

УДК 537.874.4

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ
МОРСКОГО ЛЬДА

*А. Е. Мачулко, Г. С. Мисежников, В. Б. Некрашевич, А. Г. Сельский,
В. Б. Штейншлейгер, А. В. Янович*

Излагаются результаты измерений удельной эффективной площади рассеяния σ^0 морского льда, проведенные с помощью экспериментальной установки на атомном ледоколе «Сибирь». Измерения проводились в 10-сантиметровом и 20-сантиметровом диапазонах радиоволн в интервале углов падения $10\text{--}60^\circ$ относительно вертикали. Результаты измерения величины σ^0 для морского льда различной толщины свидетельствуют об относительно большей информативности диапазона 20 см при оценке толщины льда по величине отраженного от него сигнала.

Большое научное и практическое значение, в частности при проводке судов в полярных районах, имеет определение характеристик ледовых покровов: его толщины (возраста), сплоченности, наличия трещин, разводий и т. п. Применение РЛС бокового обзора позволяет получить радиолокационные изображения ледовых полей с требуемой детальностью и выявить структуру трещин и разводий [2, 3, 5].

Более сложной задачей является определение возрастных характеристик льда по интенсивности отраженного от него сигнала. В настоящее время отсутствуют адекватные модели, достаточно полно описывающие процесс рассеяния радиоволн ледовыми покровами. Поэтому при определении возрастных характеристик следует изучить возможность использования экспериментальных зависимостей величины удельной эффективной площади рассеяния (ЭПР) льда σ^0 от его толщины, полученных в различных диапазонах длин волн.

Исследования, проведенные в коротковолновой части сантиметрового диапазона [1, 4, 5], свидетельствуют о том, что имеется определенная корреляция между толщиной льда и величиной отраженного от него сигнала. Результаты измерений удельной ЭПР льда в дециметровом диапазоне, полученные с использованием переносного скаттерометра, установленного на поверхности льда [6], носят ограниченный и в основном качественный характер. Между тем этот диапазон представляет особый интерес, поскольку он используется в спутниковых РЛС с синтезированной апертурой [7], являющихся практически единственным средством, позволяющим оперативно, независимо от погодных условий, получать РЛ изображения больших участков земной поверхности с достаточной степенью детальности (вплоть до нескольких десятков метров).

В связи с этим нами были проведены измерения ЭПР морского льда с помощью специально разработанной радиолокационной измерительной установки 10- и 20-сантиметрового диапазона, размещенной на атомном ледоколе «Сибирь», во время его плавания в районе Баренцева и Красного морей.

Описание экспериментов. Антенна установки помещалась на высоте 23 м от уровня морской поверхности по левому борту ледокола. Луч антенны сканировал по углу места перпендикулярно линии пути ледокола с периодом 2 с в интервале углов от 5 до 70° относительно вертикали. При этом обеспечивался просмотр полосы морской поверхности

шириной примерно 50 м с одной стороны от линии пути ледокола на всем протяжении его маршрута. Такой вариант размещения установки позволил получить достаточно представительный статистический материал для определения удельной ЭПР различных типов льда.

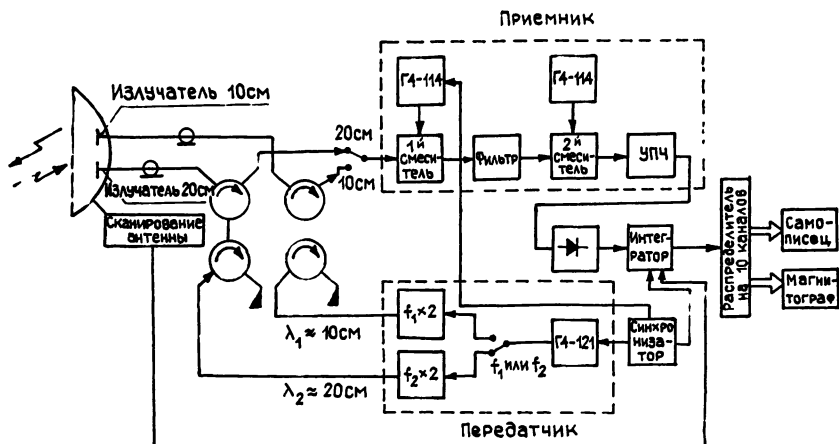


Рис. 1.

Структурная схема установки представлена на рис. 1. Излучение и прием сигналов 10- и 20-сантиметрового диапазонов производились одной параболической антенной диаметром 1 м с отдельными облучателями для каждого из диапазонов. Передатчиком являлся стандартный измерительный генератор Г4-121, генерирующий импульсы длительностью 0,07—0,1 мкс с пиковой мощностью $P_{\text{п}} = 300$ мВт и частотой повторения $F_{\text{п}} = 10^3$ 1/с. Для ослабления уровня паразитного сигнала, генерируемого на несущей частоте в паузах между импульсами, использованы удвоители частоты на диодах с существенно нелинейной характеристикой.

Особенностью схемы приемника является то, что в нем применены двойное преобразование частоты и импульсный режим работы первого гетеродина. В первом смесителе происходит преобразование частоты вверх на частоту $f_{\text{гет}1} = 2\delta$ 1/с. Выбор столь высокой первой промежуточной частоты и импульсного режима работы первого гетеродина обусловлен необходимостью исключения воздействия на УПЧ просачивающегося на вход приемника зондирующего сигнала. Включение первого гетеродина происходит после окончания импульса передатчика. Чтобы импульс гетеродина, детектирующийся во втором смесителе, был отфильтрован и не воздействовал на УПЧ, за первым смесителем установлен волноводный резонансный фильтр.

Примененное в схеме установки двойное преобразование частоты позволило ослабить пролезание высокочастотных спектральных составляющих протектированного в первом смесителе импульса гетеродина на вход УПЧ до величины, при которой не возникало насыщения приемника.

Регистрация сигналов в процессе измерений при сканировании антенны в азимутальной плоскости происходила следующим образом.

Сигнал с выхода детектора приемника одновременно подавался на десять каналов, предназначенных для выделения и регистрации отраженных сигналов, соответствующих определенному углу падения луча антенны. Каждый канал открывался на время 45 мс при достижении антенной определенного углового положения. В течение этого времени осуществляется некогерентное сложение 4500 импульсов, отраженных от участка поверхности, облучаемого антенной. Это время не превышает времени корреляции отраженного сигнала, равного времени прохождения ледоколом половины величины раскрыва антенны.

Сигналы с выходов каналов записываются на многоканальном самописце и магнитографе, в результате на каждой дорожке самописца регистрируется последовательность выборок величины отраженного сигнала, соответствующая определенному углу визирования.

Для исключения влияния паразитного сигнала, вызванного отражением от антенны, в каждом канале самописца регистрировалась только переменная составляющая, характеризующая дисперсию отраженного от льда сигнала.

Калибровка измерительной установки производилась по угловому отражателю с ребром, равным 1 м, установленному на палубе ледокола на расстоянии 21 м от антенны. В режиме калибровки антенна не сканировала; время интегрирования сигнала, как и в режиме измерения, составляло 45 мс. Точность калибровки измерительной установки по уголкового отражателю определялась в основном точностью его изготовления и была порядка 1 дБ.

Результаты экспериментов. Измерение ЭПР арктического льда проводилось в районе Карского и Баренцева морей в феврале—марте 1982 г. В процессе измерений встречались следующие типы льдов: темный и светлый нилас толщиной 5—10 см; серый и серо-белый лед толщиной 15—25 см; белый лед толщиной от 35 до 50 см; однолетний лед средней толщины 80—100 см; толстый гладкий однолетний лед (припай) в проливе Югорский Шар толщиной примерно 1,5 м, а также участки торосистого льда. Степень покрытия поверхности льда торосами составила примерно два балла (по пятибалльной системе). ЭПР водной поверхности измерялась при движении ледокола по разводьям шириной более 100 м при скорости приводного ветра 3—5 м/с.

Длительность одного сеанса измерений определялась в основном временем движения ледокола по однотипному участку льда и составляла в среднем 10 мин. Одновременно с величиной отраженного сигнала определялись визуально толщина льда, наличие снежного покрова, торосистость, сплоченность и т. п.

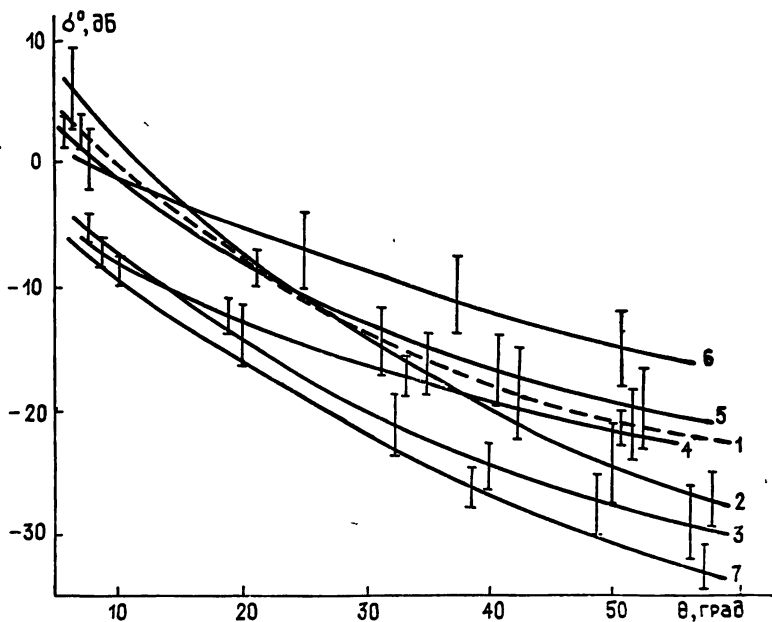


Рис. 2. Зависимость удельной ЭПР морского льда от угла падения $\lambda = 20$ см, поляризация горизонтальная НН:
 1 — водная поверхность, 2 — темный нилас, 3 — лед толщиной 15—25 см, 4 — лед 35 см, 5 — лед 80—100 см, 6 — торосистый лед примерно 2 балла, 7 — гладкий толстый лед 150 см (припай).

дения θ для водной поверхности и различных типов льда на волнах 20 и 10 см при горизонтальной поляризации излучаемого и принимаемого сигналов приведены на рис. 2 и 3. Кривые для каждого типа льда на обоих рисунках получены путем усреднения большого числа реализаций, зарегистрированных в различных районах Карского моря. Вертикальные штрихи на рисунках характеризуют максимальный разброс величины σ^0 для данного угла визирования. При расчетах использовалась аппроксимация диаграммы направленности антенны гауссовой кривой.

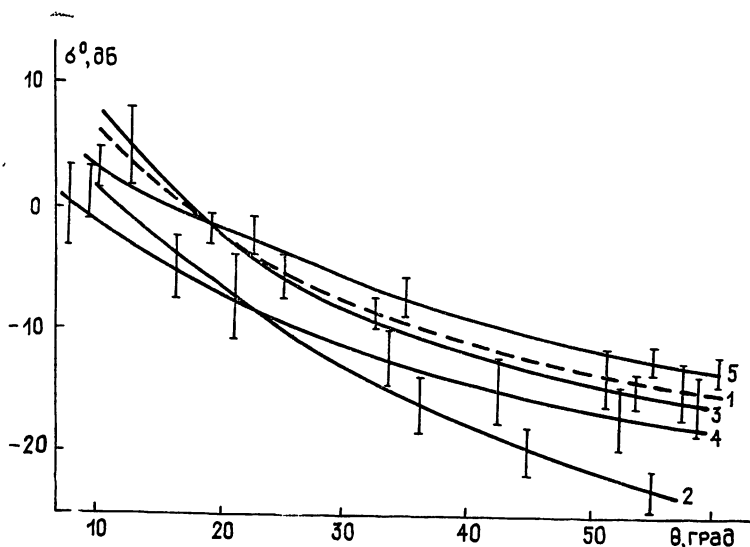


Рис. 3. Зависимость удельной ЭПР морского льда от угла падения $\lambda \approx 10$ см, поляризация горизонтальная НН:
1 — водная поверхность, 2 — темный нилас, 3 — лед толщиной 15—25 см, 4 — лед 80—100 см, 5 — торосистый лед примерно 2 балла.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1) В диапазоне длин волн 20 см ЭПР для ниласа при углах падения до 30° практически совпадает с ЭПР морской поверхности. При больших углах падения ЭПР ниласа уменьшается по сравнению с ЭПР морской поверхности.

По мере увеличения толщины льда его ЭПР уменьшается по сравнению с ЭПР морской поверхности и достигает минимума (на 6 дБ меньше ЭПР морской поверхности) при толщине льда 15—25 см. По мере дальнейшего увеличения толщины льда его ЭПР начинает возрастать и при толщине примерно 1 м практически совпадает с ЭПР морской поверхности.

2) ЭПР торосистых льдов превышает ЭПР морской поверхности на 6—8 дБ для углов падения, больших 20° .

3) Наименьшая величина ЭПР наблюдалась для гладкого толстого льда (припай в проливе Югорский Шар).

4) Наблюдаемую зависимость ЭПР льда от его толщины можно объяснить тем, что для тонкого льда основное отражение происходит на границе лед—вода. Поскольку морская поверхность выглаживается тонким слоем льда, то отраженный сигнал при углах падения больше 20° относительно слаб. С увеличением толщины льда основной вклад в величину отраженного сигнала начинает вносить возрастающая шероховатость поверхности льда.

Припай дает малое отражение, поскольку его поверхность гладкая по сравнению с длиной волны.

Максимальный разброс величины σ^0 для любого из типов льда и всех углов падения не превышал ± 3 дБ.

5) Таким образом, по РЛ изображениям поверхности льда, полученным в 20-сантиметровом диапазоне длин волн, можно выделить отличающиеся между собой на величину 6—8 дБ, превышающую максимальный разброс значений σ^0 , три градации льда: тонкий лед 15—20 см, лед толщиной 50 см — 1 м и торосистый лед. ЭПР морской поверхности примерно совпадает с ЭПР льда толщиной примерно 1 м.

6) В диапазоне длины волны 10 см характер зависимости удельной ЭПР льда от его толщины и угла падения сохраняется практически таким же, однако диапазон изменения σ^0 в зависимости от толщины льда меньше (примерно 8 дБ), чем на длине волны 20 см (где он составляет примерно 15 дБ), что затрудняет возможность оценки толщины льда по его РЛ изображению.

Таким образом, при наблюдении ледовых покровов диапазон длин волн 20 см более информативен по сравнению с диапазоном длин волн 10 см.

Авторы выражают благодарность экипажу атомного ледокола «Сибирь» за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Onstott R. G., Moore R. K., Gogineni S., Delker C. // IEEE Journ. Oceanic. Eng. 1982. V. QE-7. № 1. P. 44.
2. Бушуев А. В., Быченков Ю. Д., Лоцилов В. С., Масанов А. Д. Исследование ледяного покрова с помощью радиолокационных станций бокового обзора (РЛС БО). — Л.: Гидрометеонздат, 1983. — 120 с.
3. Шестопалов В. Д., Хмыров Б. Е., Калмыков А. И. и др. // ДАН СССР. 1983. Т. 272. № 3. С. 598.
4. Зубкович С. Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. — М.: Сов. радио, 1968. — 224 с.
5. Пичугин А. П. и др. // Исследование Земли из космоса. 1981. № 6. С. 82.
6. Onstott R. G., Moore R. K., Weeks W. F. // IEEE Trans. Geosci. Electron. 1979. V. GE-17. № 3. P. 78.
7. Jordan R. L. // IEEE Trans. 1980. V. QE-5. № 2. P. 154.

Поступила в редакцию
15 декабря 1986 г.

CHARACTERISTIC MEASUREMENT OF SEA ICE BACK-SCATTERING

*A. E. Machulko, G. S. Mizezhnikov, V. B. Nekrashevich, A. G. Sel'skij,
V. B. Shteinshleiger, A. V. Yanovich*

The results of measurements of the specific effective area of scattering σ^0 of sea ice are presented. The measurements have been carried out in 10 cm and 20 cm range of radiowaves and in the incident angle range. The results obtained show, that the σ^0 measurements in 20 cm range are more useable for the estimation of the thickness of sea ice.
