу судна "Михаил Сомов" из ледового плена в Антарктиде (1986 г.).

4. До последнего времени основными источниками информации о суше являлись оптические и ИК системы [20]. Они позволяют контролировать состояние растительных покровов, и до сих пор являются основным средством для картографии и геодезии, где требуется разрешение в единицы метров. С созданием РСА оказалась возможной реализация такого разрешения в радиодиапазоне; действительно, потенциальное разрешение РСА составляет половину размера апертуры физической антенны (см. например, [23]). Задачи ДРЗ суши используют системы различных диапазонов. Для изучения растительных покровов необходимы миллиметровые и сантиметровые системы; в длинноволновой части сантиметрового диапазона решение задачи усложняется, так как помимо рассеяния растительностью, вклад в отражение вносит почва. Отражение верхним слоем почвы контролируется в дециметровом диапазоне, где важнейшей является возможность оценки влажности почв на глубинах 5 - 50 см.

Использование дециметровых и метровых волн [22] позволяет успешно решать и другие задачи подповерхностного зондирования, помимо влажности приповерхностного слоя и грунтовых вод, обнаруживать разрывы геологических структур, засыпанные песком русла древних рек в пустынях [23], зоны фильтрации воды из магистральных оросительных мелиоративных каналов, подземные трубопроводы и другие объекты [22], находящиеся под слоем почвы и невидимые на РЛ изображениях в сантиметровом и тем более миллиметровом диапазонах. Оценки глубины проникновения δ радиоволн в почву по формуле

$$\delta \cong \lambda \sqrt{\epsilon''} / 2\pi \epsilon'' \quad (8)$$

($\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ - комплексная диэлектрическая проницаемость почвы) приводят к заключению, что если для увлажненных глинистых почв глубина проникновения не превышает 2 м даже при $\lambda > 3$ м, то глубина их проникновения в сухой песчаный грунт может достигать десятков метров, а в пресный лед Антарктиды - даже сотен метров.

5. Для изучения особенностей подповерхностного ДРЗ и наблюдения объектов под слоем грунта нами использовалась расположенная

на борту самолета ИЛ-18Д многоцелевая РЛ система "Марс" [24], в состав которой входят РБО с реальной апертурой на длинах волн $\lambda = 0,8$ см и $\lambda = 3$ см и РСА с $\lambda = 23$ см и $\lambda = 180$ см (см. табл. 2). Сравнение между собой одновременно РЛ изображений земной поверхности разных диапазонов позволило обнаружить довольно сильные отражения от подземных труб газопроводов и водопроводов, подповерхностных слоев влажного грунта, образующихся при фильтрации воды из магистральных каналов, а также от других расположенных под землей искусственных и естественных объектов. При этом, например, контрастность изображений трубопроводов под толстым слоем сухого песка в дециметровом диапазоне составляла около 5 дБ, а в метровом превышала 10 дБ. Общие закономерности, которые следуют из совместного анализа экспериментальных данных, полученных при РЛ съемках аридных территорий (Приаралья и пустыни Кара-Кум) и глинистых почв на Украине, сводятся к следующему [22]:

а) контрастность РЛ изображений подповерхностных объектов увеличивается с ростом длины волны;

б) РЛ изображения трубопроводов под слоем песка значительно контрастнее и видны с больших глубин, чем под слоем глинистой почвы;

в) азимутальная ориентация труб практически не оказывает влияния на величину контраста их РЛ изображений;

г) величина контраста на горизонтальной поляризации (вектор \vec{E} перпендикулярен к плоскости падения) всегда больше, чем на вертикальной;

д) на вертикальной поляризации при больших углах падения ($\Theta > 30^\circ$) подповерхностные объекты часто вообще не видны;

е) контрастность РЛ изображений на горизонтальной поляризации возрастает с увеличением угла падения Θ .

Результаты а) и б) довольно естественны и полностью согласуются с формулой (8) - чем больше λ и чем суше почва (ϵ'' определяется в основном влажностью), тем на большую глубину проникает электромагнитное поле и тем сильнее отраженный сигнал. Остальные же результаты, на первый взгляд, противоречат общепринятым представлениям: так, в отличие от в), сильные РЛ изображения от труб должны были бы наблюдаться только при облучении их в направлении, перпендикулярном их оси. Поскольку коэффициент прохождения элек-

тромагнитных волн в грунт, согласно формулам Френеля, на вертикальной поляризации всегда больше, чем на горизонтальной, то и глубина проникновения и РЛ контрасты на ней должны быть тоже больше, чем на горизонтальной, что противоречит г). На углах облучения Θ , близких к углу Брюстера, когда вертикально поляризованные излучения практически без отражения проходят в грунт, должны были бы наблюдаться сильные отражения от подповерхностных объектов, что не согласуется с д). Наконец, так как коэффициент отражения на горизонтальной поляризации растет с ростом угла Θ , а коэффициент прохождения под поверхностью соответственно падает, то с увеличением Θ контраст должен был бы уменьшаться а не увеличиваться (противоречит е).

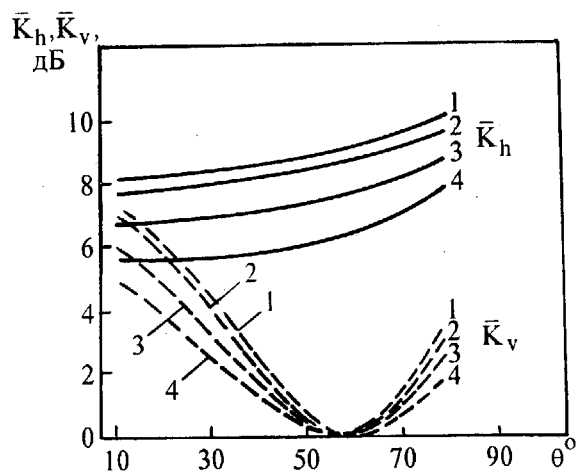


Рис. 1. Расчетные зависимости средних значений коэффициентов контраста

Указанные экспериментальные факты могут быть объяснены в простейшей физической модели плоского отражающего слоя, параллельного средней (тоже плоской) границе раздела воздух - грунт и расположенного на произвольной глубине H под ней. Учет рассеяния на шероховатостях границы воздух - грунт как первичного поля падающей волны, так и волн, зеркально отраженных от заглубленного плоского слоя, позволяет рассчитать контраст РЛ изображения при наличии подповерхностного слоя и без него (как отношение УЭПР в этих двух случаях). Результаты расчета, проведенного в первом приближении ММВ, хорошо качественно (и даже количественно) согласуются с упомянутыми экспериментальными данными подповерхностного зондирования [22]. Следует отметить, что в этой простейшей модели величина РЛ контраста оказывается

вообще не зависящей от пространственного спектра неровностей поверхности: УЭПР при рассеянии на неровной поверхности как при наличии плоского слоя под поверхностью, так и без него (см. формулу (2)) оказывается пропорциональным интенсивности резонансно рассеивающих пространственных гармоник поверхности $S_c(2k \sin \Theta)$ и при вычислении контраста (как отношения указанных УЭПР) этот множитель сокращается.

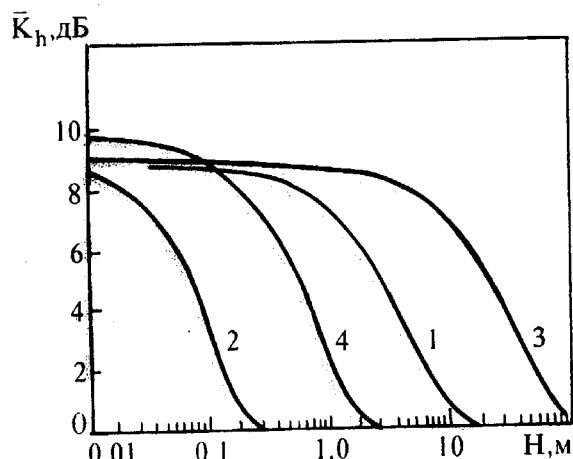


Рис. 2. Зависимость \bar{K} от глубины H .

Значения коэффициентов контраста на горизонтальной K_h и вертикальной поляризации K_v оказываются осциллирующими функциями глубины H залегания отражающего слоя (с периодом $\Delta H = \lambda/2\alpha$, где $\alpha = \sqrt{\epsilon' - \sin^2 \Theta}$, частоты зондирующего сигнала (с периодом $\Delta \omega = \pi c/H\alpha$, c - скорость света в вакууме) и угла падения Θ (с периодом $\Delta \Theta = \lambda/\alpha H \sin 2\Theta$). Расчетные значения усредненных по этим осцилляциям коэффициентов контраста K_h (сплошные линии) и K_v (штриховые линии) приведены на рис. 1 как функции угла падения Θ в диапазоне волн $\lambda = 23$ см (2,4) и $\lambda = 180$ см (1,3) при отражении от металлической пластины, расположенной под слоем сухого песка ($\epsilon' = 3,2$; $\epsilon'' = 0,1$) на глубине $H = 1$ м (1), $H = 3$ м (2), $H = 5$ м (3) и $H = 15$ м (4). На рис. 2 приведена зависимость K_h от глубины залегания металлической пластины при $\Theta = 50^\circ$ в диапазоне $\lambda = 23$ см (1,2) и

$\lambda = 180$ см (3,4) для сухого песка (1,3) и глины ($\epsilon' = 8, \epsilon'' = 0,8$) - (2,4).

III. На основании упомянутых выше физических моделей явления рассеяния волн подстилающей поверхностью и обобщения экспериментальных результатов были разработаны многочисленные практические методы ДРЗ природной среды. Они направлены на поиски полезных ископаемых, картографирование, рациональное землепользование и на решение многих других практических задач народного хозяйства. Значительный круг экологических проблем также решается РЛ методами. Наконец, РЛ методы ДРЗ являются основой фунда-

IV. ментальных исследований новых направлений изучения свойств природной среды. Исходя из

результатов теоретических исследований, обобщения и анализа экспериментальных данных ДРЗ, были сформированы требования к оптимальному выбору тактико-технических параметров РЛ систем ДРЗ, расположенных на аэрокосмических носителях.

1. Примером такого удачного выбора параметров является РБО ИСЗ "Космос-1500", разработка которого была внедрена в оперативную эксплуатационную метеорологическую систему "Океан", что позволило решить большинство задач ДРЗ океана, морских и материковых льдов в глобальных масштабах [19].

Таблица 2

Многочастотный самолетный радиолокационный комплекс МАРС

Тип системы	Длина волны, см	Поляризация	Полоса обзора, км	Разрешение, м	Обработка информации
РБО-0,8	0,8	ВВ, ГГ	15	25 ... 50	на борту
РБО-3	3,1	ВВ	2 x 45	25 ... 50	на борту
РСА-23 с АФАР	23	ВВ ГГ ГВ ГГ	30(120)	2,5 ... 50 25 ... 50	на Земле на борту
РСА-180	180	ВВ ГГ ГВ ГГ	45	25 50 ... 100	на Земле на борту

Таблица 3

Перспективные радиолокационные системы ДРЗ, разрабатываемые в рамках Национальной космической программы Украины [25-27]

Тип системы	Длина волны, см	Поляризация	Полоса обзора, км	Разрешение, м	Обработка информации
РСА-23с АФАР	23	ВВ ГГ ГВВГ	300 310	50 5...15	на борту на Земле
РБО	3,1	ВВ	700	500...2000	на борту
РСА	3,1	ВВ	300	100...300	на борту

При достаточно высоком уровне фундаментальных исследований в области ДРЗ в бывшем СССР и СНГ их развитие и внедрение в практику долгое время сдерживалось низким уровнем технических средств для их реализации. В особенности это относится к РЛ направлению ДРЗ. Несмотря на ценные практические результаты, полученные при исследовании акваторий и льдов с помощью классических РБО ИСЗ типа "Космос-1500/Океан", использование этого типа систем ограничивалось их низким разрешением. Разработки новых типов радиолокаторов (РСА) стимулировали поиски новых путей создания РЛ систем для целей ДРЗ. Основные параметры испытанных

космических РЛ систем ДРЗ приведены в табл.1.

Созданию новых космических систем предшествуют исследования возможностей этих систем с самолета. Так, нами много лет изучались возможности радиолокационных систем, входящих в самолетный комплекс МАРС (multifrequency airborne radar system), табл. 2

С помощью комплекса МАРС выполнялись поисковые исследования процессов рассеяния радиоволн различных диапазонов объектами природной среды, решались многие практические задачи дистанционного зондирования.

Именно в составе комплекса МАРС была отработана технология создания космического РСА-23 с активной ФАР, табл. 3.

Эта система предназначена для диагностики состояния почв Украины; с ее использованием обеспечивается также решение практических задач дистанционного зондирования по океану, льдам, ледникам, суше, что обеспечивается режимом бортовой обработки информации. Кстати, РСА-23 является эффективным инструментом для решения задач подповерхностного зондирования в аридных зонах. РСА-23 планируется к установке на ИСЗ "Січ-2" [25, 26].

Новой разработкой, базирующейся на опыте использования РБО и РСА со средним разрешением, является система РБО-РСА, табл. 3. Как отмечалось выше, РБО диапазона 3 см является наиболее эффективным средством изучения океана, морских льдов, ледников, где мезомасштабные процессы являются определяющими. Помимо специфических тактико-технических параметров РБО отличает использование модели избирательного рассеяния, которая является основой интерпретации получаемых данных. В новой разработке РБО применяется когерентный режим, что позволяет формировать изображения РСА [27]. В этом режиме производится нефокусированное синтезирование, при котором разрешение по дальности $R = 10^6$ м составляет около 100 м.

При таком разрешении, помимо решения задач по океану, льдам, ледникам, появляется возможность наблюдения растительных покровов и контроля состояния почв с помощью РСА диапазона 3 см. Система РБО-РСА может устанавливаться на малых спутниках, что представляет особый интерес для Украины, не имеющей своих полигонов для запуска спутников. Кроме того, весьма перспективным может быть объединение на одном ИСЗ систем РСА-23 и РБО-РСА. При этом появляются принципиально новые возможности изучения объектов природной среды. Так, например, РБО является наиболее эффективным инструментом для измерения поля приводного ветра. При этом РСА-23 позволяет наблюдать пространственную структуру волнения, и их совместное использование дает возможность одновременно определить состояние и структуру волнения, что чрезвычайно важно для практики прогнозов.

Совместное использование РСА-23 и РБО-РСА позволяет реализовать технологию бор-

бы с нефтяными загрязнениями на морской поверхности. Так, РБО-РСА диапазона 3 см позволяет решать задачу обнаружения тончайших нефтяных пленок, а РСА-23 обеспечивает при этом выделение наиболее опасных участков толстых пленок.

Можно привести еще много примеров задач, которые будут решаться при совместном использовании РСА-23 и РБО-РСА.

Особенно эффективным является совместное применение РСА-23 и РБО-РСА для обнаружения критических ситуаций и предупреждения природных катастроф. В рамках этого направления будут решаться не только задачи национального характера, но и проблемы международного сотрудничества.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Международного Научного Фонда и Правительства Украины (Гранты № U2A000 и U2A200).

Литература

1. Jordan R.L. IEEE J.Oceanic Eng. 1980, v. OE-5, p. 154-163; Shuttle imaging radar-C/Science Plan J.P.L. Pull. 8629-Jet Propulsion Lab., NASA, Pasadena. Sept.J. 1986; Салганик П.О., Ефремов Г.А., Неронский Л.Б. и др. Исследование Земли из космоса. 1990, № 2, с. 70-79; The data book of ERS-1. The European Remote Sensing Satellite. ESA, BR-75. April 1991, 36 p.
2. Калмыков А.И., Ефимов В.Б., Кавелин С.С. и др. Исследование Земли из космоса. 1984, № 5, с. 84-93.
3. Распространение ультракоротких радиоволн. Пер. с англ. под ред.Б.А. Шиллерова. Москва. Сов. радио, 1954. с.710.
4. Bass F.G., Fuks I.M., Kalmykov A.I., Ostrovsky I.E. and Rozenberg A.D. IEEE Trans. Antennas and Propag. 1968, AP - 16, № 5, p. 554-568.
5. Kalmykov A.I., Pichugin A.P., Sinitsyn Yu.A., Shestopalov V.P. Int.J. Remote Sensing . 1982. v.3, № 3, p. 311-326.
6. Proc. of the Symposium "Measuring Ocean Waves from Space". Ed.R.Beal.John Hopkins APL Technical Digest, 1987, v. 8, № 1, 147 p.
7. Nieto-Vesperinas M. and Soto - Creaspo J.M. Opt.Lett . 1987, v. 12, p. 979-991.
8. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. Москва. Изд-во АН СССР, 1961, с.560; Beckman P., Spizzichino A. The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. Oxford. Pergamon Press, 1963, с.602; Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статисти-

- стически неровной поверхности. Москва. Наука, 1972, с. 424; Bass F.G., Fuks I.M. Wave scattering from statistically rough surfaces. *Int. Ser. in Natural Philosophy*, v. 93, Pergamon Press. 1979, 525 p.; Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах, т. 2. Москва. Мир, 1981, 317 с.
9. Фукус И.М. Изв. вузов. Сер. "Радиофизика". 1986, т. 28, № 2, с. 177-183.
 10. Воронович А.Г. ЖЭТФ, т. 89, № 1(7), с. 116-125.
 11. Isers A.B., Puzenko A.A. and Fuks I.M. *J. of Electromag. waves and Appl.* 1991, v. 5, № 12, p. 1410-1435.
 12. Радиоокеанографические исследования морского волнения. Под ред. С.Я. Брауде. Киев. Изд-во АН УССР, 1962, 116 с.; Bass F.G., Braude S.Ya., Fuks I.M., Kalmykov A.I., Men' A.V., and Ostrovsky, I.E. *IEEE Trans. Ocean Eng.* 1977, v. OE- 2, № 1, p. 43-52.
 13. Михайловский А.И., Фукус И.М. Тез. докл. научн. конф. "Применение дист. радиофизических методов в исслед. природн. Среды." Муром, 1992, с. 41-42.
 14. Замараев Б.Д., Калмыков А.И. Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1969, т. 5, № 11, с. 124-127; Beal R.C. In *Spaceborne synthetic aperture radar for oceanography*. The Johns Hopkins Univ. Press. Baltimore, Lond., 1981, 215 p.
 15. Moore R.K., Fung A.K. *Proc. IEEE.* 1979, v. 67, p. 1504-1521; Калмыков А.И., Пичугин А.П., Цымбал В.Н. Исследование Земли из космоса. 1985, № 4, с. 65-77.
 16. Галаев Ю.М., Калмыков А.И., Курекин А.С. и др. Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана. 1977, т. 13, № 4, с. 406-414; Druzhinin V.V., Pavlenko A.R., Kalmykov A.I., Pichugin A.P., Fetisov A.V. *Pat. USA*, а4.918.456.
 17. Калмыков А.И., Цымбал В.Н., Величко С.А. и др. Препринт ИРЭ АН УССР. Харьков. 1989, № 380, 27 с.
 18. Уткин В.Ф., Шестопалов В.П., Калмыков А.И. и др. Докл. АН СССР. 1986, т. 286, № 2, с. 331-333.
 19. Радиолокация поверхности Земли из космоса. Исследование морской поверхности, ледяного и ледникового покровов с помощью спутниковой радиолокационной станции бокового обзора. Под ред. Л.М.Митника, С.В. Викторова. Ленинград. Гидрометеиздат, 1987, 114 с.; Mitnik L.M., Kalmykov A.I. *J. of Geophysical Res.* 1992, v. 97, № C5, p. 7429-7445.
 20. Кондратьев К.Я. Исследование Земли из космоса. 1987, № 4, с. 104-118.
 21. Элаши Ч., Бикнелл Т., Джордан Р.Л., Изялинь У. ТИИЭР. 1982, т. 70, № 10, с. 44-89.
 22. Калмыков А.И., Фукус И.М., Цымбал В.Н. и др. Препринт ИРЭ АН Украины. Харьков, 1993, № 93-6, 30 с.
 23. Elachi C., Roth L.E., Schaber G.G. *IEEE Trans Geosci.Remote Sensing.* 1984, v. GE-22, № 4, p.3; Berlin G.L., Tarabzoni M.A., Al Naser A.H.e.c. *IEEE Trans.Geosci.Remote Sensing.* 1986, v. GE-24, № 4, p. 595-602.
 24. Калмыков А.И., Цымбал В.Н., Курекин А.С. и др. Препринт ИРЭ АН УССР. Харьков, 1990, № 90-21, 35 с.
 25. Горбулин В.П., Драновский В.И., Завалишин А.П., Калмыков А.И., Коротаяв Г.К., Лялько В.И., Шмаров В.Н. Докл.межд. научн. семинара по аэрокосмическому мониторингу земных покровов и атмосферы. Киев, Знание, 1993, с. 3-18.
 26. Драновский А.С., Кавелин С.С., Калмыков А.И., Курекин А.С., Матвеев А.Я., Салтыков Ю.Д., Цымбал В.Н. Докл. межд. научн.семинара по аэрокосмическому мониторингу земных покровов и атмосферы. Киев, Знание, 1993, с. 85-87.
 27. Zeldis V.I., Kalmykov A.I., Komarov V.G. et al. Presented at EUSAR'96, Koenigswinter, Germany, 1996.

Models of Radio Waves Scattering by Bedding Surfaces and Their Using in Radar Remote Sensing Systems

A.I. Kalmykov and I. M. Fuks

The comparative analysis of the existing Earth remote sensing (ERS) radar systems on the boards of air-space carriers with the side looking radars (SLR) and the synthetic aperture radars (SAR) have been done. The most important problems of the ERS in the cm-dm wave band from the boards of the artificial Earth's satellites and the flying airplane laboratories have been enumerated and the most spreading theoretical radio physical models for ERS data interpretation have been mentioned. The original experimental ERS data obtained from the board of the flying airplane laboratory by the 0.8 cm and 3 cm wave band SLR and by the 23 cm and 180 cm wave band SAR on the vertical and horizontal polarizations are presented. The peculiarities of the underground objects (metallic pipes, plates and humid layers) radar image contrasts (RIC) are pointed - the weak dependence of the RIC on the object's

orientation, the exceeding RIC on the horizontal polarization over the vertical one, the RIC increasing with the increasing of the angle of incidence and radio wave length. The model of RIC formation has been suggested - the main role in RIC formation are playing the diffuse radio wave scattering from the rough surface of the ground,

the signals specularly reflected from the plane layer or the finite size plate. For two types of ground - dry sand and humid clay - the RIC computation results are presented.