

Международный союз электросвязи

МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Рекомендация МСЭ-R P.2146-0

(08/2022)

**Двухпозиционное рассеяние, вызываемое
отражением от поверхности моря**

Серия Р

Распространение радиоволн



Международный
союз
электросвязи

Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-Т/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/ru>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-Т/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

Серии Рекомендаций МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REC/ru>.)

Серия	Название
BO	Спутниковое радиовещание
BR	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
BS	Радиовещательная служба (звуковая)
BT	Радиовещательная служба (телевизионная)
F	Фиксированная служба
M	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
P	Распространение радиоволн
RA	Радиоастрономия
RS	Системы дистанционного зондирования
S	Фиксированная спутниковая служба
SA	Космические применения и метеорология
SF	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
SM	Управление использованием спектра
SNG	Спутниковый сбор новостей
TF	Передача сигналов времени и эталонных частот
V	Словарь и связанные с ним вопросы

Примечание. – Настоящая Рекомендация МСЭ-R утверждена на английском языке в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация
Женева, 2023 г.

© ITU 2023

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

РЕКОМЕНДАЦИЯ МСЭ-R P.2146-0

Двухпозиционное рассеяние, вызываемое отражением от поверхности моря

(Вопрос МСЭ-R 208-6/3)

(2022)

Сфера применения

В настоящей Рекомендации представлен метод прогнозирования коэффициента двухпозиционного рассеяния поверхностью моря и коэффициента когерентного отражения от поверхности моря. Эту модель возможно применять для любого угла места, за исключением угла скользкого падения, для частот до 100 ГГц и значений скорости ветра от 0,5 м/с до 25 м/с.

Ключевые слова

Коэффициент двухпозиционного рассеяния, когерентное рассеяние, диффузное рассеяние, скорость ветра, среднеквадратические наклоны при встречном и поперечном направлениях, гравитационная волна, капиллярная волна, крупномасштабная неровность, мелкомасштабная неровность.

Список сокращений/гlossарий

ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecast	ЕЦСПП	Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды
ERA5	ECMWF Reanalysis version 5		Повторяющийся анализ ЕЦСПП, версия 5

Соответствующие Рекомендации и Справочник МСЭ-R

Рекомендация МСЭ-R P.372

Рекомендация МСЭ-R P.452

Рекомендация МСЭ-R P.527

Рекомендация МСЭ-R P.528

Рекомендация МСЭ-R P.676

Рекомендация МСЭ-R P.680

Рекомендация МСЭ-R P.1144

Рекомендация МСЭ-R P.2148

ПРИМЕЧАНИЕ. – Во всех случаях следует использовать последние по времени пересмотр/издание действующей Рекомендации.

Ассамблея радиосвязи МСЭ,

учитывая,

- a)* что для надлежащего планирования систем наблюдения за поверхностью Земли и космических систем наблюдения нижнего обзора, необходимы соответствующие модели прогнозирования коэффициента двухпозиционного рассеяния поверхностью моря;
- b)* что в состав коэффициента двухпозиционного рассеяния может входить один или два следующих компонента: когерентный компонент коэффициента двухпозиционного рассеяния и диффузный (некогерентный) компонент коэффициента двухпозиционного рассеяния;
- c)* что диффузное двухпозиционное рассеяние может быть вызвано крупномасштабной неровностью, обусловленной длинной гравитационной волной, и мелкомасштабной неровностью, обусловленной короткой капиллярной волной;
- d)* что и гравитационная волна, и короткая капиллярная волна зависят от ветра;

e) что разработана модель, которая позволяет прогнозировать коэффициенты двухпозиционного рассеяния поверхностью моря, необходимые при оценке ряда параметров распространения, таких как глубина замирания; атмосферный шум, вызываемый излучением от поверхности моря; мощность помех, создаваемых рассеянием поверхностью моря,

рекомендует

использовать для прогнозирования коэффициента двухпозиционного рассеяния поверхностью моря метод, описанный в Приложении.

Приложение

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)	ii
Приложение	2
1 Введение.....	4
2 Шаг 0. Входные параметры.....	6
2.1 Входные параметры распространения	6
2.2 Входные параметры поверхности моря	7
3 Шаг 1. Определить комплексную относительную диэлектрическую проницаемость морской воды.....	8
4 Шаг 2. Определить параметры неровности поверхности моря	9
4.1 Спектральная плотность высоты мелкомасштабных неровностей поверхности моря (капиллярная волна) и дисперсия высоты поверхности моря	9
4.2 Плотность вероятности крупномасштабных неровностей применительно к наклонам поверхности (гравитационная волна).....	9
5 Шаг 3. Определить когерентный компонент коэффициента двухпозиционного рассеяния.....	10
6 Шаг 4. Определить диффузный компонент двухпозиционного рассеяния из-за крупномасштабной неровности	11
7 Шаг 5. Определить диффузный компонент двухпозиционного рассеяния из-за мелкомасштабной неровности	12
8 Суммирование компонентов коэффициента двухпозиционного рассеяния поверхностью моря	15
8.1 Коэффициенты обратного рассеяния поверхностью моря.....	16
8.2 Коэффициенты двухпозиционного рассеяния поверхностью моря в прямом направлении	18

Стр.

Прилагаемый документ А к Приложению – Расчет коэффициентов рассеяния между волнами с круговой поляризацией и волнами с линейной поляризацией	22
А.1 Падающая мощность с круговой поляризацией (СР) в рассеянную мощность с линейной поляризацией.....	22
А.2 Падающая мощность с линейной поляризацией в рассеянную мощность с круговой поляризацией.....	23
Прилагаемый документ В к Приложению – Расчет коэффициентов рассеяния между волнами с круговой поляризацией.....	24
Прилагаемый документ С к Приложению – Простые аппроксимации.....	25
Прилагаемый документ D к Приложению – Модель спектра значений высоты поверхности моря	26
Прилагаемый документ Е к Приложению – Мощность помех, создаваемых в приемнике отраженным от поверхности моря сигналом.....	27
Е.1 Введение.....	27
Е.2 Принимаемая когерентная мощность.....	27
Е.3 Принимаемая диффузная мощность.....	28

1 Введение

В настоящей Рекомендации представлен метод прогнозирования коэффициента двухпозиционного рассеяния поверхностью моря в зависимости от солености, температуры, скорости ветра, относительного направления ветра и возраста обратной волны на поверхности моря. В отсутствие местных данных для этих параметров следует использовать значения по умолчанию этих параметров, приведенные в таблице 1. Этот метод прогнозирования применим для любого угла места, за исключением угла скользящего падения, для любых частот до 100 ГГц и для значений скорости ветра от 0,5 м/с до 25 м/с.

Коэффициент двухпозиционного рассеяния состоит из двух компонентов: 1) диффузный (некогерентный) компонент, который представляет собой долю падающей мощности, рассеянной от направления падения в произвольном направлении приема, и 2) когерентный компонент, который представляет собой долю падающей мощности, рассеянной обратно в направлении падения (то есть зеркальное отражение).

В описанном в пп. 1–8 методе прогнозирования предполагается, что поляризация источника и приемника является линейной. Если поляризация источника и/или приемника является круговой, соответствующие коэффициенты двухпозиционного рассеяния могут быть рассчитаны на основе коэффициентов двухпозиционного рассеяния при линейной поляризации с использованием методов, описанных в прилагаемых документах А, В или С к настоящему Приложению.

Эти методы прогнозирования возможно использовать для прогнозирования мощности отраженных от поверхности моря помех между источником (например, передатчик линии вниз) и приемником, на который поступают вредные помехи (например, приемник спутника наблюдения Земли), применяя метод, описанный в Прилагаемом документе Е.

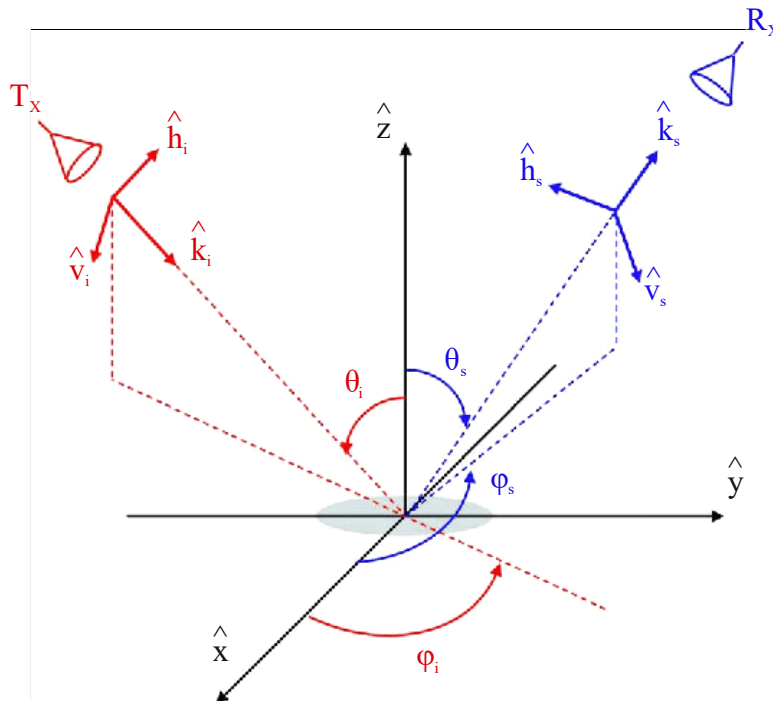
Поверхность моря, это, как правило, произвольно неровная поверхность, и ее неровность зависит от ветра. Коэффициент двухпозиционного рассеяния $\gamma_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ – это доля мощности, рассеянной в направлении \hat{k}_s с поляризацией \hat{p}_s вследствие падающей волны, которая облучает поверхность в направлении \hat{k}_i с поляризацией \hat{q}_i (см. рисунок 1). Доля мощности выражается на единицу телесного угла и на единицу площади. С учетом сложной природы неровности поверхности предполагается, что коэффициент двухпозиционного рассеяния состоит из двух компонентов: когерентного компонента $\gamma_{pq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$, и диффузного (некогерентный) компонента $\gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$. Эти два компонента суммируются следующим образом:

$$\gamma_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \gamma_{pq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + \gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i). \quad (1)$$

Когерентный компонент существует только в зеркальном направлении к поверхности ($\theta_s = \theta_i$, $\varphi_s = \varphi_i$).

РИСУНОК 1

Геометрическая конфигурация двухпозиционного рассеяния поверхностью моря



Р.2146-01

На рисунке 1 показана геометрия, рассматриваемая в модели рассеяния. Плоскость xy – это горизонтальная поверхность моря, а положительная ось z – направление зенита. Положительная ось x – встречное направление¹, положительная ось y – поперечное направление, где зенитный угол падения, θ_i , и зенитный угол рассеяния, θ_s , отсчитываются от положительной оси z . Азимутальный угол падения, ϕ_i , и азимутальный угол рассеяния, ϕ_s , измеряются в плоскости xy в направлении против часовой стрелки относительно встречного направления.

Поверхность моря рассматривается как поверхность с неровностями двух градаций, а именно крупномасштабная неровность и мелкомасштабная неровность, накладываемая поверх крупномасштабной неровности. Крупномасштабная неровность связана с длинной гравитационной волной, а мелкомасштабная неровность – с короткой капиллярной волной. Соответственно, диффузный (некогерентный) компонент коэффициента двухпозиционного рассеяния $\gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ представляет собой сумму двух компонентов согласно уравнению (2):

$$\gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \gamma_{pq}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + \gamma_{pq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \quad (2)$$

Первый член в уравнении (2) относится к крупномасштабной неровности поверхности моря, второй член – к мелкомасштабной неровности.

Модель прогнозирования когерентного и диффузного (некогерентного) компонентов коэффициента двухпозиционного рассеяния поверхностью моря возможно составить, следуя блок-схеме, представленной на рисунке 2.

¹ Встречное направление – это направление, противоположное направлению ветра.

РИСУНОК 2

Блок-схема модели прогнозирования двухпозиционного рассеяния поверхностью моря**Шаг 0**Определить входные параметры (раздел 2)**Шаг 1**Определить комплексную относительную диэлектрическую проницаемость морской воды (раздел 3)**Шаг 2**Определить параметры неровности поверхности моря (раздел 4)**Шаг 3**Определить когерентный компонент коэффициента двухпозиционного рассеяния (раздел 5)**Шаг 4**Определить диффузный компонент двухпозиционного рассеяния из-за крупномасштабной неровности (раздел 6)**Шаг 5**Определить диффузный компонент двухпозиционного рассеяния из-за мелкомасштабной неровности (раздел 7)**Шаг 6**Суммирование компонентов коэффициента двухпозиционного рассеяния поверхностью моря (раздел 8)

P.2146-02

Моделируемый здесь коэффициент двухпозиционного рассеяния поверхностью моря применим к падающим волнам с линейной поляризацией и рассеянным волнам с линейной поляризацией. Преобразования линейной поляризации в другие сочетания поляризаций падающей и рассеянной волн описаны в Прилагаемом документе А и Прилагаемом документе В:

- Прилагаемый документ А – падающие волны с круговой поляризацией и рассеянные волны с линейной поляризацией и наоборот;
- Прилагаемый документ В – падающие волны с круговой поляризацией и рассеянные волны с круговой поляризацией;
- Прилагаемый документ С – простые аппроксимации для коэффициентов двухпозиционного рассеяния, рассматриваемых в Прилагаемом документе А и Прилагаемый документ В.

Кроме того,

- Прилагаемый документ D – модель спектра значений высоты поверхности моря;
- Прилагаемый документ E – методика определения мощности помех, создаваемых в приемнике отраженным от поверхности моря/рассеянным поверхностью моря сигналом.

2 Шаг 0. Входные параметры

Для прогнозирования значений когерентного и диффузного (некогерентного) компонентов коэффициента двухпозиционного рассеяния поверхностью моря требуются два типа параметров:

- входные параметры распространения; и
- входные параметры поверхности моря.

2.1 Входные параметры распространения

Входные параметры распространения описаны ниже.

- Угол места ϵ_i и азимутальный угол φ_i падающей волны, облучающей поверхность моря. Эти два угла определяют направление распространения падающей волны \hat{k}_i .
- Вектор поляризации \hat{q} волны, облучающей поверхность моря.

- Угол места ϵ_s и азимутальный угол φ_s направления рассеянной волны \hat{k}_s , вдоль которого рассчитывается коэффициент двухпозиционного рассеяния.
- Векторы поляризации \hat{p}_s поля рассеяния.
- Частота f , на которой рассчитывается коэффициент двухпозиционного рассеяния. Частота выражается в ГГц. Частота определяет РЧ-волновое число k ($k = 2\pi f / 0,299792458$ рад/м).

В силу того что в настоящем Приложении рассматривается только линейная поляризация, $\hat{q}_i = \hat{v}_i$ или \hat{h}_i и $\hat{p}_s = \hat{v}_s$ или \hat{h}_s , где v обозначает вертикальную (параллельную) поляризацию, а h обозначает горизонтальную (перпендикулярную) поляризацию. Во всем тексте настоящей Рекомендации углы места $\epsilon_{i,s}$ заменены соответствующими зенитными углами $\theta_{i,s}$.

$$\theta_{i,s} = \frac{\pi}{2} - \epsilon_{i,s}. \quad (3)$$

2.2 Входные параметры поверхности моря

Входные параметры поверхности моря, необходимые для прогнозирования двухпозиционного рассеяния поверхностью моря, приведены в таблице 1, причем значения по умолчанию возможно использовать в отсутствие местных параметров.

ТАБЛИЦА 1

Входные параметры поверхности моря

Параметр	Описание	Значение по умолчанию
Соленость поверхности моря	Требуется для расчета комплексной относительной диэлектрической проницаемости поверхности моря	35 ‰ ²
Температура поверхности моря	Требуется для расчета комплексной относительной диэлектрической проницаемости поверхности моря	0, 15, 30° С
Скорость ветра U_{10} (м/с)	Скорость ветра на высоте 10 м над поверхностью моря	См. текст ниже
Возраст обратной волны Ω	Полностью взволнованное море, когда Ω близко к 0,85, умеренно взволнованное море, когда Ω близко к 1, и слабо взволнованное море, когда $\Omega > 2$	0,85
Волновое число высоты отсечения неровности k_d	Волновое число высоты, делящее спектр значений высоты поверхности моря на спектр длинных гравитационных волн и спектр коротких капиллярных волн	0,5 k , где k – волновое число (1/м)

Скорость ветра и система координат

При наличии следует использовать местные значения параметров, перечисленных в таблице 1. Скорость ветра на высоте 10 м над поверхностью моря зависит от географического положения и времени года и изменяется во времени. При наличии следует использовать местные данные о скорости ветра на поверхности моря (сила, направление, пространственная и временная корреляция), применимые к данному географическому местоположению. Когда не требуется пространственная или временная корреляция, возможно использовать карты полушарий из Рекомендации МСЭ-R P.2148.

² Символ ‰ – количество частей на тысячу (промилле).

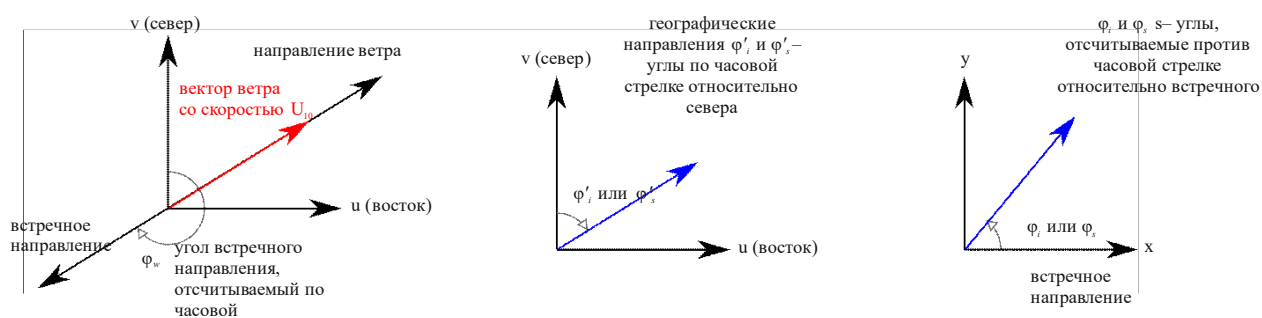
В случае если местные данные о скорости ветра на поверхности моря недоступны, возможно получить местный временной вектор ветра по данным из нескольких источников глобальных данных; например: восточный и северный компоненты часовой скорости ветра на высоте 10 м над земной поверхностью Земли с 1979 года по настоящее время имеются в базе климатических данных программы "Коперник", созданной Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП).

Некоторые наборы данных (например, данные Повторяющегося анализа ЕЦСПП, версия 5) обеспечивают v , северный (ветер направлен на север) компонент скорости ветра, и u , восточный (ветер направлен на восток) компонент скорости ветра. Для данного значения компонентов u и v величина скорости ветра на высоте 10 м над поверхностью Земли, U_{10} , определяется как $\sqrt{u^2 + v^2}$. Как показано на рисунке 3, встречное направление ветра – это направление, противоположное направлению, в котором дует ветер; а угол, измеренный по часовой стрелке между севером и встречным направлением ветра, ϕ_w , определяется как $270^\circ - \text{atan2}(v, u)^3$. Вследствие этого, на рисунке 3 положительная ось x , которая соответствует встречному направлению, образует угол $270^\circ - \text{atan2}(v, u)$ по часовой стрелке относительно севера, либо, что эквивалентно, север – это угол $270^\circ - \text{atan2}(v, u)$ против часовой стрелки относительно встречного направления.

Если ϕ'_i и ϕ'_s – углы падения и рассеяния, отсчитываемые по часовой стрелки относительно севера, то ϕ_i и ϕ_s , – соответствующие углы падения и рассеяния, отсчитываемые по часовой стрелки, которые показаны на рисунке 3, определяются как $\phi_i = \phi_w - \phi'_i$ и $\phi_s = \phi_w - \phi'_s$.

РИСУНОК 3

Скорость ветра и системы координат



P.2146-03

В рамках данного метода по представленным выше входным параметрам рассчитываются следующие промежуточные параметры:

- комплексная относительная диэлектрическая проницаемость поверхности моря ϵ_r ;
- функция спектральной плотности высоты поверхности моря $W_s(\kappa, \psi)$;
- дисперсия высоты поверхности моря σ^2 ; а также
- среднеквадратические наклоны поверхности моря при встречном направлении и поперечном направлении m_u^2 и m_c^2 .

3 Шаг 1. Определить комплексную относительную диэлектрическую проницаемость морской воды

Для получения комплексной относительной диэлектрической проницаемости морской воды в настоящей Рекомендации используется модель комплексной относительной диэлектрической проницаемости, которая описана в Рекомендации МСЭ-R P.527-6 уравнениями (14)–(27). Эта модель определяет комплексную относительную диэлектрическую проницаемость морской воды ϵ_r через

³ Функция $\text{atan2}(y, x)$ определяется как угол между положительной осью x и вектором от исходной точки до точки (x, y) .

соленость поверхности моря, температуру поверхности моря и частоту радиодиапазона. Значения по умолчанию солености и температуры поверхности моря приведены в таблице 1.

4 Шаг 2. Определить параметры неровности поверхности моря

Неровность поверхности моря определяется следующими параметрами:

- спектральная плотность высоты мелкомасштабных неровностей поверхности, необходимая для расчета диффузного компонента коэффициента двухпозиционного рассеяния из-за мелкомасштабной неровности (п. 6);
- общая среднеквадратическая высота поверхности моря, необходимая для расчета коэффициента когерентного отражения (п. 5);
- плотность вероятности крупномасштабных наклонов поверхности, необходимая для расчета диффузного компонента коэффициента двухпозиционного рассеяния из-за крупномасштабной неровности (п. 7).

4.1 Спектральная плотность высоты мелкомасштабных неровностей поверхности моря (капиллярная волна) и дисперсия высоты поверхности моря

Спектр мелкомасштабных неровностей связан со спектром направленности поверхности моря, $W(\kappa, \psi)$ следующим образом:

$$W_s(\kappa, \psi) = \begin{cases} 0 & \text{при } \kappa < \kappa_d \\ W(\kappa, \psi) & \text{в других случаях} \end{cases} \quad (4)$$

где κ_d – волновое число высоты отсечения двух градаций, а (κ, ψ) – полярные координаты пространственных волновых чисел во встречном и поперечном направлениях, связанные с прямоугольными координатами наклонов поверхности. Явное выражение $W(\kappa, \psi)$ приведено в Прилагаемом документе D.

Дисперсия общей среднеквадратической высоты поверхности моря σ , необходимая для расчета коэффициента когерентного отражения, связана со скоростью ветра, U_{10} , следующим образом:

$$\sigma^2 = \begin{cases} \sigma_0 + \sigma_1 U_{10} + \sigma_2 U_{10}^2 + \sigma_3 U_{10}^3 + \sigma_4 U_{10}^4 + \sigma_5 U_{10}^5, & \text{если } U_{10} \geq 1 \text{ м/с} \\ 0,001515 U_{10}, & \text{если } U_{10} < 1 \text{ м/с} \end{cases} \quad (5)$$

при σ^2 (дисперсия высоты поверхности моря) в квадратных метрах и U_{10} (скорость ветра на высоте 10 м над поверхностью моря) в м/с и:

$$\sigma_0 = -0,002913931483264$$

$$\sigma_1 = 0,006483314256661$$

$$\sigma_2 = -0,002390537892927$$

$$\sigma_3 = 0,000309146709141$$

$$\sigma_4 = 0,000026373965831$$

$$\sigma_5 = 0,000000350137099$$

4.2 Плотность вероятности крупномасштабных неровностей применительно к наклонам поверхности (гравитационная волна)

Плотность вероятности крупномасштабных неровностей применительно к наклонам поверхности представлена гауссовым двумерным распределением с нулевым средним:

$$P(S_u, S_c) = \frac{1}{2\pi m_u m_c} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{S_u^2}{m_u^2} + \frac{S_c^2}{m_c^2} \right) \right\}, \quad (6)$$

где S_u и S_c – наклоны во встречном и поперечном направлениях на участках поверхности, где рассчитываются местные коэффициенты двухпозиционного рассеяния. Кроме того, m_u^2 и m_c^2 – среднеквадратические наклоны поверхности при встречном и поперечном направлениях.

$$m_u^2 = \sum_{t=0}^7 a_t U_{10}^t \quad (7)$$

$$m_c^2 = \sum_{t=0}^7 b_t U_{10}^t \quad (8)$$

где коэффициенты регрессии $a_t (t = 0, \dots, 7)$ и $b_t (t = 0, \dots, 7)$ в уравнениях (7) и (8) зависят от частоты f в ГГц следующим образом:

$$a_t = d_{t,0} + d_{t,1} \log_e f + d_{t,2} (\log_e f)^2 + d_{t,3} (\log_e f)^3 + d_{t,4} (\log_e f)^4 \quad t = 0, \dots, 7 \quad (9)$$

$$b_t = z_{t,0} + z_{t,1} \log_e f + z_{t,2} (\log_e f)^2 + z_{t,3} (\log_e f)^3 + z_{t,4} (\log_e f)^4 \quad t = 0, \dots, 7 \quad (10)$$

Коэффициенты $d_{t,m}$ и $z_{t,m}$ представлены в таблице 2 и таблице 3, соответственно. Уравнения (7) и (8) действительны для значений U_{10} от 0,5 м/с до 25 м/с и значений частоты от 1 до 100 ГГц.

ТАБЛИЦА 2

Значения коэффициентов регрессии $d_{t,m}$ уравнения (9)

a_t	$d_{t,0}$	$d_{t,1}$	$d_{t,2}$	$d_{t,3}$	$d_{t,4}$
a_0	-0,001 316 803 829	-0,000 766 377 24	0,000 178 465 995	0,000 163 583 254	-2,722 372 719 5e-05
a_1	0,003 381 740 504	0,003 262 226 696	0,001 055 843 558	-0,000 556 018 050	5,638 297 081 0e-05
a_2	-8,387 091 908e-06	-0,000 788 099 04	-0,000 849 564 4	0,000 321 034 03	-2,969 409 304 3e-05
a_3	-7,172 344 345 1e-05	9,130 847 487e-05	0,000 180 310 43	-6,039 065 778e-05	5,252 298 53e-06
a_4	9,781 960 983 7e-06	-5,515 385 070e-06	-1,831 052 853e-05	5,756 933 90e-06	-4,820 426 74e-07
a_5	-5,824 151 735 3e-07	1,831 590 630e-07	9,693 536 66e-07	-2,928 018 73e-07	2,384 386 09e-08
a_6	1,662 701 734 3e-08	-3,121 665 19e-09	-2,590 444 81e-08	7,608 802 794e-09	-6,063 116 61e-10
a_7	-1,853 308 18e-10	2,084 451 182e-11	2,762 769 59e-10	-7,94818760e-11	6,223 677 47e-12

ТАБЛИЦА 3

Значения коэффициентов регрессии $z_{t,m}$ уравнения (10)

b_t	$z_{t,0}$	$z_{t,1}$	$z_{t,2}$	$z_{t,3}$	$z_{t,4}$
b_0	-0,000 388 356 64	-0,000 566 882 739	-0,000 187 663 9	0,000 195 168 030 1	-2,564 879 98e-05
b_1	0,000 711 554 432 3	0,001 274 333 859	0,001 582 455 599	-0,000 564 251 194	5,158 545 58e-05
b_2	0,000 467 115 768	7,665 602 489e-05	-0,000 999 944 82	0,000 304 430 724	-2,608 628 437e-05
b_3	-0,000 113 274 18	-7,062 890 94e-05	0,000 204 604 176	-5,704 760 441e-05	4,619 116 82e-06
b_4	1,144 869 515e-05	9,917 914 997 6e-06	-2,031 787 86e-05	5,376 554 489e-06	-4,184 881 982e-07
b_5	-5,954 866 288 2e-07	-6,127 030 44e-07	1,063 995 76e-06	-2,717 537 12e-07	2,052 809 6e-08
b_6	1,566 749 978 4e-08	1,794 015 885e-08	-2,826 461 77e-08	7,033 322 599e-09	-5,186 932 2e-10
b_7	-1,651 144 028 4e-10	-2,032 492 61e-10	3,003 151 95e-10	-7,323 652 942e-11	5,294 665 17e-12

5 Шаг 3. Определить когерентный компонент коэффициента двухпозиционного рассеяния

Когерентный компонент коэффициента двухпозиционного рассеяния аналогичен поляризованному компоненту (vv или hh), и он существует только в направлении зеркального отражения:

$$\gamma_{pq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \begin{cases} 4\pi |r_{pp}(\theta_i)|^2 \exp\{-(2\kappa \cos \theta_i)^2\}, & \text{если } \theta_s = \theta_i, \varphi_s = \varphi_i, \text{ и } p = q \\ 0 & \text{в других случаях} \end{cases} \quad (11)$$

В вышеприведенном выражении $r_{pp}(\theta_i)$ – коэффициент отражения Френеля для поляризации p ($p = v, h$):

$$r_{hh}(\theta_i) = \frac{\cos\theta_i - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}}{\cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}} \quad (12)$$

$$r_{vv}(\theta_i) = \frac{\varepsilon_r \cos\theta_i - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}}{\varepsilon_r \cos\theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}} \quad (13)$$

6 Шаг 4. Определить диффузный компонент двухпозиционного рассеяния из-за крупномасштабной неровности

Для получения коэффициента двухпозиционного рассеяния из-за крупномасштабной неровности (гравитационная волна) следует использовать углы падения (θ_i , φ_i) и углы рассеяния (θ_s , φ_s), приведенные в п. 2.1, для расчета следующих величин:

$$q_x = \sin\theta_s \cos\varphi_s - \sin\theta_i \cos\varphi_i \quad (14)$$

$$q_y = \sin\theta_s \sin\varphi_s - \sin\theta_i \sin\varphi_i \quad (15)$$

$$q_z = \cos\theta_s + \cos\theta_i \quad (16)$$

$$q^2 = q_x^2 + q_y^2 + q_z^2 \quad (17)$$

$$(\hat{k}_s \cdot \hat{\nu}_i) = -\sin\theta_s \cos\theta_i \cos(\varphi_s - \varphi_i) - \sin\theta_i \cos\theta_s \quad (18)$$

$$(\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i) = \sin\theta_s \sin(\varphi_s - \varphi_i) \quad (19)$$

$$(\hat{k}_i \cdot \hat{\nu}_s) = \sin\theta_i \cos\theta_s \cos(\varphi_s - \varphi_i) + \sin\theta_s \cos\theta_i \quad (20)$$

$$(\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s) = -\sin\theta_i \sin(\varphi_s - \varphi_i) \quad (21)$$

$$D_0^2 = (\hat{k}_i \cdot \hat{\nu}_s)^2 + (\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)^2 \quad (22)$$

Подставляем уравнения (16) и (17) в уравнение (23) для получения местного угла падения θ'_i в точке поверхности, который влияет на коэффициент двухпозиционного рассеяния:

$$\cos\theta'_i = q |q_z| / (2q_z) \quad (23)$$

Подставляем уравнение (23) в уравнения (12) и (13), используя надлежащее значение комплексной относительной диэлектрической проницаемости, для того чтобы найти местный коэффициент отражения Френеля r'_{hh} и r'_{vv} . Далее подставляем местные коэффициенты Френеля r'_{hh} и r'_{vv} вместе со скалярными произведениями векторов уравнений (18)–(21) в уравнения (24)–(27), для того чтобы найти коэффициенты поляризации $U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$:

если $D_0^2 \neq 0$:

$$U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \{(\hat{k}_s \cdot \hat{\nu}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{\nu}_s)r'_{hh} + (\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)r'_{vv}\} / D_0^2 \quad (24)$$

$$U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \{-(\hat{k}_s \cdot \hat{\nu}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)r'_{hh} + (\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{\nu}_s)r'_{vv}\} / D_0^2 \quad (25)$$

$$U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \{-(\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{\nu}_s)r'_{hh} + (\hat{k}_s \cdot \hat{\nu}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)r'_{vv}\} / D_0^2 \quad (26)$$

$$U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \{(\hat{k}_s \cdot \hat{h}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{h}_s)r'_{hh} + (\hat{k}_s \cdot \hat{\nu}_i)(\hat{k}_i \cdot \hat{\nu}_s)r'_{vv}\} / D_0^2 \quad (27)$$

если $D_0^2 = 0$:

$$U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = r'_{hh} \quad (28)$$

$$U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = 0 \quad (29)$$

$$U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = 0 \quad (30)$$

$$U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = r'_{vv} \quad (31)$$

Подставляем уравнения (14)–(17) и (24)–(27) в уравнение (32), для того чтобы найти диффузный компонент коэффициента двухпозиционного рассеяния поверхностью моря $\gamma_{pq}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$, обусловленного длинной гравитационной волной:

$$\gamma_{pq}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2m_u m_c} \left| \frac{q}{q_z} \right|^4 |U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)|^2 \exp \left\{ \frac{-1}{2q_z^2} \left(\left\{ \frac{q_x}{m_u} \right\}^2 + \left\{ \frac{q_y}{m_c} \right\}^2 \right) \right\} \quad (32)$$

где m_u и m_c – среднеквадратические наклоны поверхности при встречном и поперечном направлениях, определенные в уравнениях (7) и (8) как функция скорости ветра U_{10} и частоты f .

7 Шаг 5. Определить диффузный компонент двухпозиционного рассеяния из-за мелкомасштабной неровности

Для получения диффузного двухпозиционного рассеяния из-за мелкомасштабной неровности вначале необходимо установить максимум и минимум S_u и S_c .

$$S_{u,max} = 6 m_u$$

$$S_{u,min} = -\min(6 m_u, \cot \theta_i)$$

$$S_{c,max} = 6 m_c$$

$$S_{c,min} = -6 m_c$$

Область наклона, лежащая между вышеуказанными максимумом и минимумом, разделяется на 64×64 точки с использованием узлов квадратуры Гаусса. В произвольном узле (t, m) наклоны возможно описать как:

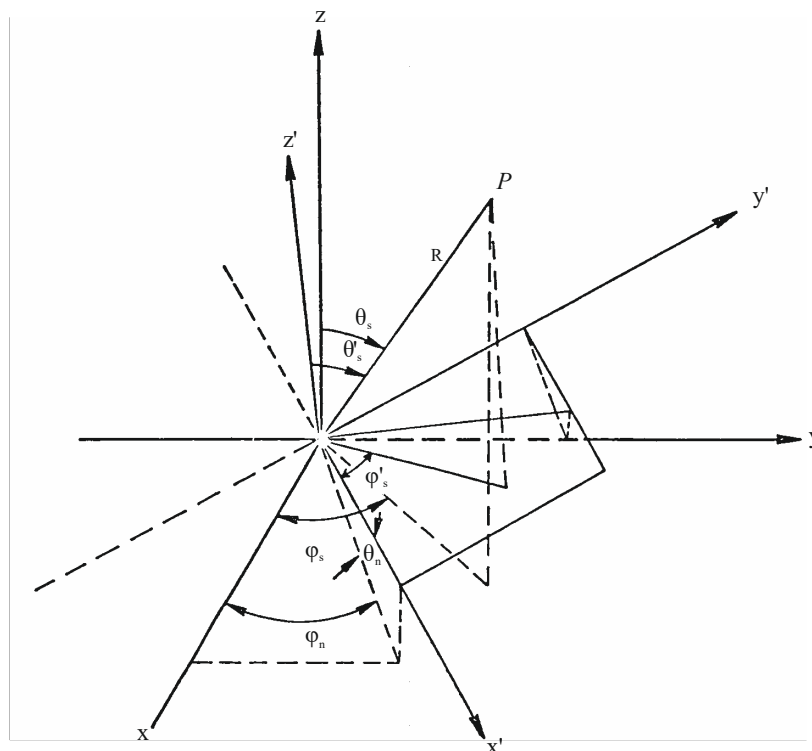
$$S_{u,t} = \frac{1}{2} \{ (S_{u,max} - S_{u,min}) \chi(t) + (S_{u,max} + S_{u,min}) \} \quad (33)$$

$$S_{c,m} = \frac{1}{2} \{ (S_{c,max} - S_{c,min}) \zeta(m) + (S_{c,max} + S_{c,min}) \} \quad (34)$$

В уравнениях (33) и (34) $\chi(t)$ и $\zeta(m)$ – это узлы квадратуры Гаусса ($t, m = 1, \dots, 64$), которые соответствуют X_i в разделе 3 Приложения к Рекомендации МСЭ-Р Р.1144-11, то есть $\chi(t), \zeta(m) \rightarrow X_i$. Также $S_{u,t} \rightarrow X'_i$ и $S_{c,m} \rightarrow Z'_i$.

РИСУНОК 4

Местные значения углов рассеяния (θ'_s, φ'_s) и углов падения относительно нормали к поверхности (зенитный угол θ_n и азимутальный угол φ_n)



P.2146-04

В вышеуказанном гауссовом узле выполнить описанные ниже процедуры.

- Найти зенитный угол θ_n и азимутальный угол φ_n , определяющие наклонение нормали к поверхности с крупномасштабными неровностями относительно поверхности моря η (см. рисунок 4), подставив уравнения (32) и (33) в уравнения (35)–(37):

$$\varphi_n = \tan^{-1}\{S_{c,m}/S_{u,t}\} \quad (35)$$

$$\cos \theta_n = \frac{1}{\sqrt{S_{u,t}^2 + S_{c,m}^2 + 1}} \quad (36)$$

$$\sin \theta_n = \cos \theta_n \{S_{u,t} \cos \varphi_n + S_{c,m} \sin \varphi_n\} \quad (37)$$

- Найти местные значения углов рассеяния и падения θ'_s и φ'_s , а также θ'_i и φ'_i в этой узловой точке:

$$\varphi'_s = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sin \theta_s \sin(\varphi_s - \varphi_n)}{\sin \theta_s \cos \theta_n \cos(\varphi_s - \varphi_n) + \cos \theta_s \sin \theta_n} \right\} \quad (38)$$

$$\cos \theta'_s = \frac{\{-\sin \theta_s (S_{u,t} \cos \varphi_s + S_{c,m} \sin \varphi_s) + \cos \theta_s\}}{\sqrt{S_{u,t}^2 + S_{c,m}^2 + 1}} \quad (39)$$

$$\sin \theta'_s = \{\sin \theta_s \cos \theta_n \cos(\varphi_s - \varphi_n) + \cos \theta_s \sin \theta_n\} \cos \varphi'_s + \{\sin \theta_s \sin(\varphi_s - \varphi_n)\} \sin \varphi'_s \quad (40)$$

и

$$\varphi'_i = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sin \theta_i \sin(\varphi_i - \varphi_n)}{\sin \theta_i \cos \theta_n \cos(\varphi_i - \varphi_n) - \cos \theta_i \sin \theta_n} \right\} \quad (41)$$

$$\cos \theta'_i = \frac{\{\sin \theta_i (S_{u,t} \cos \varphi_i + S_{c,m} \sin \varphi_i) + \cos \theta_i\}}{\sqrt{S_{u,t}^2 + S_{c,m}^2 + 1}} \quad (42)$$

$$\sin \theta'_i = \{\sin \theta_i \cos \theta_n \cos(\varphi_i - \varphi_n) - \cos \theta_i \sin \theta_n\} \cos \varphi'_i + \{\sin \theta_i \sin(\varphi_i - \varphi_n)\} \sin \varphi'_i \quad (43)$$

- Получение местных значений углов падения и рассеяния позволяет найти компоненты горизонтальной поляризации падающей волны и горизонтальной поляризации рассеянной волны:

$$h_{xi} = \sin \theta_i \sin \varphi_i - \cos \theta_i S_{c,m} \quad (44)$$

$$h_{yi} = \cos \theta_i S_{u,t} - \sin \theta_i \cos \varphi_i \quad (45)$$

$$h_{zi} = \sin \theta_i (S_{u,t} \sin \varphi_i - S_{c,m} \cos \varphi_i) \quad (46)$$

$$D_i = \sqrt{h_{xi}^2 + h_{yi}^2 + h_{zi}^2} \quad (47)$$

и

$$h_{xs} = \sin \theta_s \sin \varphi_s + \cos \theta_s S_{c,m} \quad (48)$$

$$h_{ys} = -\{\cos \theta_s S_{u,t} + \sin \theta_s \cos \varphi_s\} \quad (49)$$

$$h_{zs} = \sin \theta_s (S_{u,t} \sin \varphi_s - S_{c,m} \cos \varphi_s) \quad (50)$$

$$D_s = \sqrt{h_{xs}^2 + h_{ys}^2 + h_{zs}^2}. \quad (51)$$

- Найти следующие скалярные произведения векторов в направлении падения:

$$(\vartheta'_i \cdot \vartheta_i) = \cos \theta_n \{-\cos \theta_i (S_{u,t} \cos \varphi_i + S_{c,m} \sin \varphi_i) + \sin \theta_i\} / D_i \quad (52)$$

$$(\vartheta'_i \cdot \hat{h}_i) = \cos \theta_n \{-S_{u,t} \sin \varphi_i + S_{c,m} \cos \varphi_i\} / D_i \quad (53)$$

$$(\hat{h}'_i \cdot \vartheta_i) = \frac{-1}{D_i} \{\cos \theta_i (h_{xi} \cos \varphi_i + h_{yi} \sin \varphi_i) + h_{zi} \sin \theta_i\} \quad (54)$$

$$(\hat{h}'_i \cdot \hat{h}_i) = \frac{1}{D_i} \{h_{yi} \cos \varphi_i - h_{xi} \sin \varphi_i\} \quad (55)$$

А также следующие скалярные произведения векторов в направлении рассеяния:

$$(\vartheta_s \cdot \vartheta'_s) = \cos \theta_n \{\cos \theta_s (S_{u,t} \cos \varphi_s + S_{c,m} \sin \varphi_s) + \sin \theta_s\} / D_s \quad (56)$$

$$(\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s) = \frac{1}{D_s} \{\cos \theta_s (h_{xs} \cos \varphi_s + h_{ys} \sin \varphi_s) - h_{zs} \sin \theta_s\} \quad (57)$$

$$(\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s) = \cos \theta_n \{-S_{u,t} \sin \varphi_s + S_{c,m} \cos \varphi_s\} / D_s \quad (58)$$

$$(\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s) = \frac{1}{D_s} \{h_{ys} \cos \varphi_s - h_{xs} \sin \varphi_s\} \quad (59)$$

- Найти коэффициенты поляризации в g'_{pq} местной системы путем подстановки уравнений (38)–(41) вместе с надлежащим значением комплексной относительной диэлектрической проницаемости в уравнения (60)–(63):

$$g'_{hh} = \frac{(\varepsilon_r - 1)}{\left(\cos \theta'_s + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_s}\right) \left(\cos \theta'_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_i}\right)} \cos(\varphi'_s - \varphi'_i) \quad (60)$$

$$g'_{vh} = \frac{-(\varepsilon_r - 1) \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_s}}{\left(\varepsilon_r \cos \theta'_s + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_s}\right) \left(\cos \theta'_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_i}\right)} \sin(\varphi'_s - \varphi'_i) \quad (61)$$

$$g'_{hv} = \frac{(\varepsilon_r - 1) \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_i}}{\left(\cos \theta'_s + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_s}\right) \left(\varepsilon_r \cos \theta'_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_i}\right)} \sin(\varphi'_s - \varphi'_i) \quad (62)$$

$$g'_{vv} = \frac{(\varepsilon_r - 1) \left(\varepsilon_r \sin \theta'_i \sin \theta'_s - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_s} \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_i} \cos(\varphi'_s - \varphi'_i)\right)}{\left(\varepsilon_r \cos \theta'_s + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_s}\right) \left(\varepsilon_r \cos \theta'_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta'_i}\right)} \quad (63)$$

– Найти коэффициенты поляризации G_{pq} путем подстановки уравнений (60)–(63) и уравнений (52)–(59) в уравнения (64)–(67):

$$G_{vv} = \{(\vartheta_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vv} + (\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hv}\}(\vartheta'_i \cdot \vartheta_i) + \{(\vartheta_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vh} + (\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hh}\}(\hat{h}'_i \cdot \vartheta_i) \quad (64)$$

$$G_{vh} = \{(\vartheta_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vv} + (\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hv}\}(\vartheta'_i \cdot \hat{h}_i) + \{(\vartheta_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vh} + (\vartheta_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hh}\}(\hat{h}'_i \cdot \hat{h}_i) \quad (65)$$

$$G_{hv} = \{(\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vv} + (\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hv}\}(\vartheta'_i \cdot \vartheta_i) + \{(\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vh} + (\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hh}\}(\hat{h}'_i \cdot \vartheta_i) \quad (66)$$

$$G_{hh} = \{(\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vv} + (\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hv}\}(\vartheta'_i \cdot \hat{h}_i) + \{(\hat{h}_s \cdot \vartheta'_s)g'_{vh} + (\hat{h}_s \cdot \hat{h}'_s)g'_{hh}\}(\hat{h}'_i \cdot \hat{h}_i) \quad (67)$$

Функция \mathcal{U} обеспечивает одновременное определение гауссовым узлом (t, m) направления падения и направления рассеяния:

$$\mathcal{U}(S_{u,t}, \theta_i) = \begin{cases} \max((1 + S_{u,t} \tan \theta_i), 0), & \text{если } 0 \leq \theta'_i \leq \frac{\pi}{2} \text{ и } 0 \leq \theta'_s \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{в других случаях} \end{cases} \quad (68)$$

Вышеописанные процедуры необходимо повторять, до тех пор пока не будут охвачены все узлы наклона.

Для получения диффузного коэффициента двухпозиционного рассеяния из-за коротких волн следует использовать вышеприведенные формулы для расчета (69) и (70) во всех узлах:

$$P(S_{u,t}, S_{c,m}) = \frac{1}{2\pi m_u m_c} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{S_{u,t}^2}{m_u^2} + \frac{S_{c,m}^2}{m_c^2}\right)\right\} \quad (69)$$

$$\gamma_{pq}^{cap}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = 16\pi(k^2 \cos \theta'_s \cos \theta'_i)^2 |G_{pq}|^2 W_s(\kappa, \varphi_i) \quad (70)$$

Уравнение (69) получается из уравнения (6). Кроме того. $W_s(\kappa, \varphi_i)$ в уравнении (70) – это функция спектральной плотности для короткой волны, которая приведена в Прилагаемом документе D и рассчитана при $\psi = \varphi_i$ и волновом числе высоты κ , определяемом как:

$$\kappa = k \sqrt{\sin^2 \theta'_s + \sin^2 \theta'_i - 2 \sin \theta'_s \sin \theta'_i \cos(\varphi'_s - \varphi'_i)} \quad (71)$$

Далее подставляем уравнения (68)–(71) в уравнение (72), для того чтобы найти диффузный компонент коэффициента двухпозиционного рассеяния поверхностью моря из-за мелкомасштабной неровности (короткая капиллярная волна):

$$\gamma_{pq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = C \sum_{m=1}^{64} \sum_{t=1}^{64} \gamma_{pq}^{cap}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \mathcal{U}(S_{u,t}, \theta_i) P(S_{u,t}, S_{c,m}) w_{u,t} w_{c,m} \quad (72)$$

В уравнении (72) $w_{u,t}$ и $w_{c,m}$ – веса квадратуры Гаусса, которые определены в разделе 3 Приложения к Рекомендации МСЭ-R P.1144-11. Коэффициент C является константой, которая задается следующим образом:

$$C = \frac{1}{4} \{(S_{u,max} - S_{u,min})(S_{c,max} - S_{c,min})\} \quad (73)$$

8 Суммирование компонентов коэффициента двухпозиционного рассеяния поверхностью моря

Когерентный компонент (11) и диффузные компоненты (32) и (72) коэффициента двухпозиционного рассеяния поверхностью моря суммируются и используются при анализе свойств этих коэффициентов в направлении обратного рассеяния и в прямом (зеркальном) направлении.

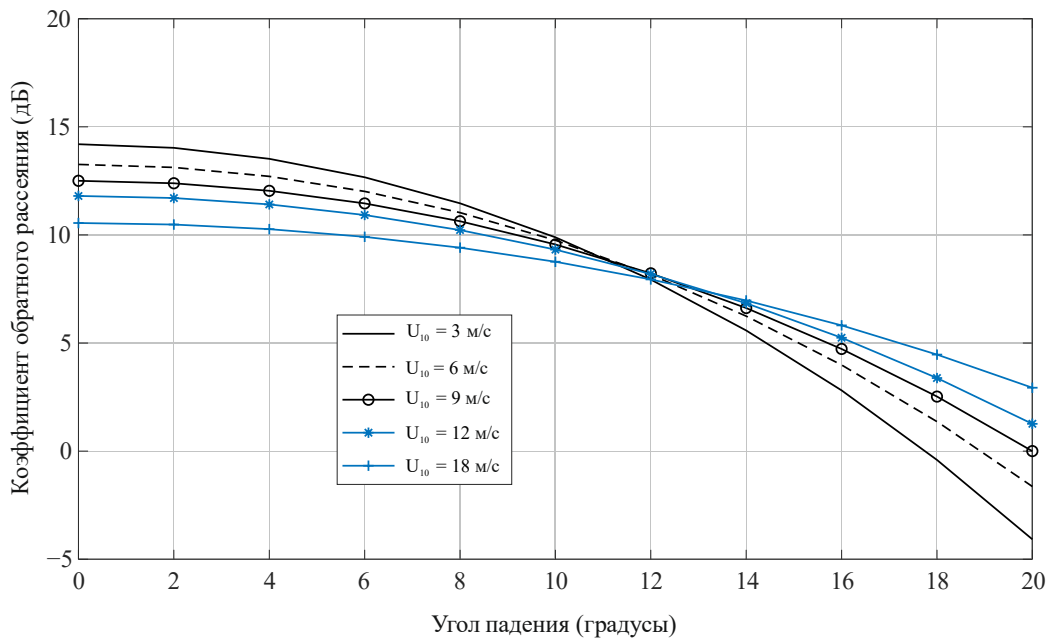
$$\gamma_{pq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \gamma_{pq}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + \gamma_{pq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + \gamma_{pq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \quad (74)$$

8.1 Коэффициенты обратного рассеяния поверхностью моря

Коэффициенты обратного рассеяния поверхностью моря представляют особый интерес для специалистов в области активного дистанционного зондирования. Эти коэффициенты не содержат когерентного компонента и могут быть рассчитаны по сумме уравнений (32) и (72), если установить $\hat{k}_s = -\hat{k}_i$ (то есть $\theta_s = \theta_i$ и $\varphi_s = \pi + \varphi_i$). Рисунки 5–8 иллюстрируют зависимость коэффициентов обратного рассеяния поверхностью моря от угла падения, поляризации, скорости и направления ветра.

РИСУНОК 5

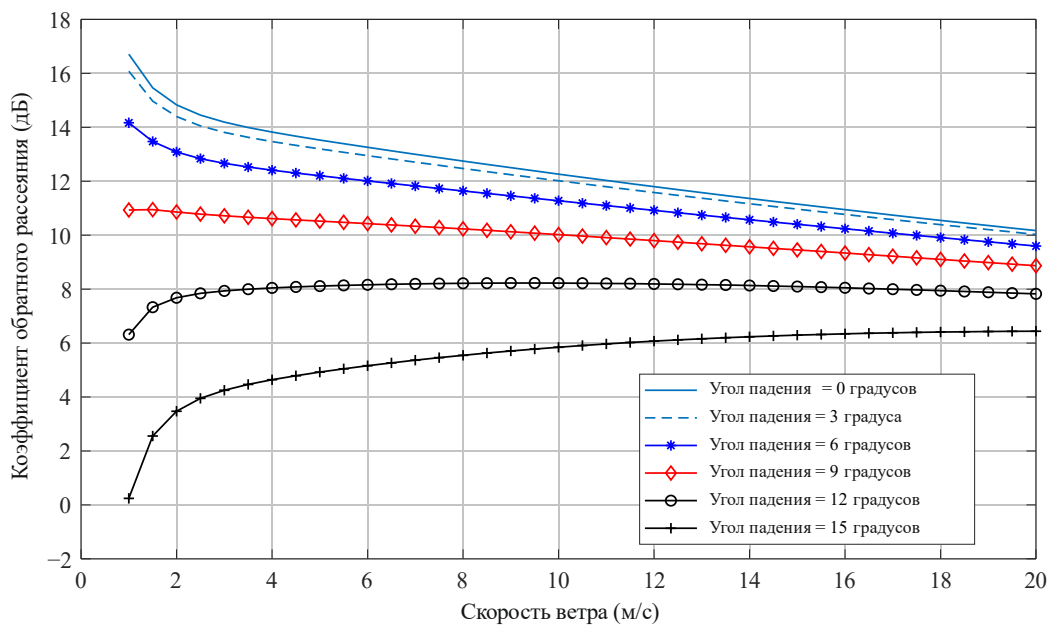
Коэффициенты обратного рассеяния во встречном направлении в зависимости от угла падения при разных значениях скорости ветра (частота = 13,6 ГГц, $\Omega = 0,84$, температура = 30° С, соленость = 35 ‰)



P.2146-05

РИСУНОК 6

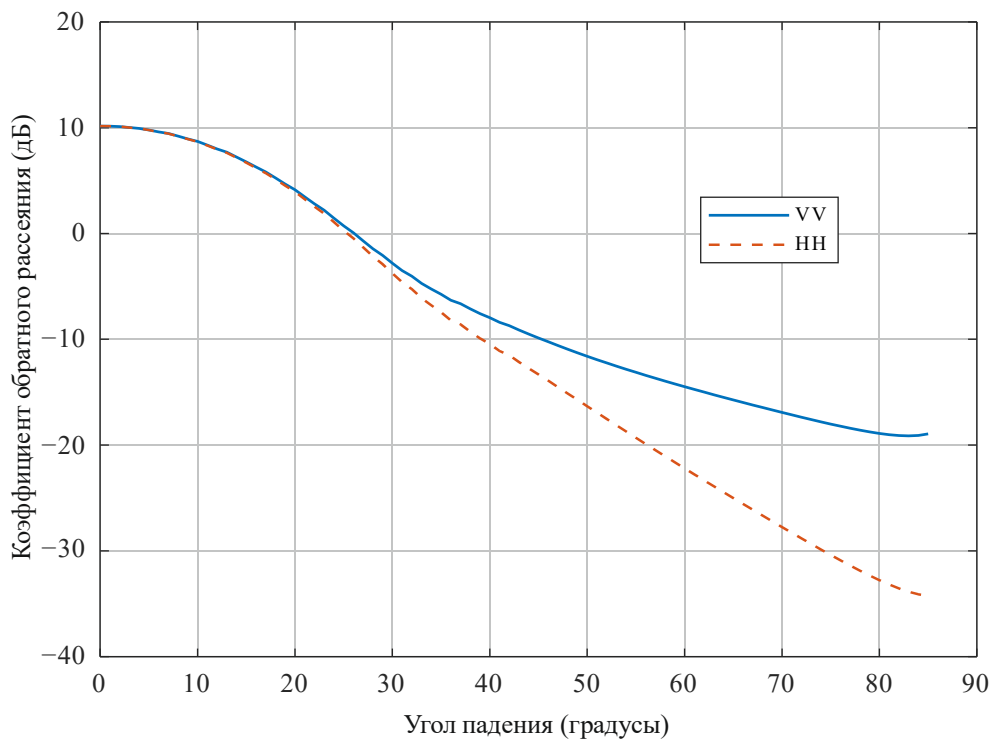
Коэффициенты обратного рассеяния в зависимости от скорости ветра при разных углах падения
(частота = 13,6 ГГц, $\Omega = 0,84$, температура = 30° С, соленость = 35 ‰)



P.2146-06

РИСУНОК 7

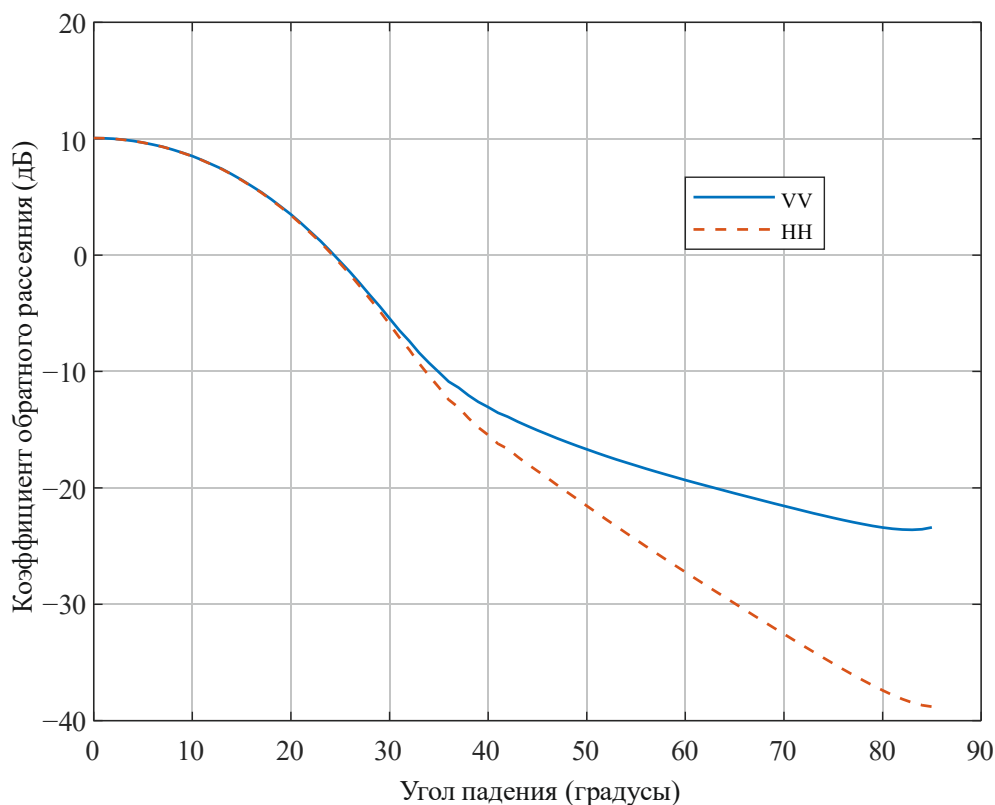
Коэффициенты обратного рассеяния во встречном направлении в зависимости от угла падения
(частота = 18,6 ГГц, $\Omega = 0,84$, температура = 30° С, $U_{10} = 18$ м/с, соленость = 35 ‰)



P.2146-07

РИСУНОК 8

Коэффициенты обратного рассеяния в поперечном направлении в зависимости от угла падения
(частота = 18,6 ГГц, $\Omega = 0,84$, температура = 30° С, $U_{10} = 18$ м/с, соленость = 35 ‰)



P.2146-08

8.2 Коэффициенты двухпозиционного рассеяния поверхностью моря в прямом направлении

Коэффициенты двухпозиционного рассеяния поверхностью моря в прямом направлении возможно использовать для оценки мощности помех, поступающих на приемную антенну. Эти коэффициенты двухпозиционного рассеяния поверхностью моря возможно использовать также для расчета значений глубины замираний, вызываемых отражениями от поверхности моря, в Рекомендация МСЭ-R P.680-3. Данные значения могут быть рассчитаны как сумма когерентного компонента (11) и диффузного компонента. Когерентный компонент существует только в направлении зеркального отражения ($\theta_s = \theta_i$, и $\varphi_s = \varphi_i$). Диффузный компонент определяется с помощью уравнений (32) и (72), полагая $\theta_s = \theta_i \wedge \varphi_s = \varphi_i$.

На рисунках 9–14 представлены примеры коэффициентов двухпозиционного рассеяния в прямом направлении. На рисунках 9–10 угол рассеяния (угол наблюдения приемной антенны) постоянный, а угол падения (направление помеховых сигналов) варьируется. На рисунке 9 представлены результаты расчетов на частоте 1,2276 ГГц (частота L2 GPS), а на рис. 10 – на частоте 18,6 ГГц. На каждом рисунке показаны коэффициенты двухпозиционного рассеяния, рассчитанные для двух разных значений скорости ветра: $U_{10} = 2$ м/с и $U_{10} = 25$ м/с.

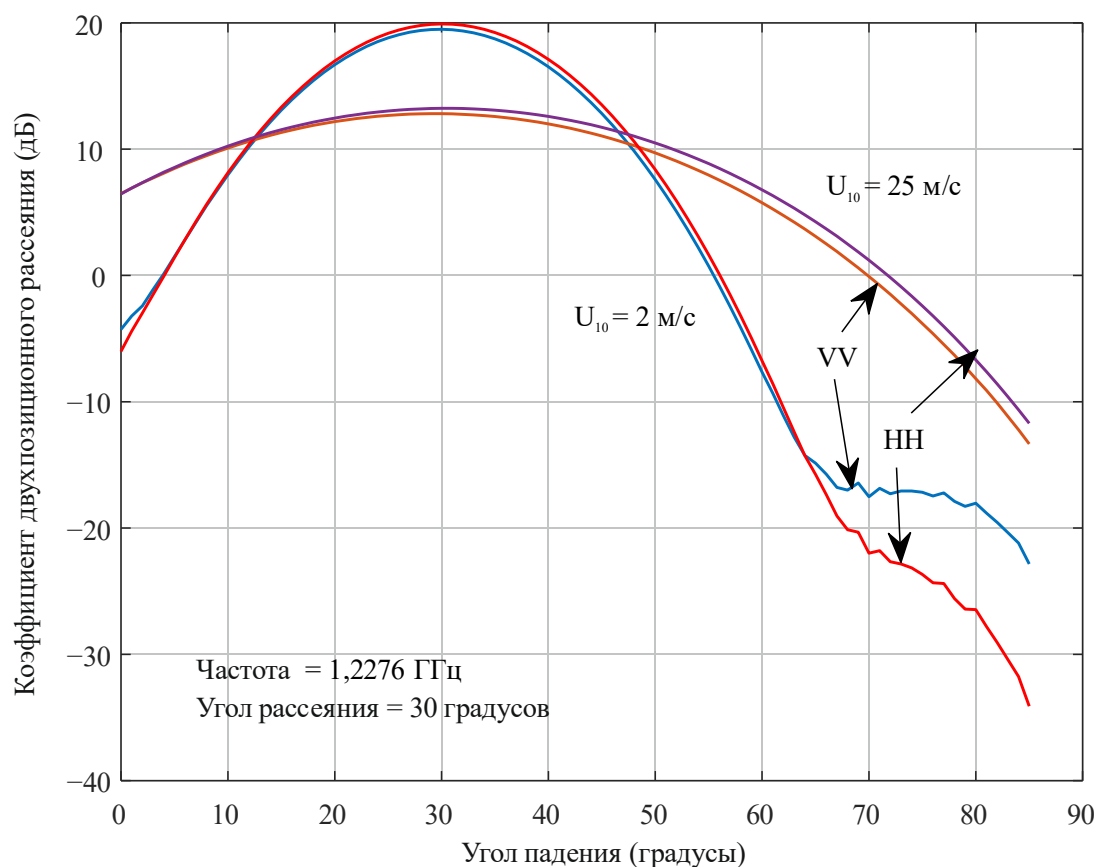
На рисунках 11–14 угол падения (угол источника помех) постоянный, а угол рассеяния варьируется. На рисунках 11 и 13 представлены результаты расчетов на частоте 1,2276 ГГц, а на рисунках 12 и 14 – результаты расчетов на частоте 18,6 ГГц. На рисунках 11 и 12 представлены результаты расчетов при температуре поверхности моря 30° С. На рисунках 13 и 14 – результаты расчетов при температуре поверхности моря 5° С. Кроме того, на каждом из рисунков 11–14 показаны коэффициенты двухпозиционного рассеяния, рассчитанные для двух разных значений скорости ветра: $U_{10} = 2$ м/с и $U_{10} = 25$ м/с.

В силу принципа взаимности фиксирование значения либо угла падения, либо угла рассеяния приводит к аналогичным результатам. Соответственно, фиксированное значение угла рассеяния на рисунках 8 и 9 отличается от фиксированного значения угла падения на рисунках 11–14.

Сравнение рисунка 11 с рисунком 13, а также рисунка 12 с рисунком 14 показывает, что при температуре выше точки замерзания температура не оказывает заметного влияния на коэффициент двухпозиционного рассеяния.

РИСУНОК 9

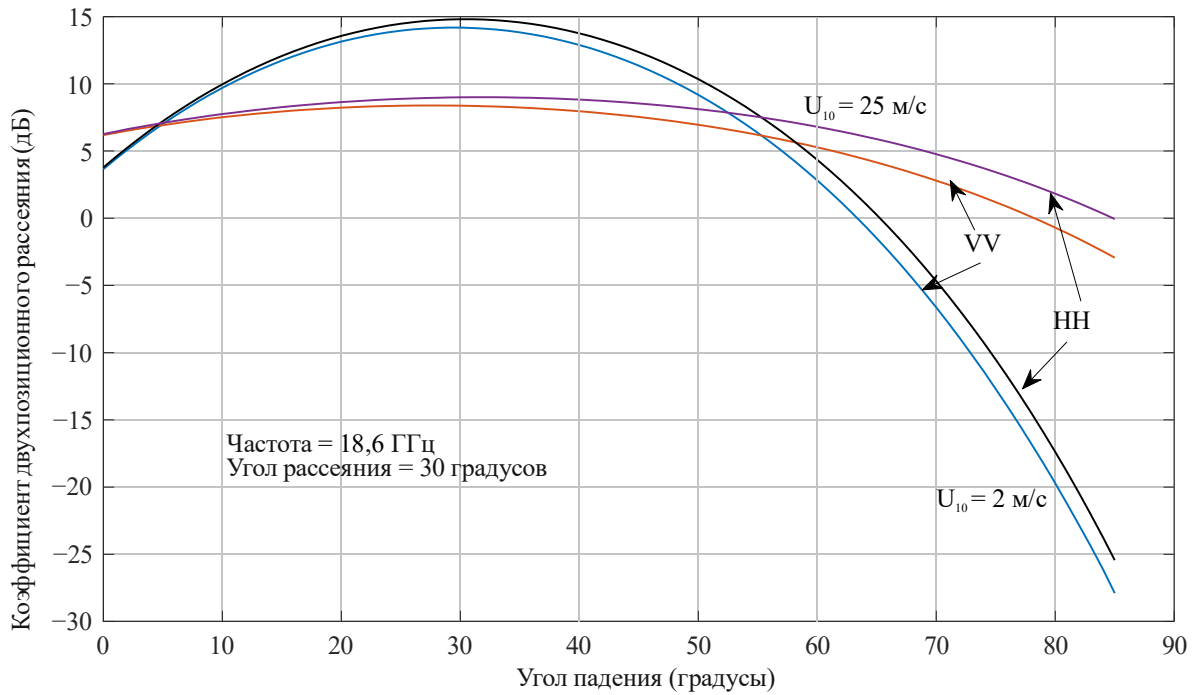
Коэффициенты двухпозиционного рассеяния в прямом направлении в зависимости от угла падения при разных значениях скорости ветра
($\theta_s = 30^\circ$, частота = 1,2276 ГГц, $\Omega = 0,84$, температура = 30°C , соленость = 35‰)



P.2146-09

РИСУНОК 10

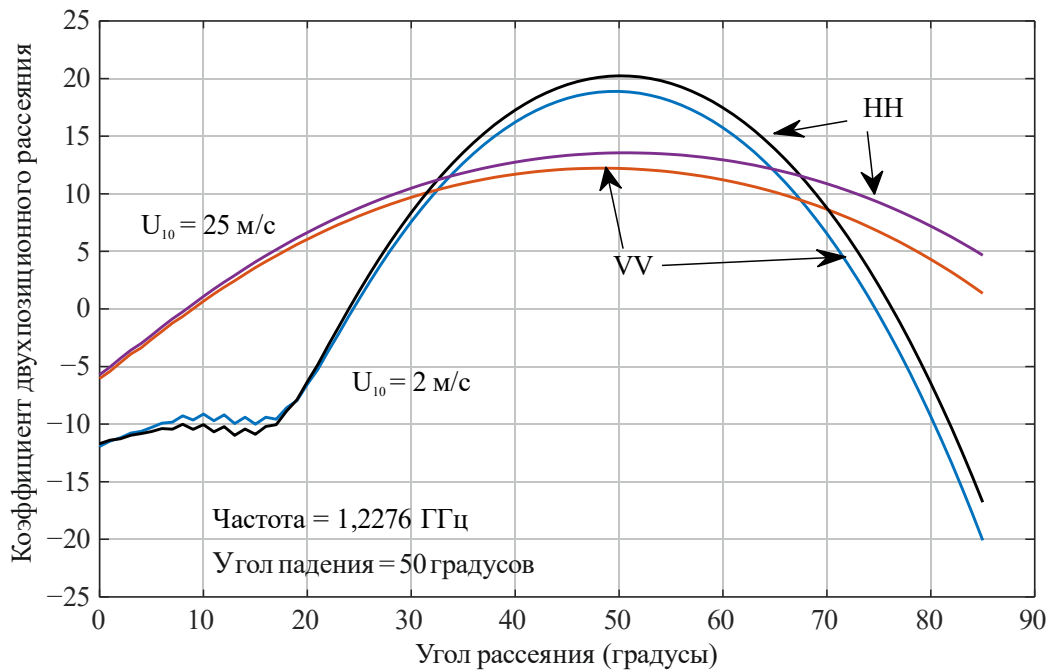
Коэффициенты двухпозиционного рассеяния в прямом направлении в зависимости от угла падения при разных значениях скорости ветра
 ($\theta_s = 30^\circ$, частота = 18,6 ГГц, $\Omega = 0,84$, температура = 30° С, соленость = 35 ‰)



P.2146-10

РИСУНОК 11

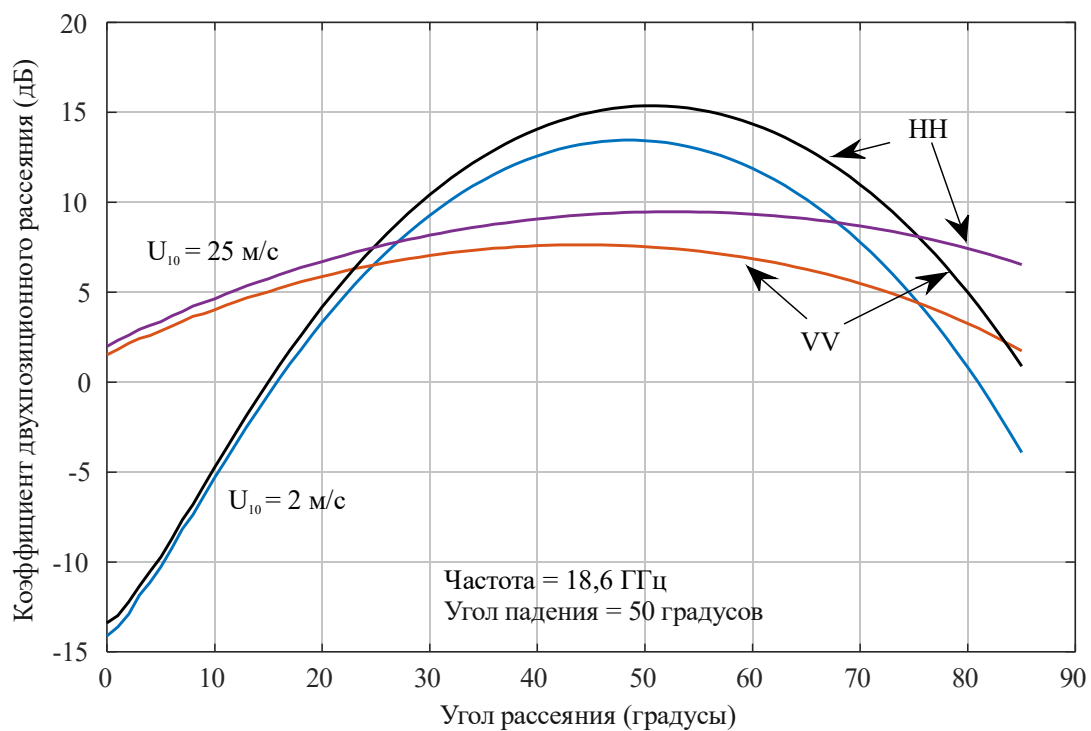
Коэффициенты двухпозиционного рассеяния в прямом направлении в зависимости от угла рассеяния при разных значениях скорости ветра
 ($\theta_i = 50^\circ$, частота = 1,2276 ГГц, $\Omega = 0,84$, температура = 30° С, соленость = 35 ‰)



P.2146-11

РИСУНОК 12

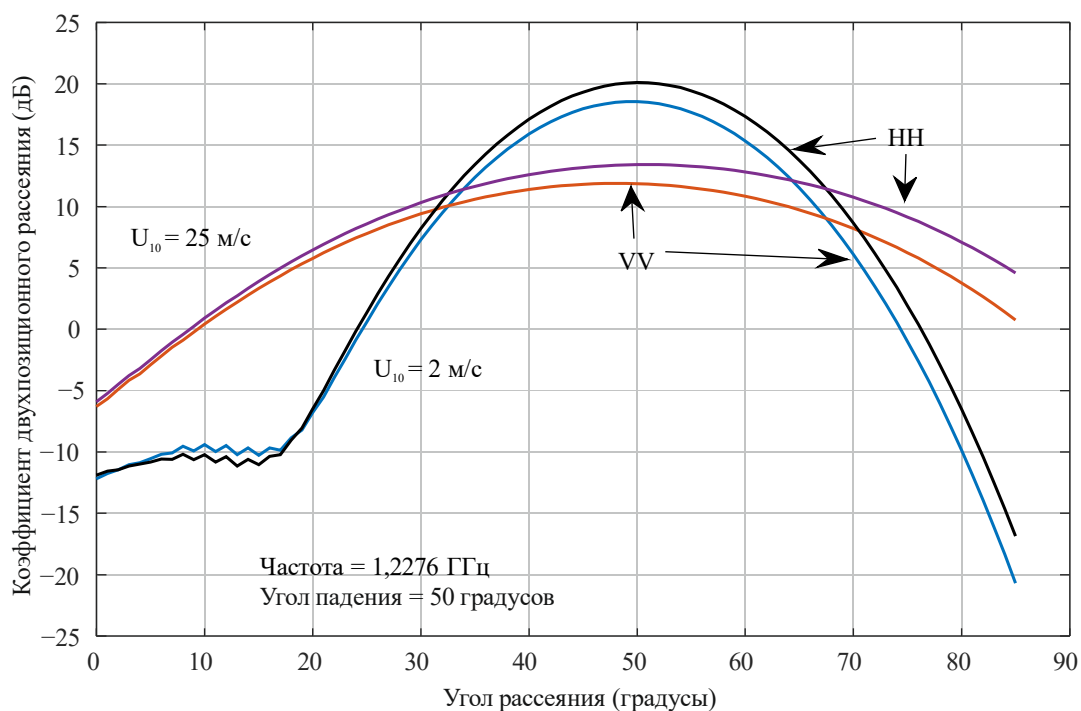
Коэффициенты двухпозиционного рассеяния в прямом направлении в зависимости от угла рассеяния при разных значениях скорости ветра
 $(\theta_i = 50^\circ, \text{частота} = 18,6 \text{ ГГц}, \Omega = 0,84, \text{температура} = 30^\circ \text{ С}, \text{соленость} = 35 \text{ ‰})$



P.2146-12

РИСУНОК 13

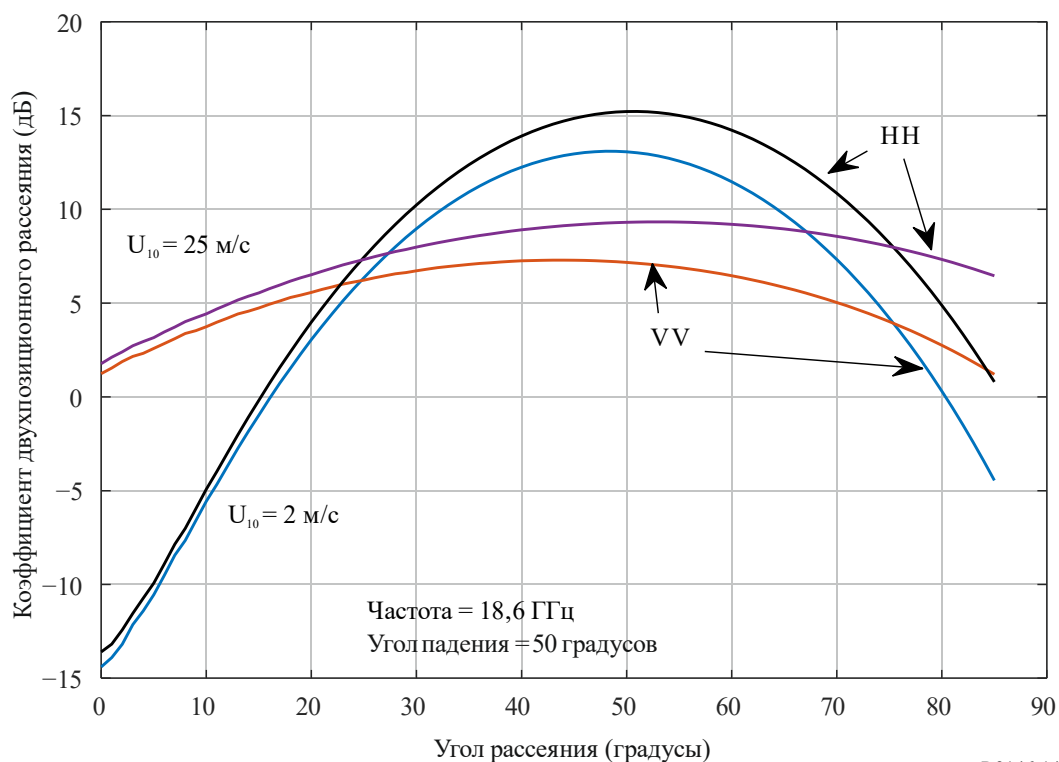
Коэффициенты двухпозиционного рассеяния в прямом направлении в зависимости от угла рассеяния при разных значениях скорости ветра
 $(\theta_i = 50^\circ, \text{частота} = 1,2276 \text{ ГГц}, \Omega = 0,84, \text{температура} = 5^\circ \text{ С}, \text{соленость} = 35 \text{ ‰})$



P.2146-13

РИСУНОК 14

Коэффициенты двухпозиционного рассеяния в прямом направлении в зависимости от угла рассеяния при разных значениях скорости ветра
 $(\theta_i = 50^\circ, \text{частота} = 18,6 \text{ ГГц}, \Omega = 0,84, \text{температура} = 5^\circ \text{ С}, \text{соленость} = 35 \text{ ‰})$



P.2146-14

Прилагаемый документ А к Приложению

Расчет коэффициентов рассеяния между волнами с круговой поляризацией и волнами с линейной поляризацией

В настоящем Прилагаемом документе представлены расчеты коэффициентов двухпозиционного рассеяния между а) падающей волной с круговой поляризацией и рассеянной волной с линейной поляризацией (то есть γ_{qc} , где c – либо правая круговая поляризация, R , либо левая круговая поляризация, L , а q – либо вертикальная, v , либо горизонтальная, h , поляризация) и б) падающей волной с линейной поляризацией и рассеянной волной с круговой поляризацией (то есть γ_{cq} , где q – либо вертикальная, v , либо горизонтальная, h , поляризация, а c – либо правая круговая поляризация, R , либо левая круговая поляризация, L).

А.1 Падающая мощность с круговой поляризацией (СР) в рассеянную мощность с линейной поляризацией

В этом случае когерентные компоненты коэффициента двухпозиционного рассеяния $\gamma_{pc}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$, обусловленного поверхностью моря, возможно получить с помощью уравнения (11), заменив $r_{pp}(\theta_i)$ на $r_{pc}(\theta_i)$, с:

$$r_{vR}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} r_{vv}(\theta_i) \quad (\text{a.1})$$

$$r_{hR}(\theta_i) = \frac{-j}{\sqrt{2}} r_{hh}(\theta_i) \quad (\text{a.2})$$

$$r_{vL}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} r_{vv}(\theta_i) \quad (\text{a.3})$$

$$r_{hL}(\theta_i) = \frac{j}{\sqrt{2}} r_{hh}(\theta_i) \quad (\text{a.4})$$

$$\text{и } j = \sqrt{-1}$$

Коэффициент двухпозиционного рассеяния $\gamma_{pc}^{\ell}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$, обусловленного длинной гравитационной волной, возможно получить с помощью уравнения (32), заменив коэффициенты поляризации $U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ на коэффициенты поляризации $U_{pc}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$, с:

$$U_{vR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jU_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.5})$$

$$U_{hR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jU_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.6})$$

$$U_{vL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jU_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.7})$$

$$U_{hL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jU_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.8})$$

Коэффициент двухпозиционного рассеяния $\gamma_{pc}^{sh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$, обусловленного короткой капиллярной волной, возможно получить с помощью уравнения (72), заменив коэффициенты поляризации $G_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ в уравнении (70) на коэффициенты поляризации $G_{pc}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$, с:

$$G_{vR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jG_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.9})$$

$$G_{hR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jG_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.10})$$

$$G_{vL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jG_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.11})$$

$$G_{hL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jG_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.12})$$

A.2 Падающая мощность с линейной поляризацией в рассеянную мощность с круговой поляризацией

В этом случае когерентный коэффициент двухпозиционного рассеяния $\gamma_{cq}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$, обусловленного поверхностью моря, возможно получить с помощью уравнения (11), заменив $r_{pp}(\theta_i)$ на $r_{cq}(\theta_i)$, с:

$$r_{Rv}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} r_{vv}(\theta_i) \quad (\text{a.13})$$

$$r_{Lv}(\theta_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} r_{vv}(\theta_i) \quad (\text{a.14})$$

$$r_{Rh}(\theta_i) = \frac{j}{\sqrt{2}} r_{hh}(\theta_i) \quad (\text{a.15})$$

$$r_{Lh}(\theta_i) = \frac{-j}{\sqrt{2}} r_{hh}(\theta_i) \quad (\text{a.16})$$

Коэффициент двухпозиционного рассеяния $\gamma_{cq}^{\ell}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$, обусловленного длинной гравитационной волной, возможно получить с помощью уравнения (32), заменив $U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ на $U_{cq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$, с:

$$U_{Rv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jU_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.17})$$

$$U_{Lv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jU_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.18})$$

$$U_{Rh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jU_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.19})$$

$$U_{Lh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jU_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.20})$$

Коэффициент двухпозиционного рассеяния $\gamma_{cq}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$, обусловленного короткой капиллярной волной, возможно получить с помощью уравнения (72), заменив $G_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ в уравнении (70) на $G_{cq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$, с:

$$G_{Rv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jG_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.21})$$

$$G_{Lv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jG_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.22})$$

$$G_{Rh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + jG_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.23})$$

$$G_{Lh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - jG_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)\} \quad (\text{a.24})$$

Прилагаемый документ В к Приложению

Расчет коэффициентов рассеяния между волнами с круговой поляризацией

В настоящем Прилагаемом документе представлены расчеты коэффициентов двухпозиционного рассеяния между падающей волной с круговой поляризацией и рассеянной волной с круговой поляризацией (то есть γ_{PQ} , где P – либо правая круговая поляризация, R , либо левая круговая поляризация, L , и Q – либо правая круговая поляризация, R , либо левая круговая поляризация, L).

Когерентный коэффициент двухпозиционного рассеяния $\gamma_{cc}^c(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$, обусловленного поверхностью моря, возможно получить с помощью уравнения (11), заменив $r_{pp}(\theta_i)$ на $r_{PQ}(\theta_i)$, с:

$$r_{RR}(\theta_i) = \frac{1}{2} \{r_{vv}(\theta_i) + r_{hh}(\theta_i)\} \quad (\text{b.1})$$

$$r_{RL}(\theta_i) = \frac{1}{2} \{r_{vv}(\theta_i) - r_{hh}(\theta_i)\} \quad (\text{b.2})$$

$$r_{LR}(\theta_i) = \frac{1}{2} \{r_{vv}(\theta_i) - r_{hh}(\theta_i)\} \quad (\text{b.3})$$

$$r_{LL}(\theta_i) = \frac{1}{2} \{r_{vv}(\theta_i) + r_{hh}(\theta_i)\} \quad (\text{b.4})$$

Коэффициент двухпозиционного рассеяния $\gamma_{PQ}^l(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$, обусловленного длинной гравитационной волной, возможно получить с помощью уравнения (32), заменив $U_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ на $U_{cc}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$, с:

$$U_{RR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + j(U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i))\} \quad (\text{b.5})$$

$$U_{RL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + j(U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i))\} \quad (\text{b.6})$$

$$U_{LR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - j(U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i))\} \quad (\text{b.7})$$

$$U_{LL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \{U_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + U_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - j(U_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - U_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i))\} \quad (\text{b.8})$$

Коэффициент двухпозиционного рассеяния $\gamma_{PQ}^s(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$, обусловленного короткой капиллярной волной, возможно получить с помощью уравнения (72), заменив $G_{pq}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$ в уравнении (70) на $G_{cc}(\hat{k}_s, \hat{k}_i)$, с:

$$G_{RR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \left\{ G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + G_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + j \left(G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \right) \right\} \quad (\text{b.9})$$

$$G_{RL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \left\{ G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - G_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + j \left(G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \right) \right\} \quad (\text{b.10})$$

$$G_{LR}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \left\{ G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - G_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - j \left(G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \right) \right\} \quad (\text{b.11})$$

$$G_{LL}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) = \frac{1}{2} \left\{ G_{vv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) + G_{hh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - j \left(G_{hv}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) - G_{vh}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \right) \right\} \quad (\text{b.12})$$

Прилагаемый документ С к Приложению

Простые аппроксимации

Для углов падения θ_i и углов рассеяния θ_s менее 60 градусов, а также для азимутальных углов рассеяния φ_s в пределах ± 5 градусов относительно плоскости рассеяния в прямом направлении ($\varphi_s = \varphi_i = 0^\circ$) кросс-поляризационными членами в уравнениях (а.5)–(а.24) возможно пренебречь, что приводит к упрощениям, описанным ниже. При этом погрешность составляет менее 5%. В пределах плоскости рассеяния в прямом направлении ($\varphi_s = \varphi_i = 0^\circ$) для указанных выше углов падения и углов рассеяния ошибка пренебрежимо мала.

Падающая мощность с правой круговой поляризацией и рассеянная мощность с вертикальной поляризацией	$\gamma_{vR} = \frac{1}{2} \gamma_{vv}$
Падающая мощность с правой круговой поляризацией и рассеянная мощность с горизонтальной поляризацией	$\gamma_{hR} = \frac{1}{2} \gamma_{hh}$
Падающая мощность с левой круговой поляризацией и рассеянная мощность с вертикальной поляризацией	$\gamma_{vL} = \frac{1}{2} \gamma_{vv}$
Падающая мощность с левой круговой поляризацией и рассеянная мощность с горизонтальной поляризацией	$\gamma_{hL} = \frac{1}{2} \gamma_{hh}$
Падающая мощность с вертикальной поляризацией и рассеянная мощность с правой круговой поляризацией	$\gamma_{Rv} = \frac{1}{2} \gamma_{vv}$
Падающая мощность с горизонтальной поляризацией и рассеянная мощность с правой круговой поляризацией	$\gamma_{Rh} = \frac{1}{2} \gamma_{hh}$
Падающая мощность с вертикальной поляризацией и рассеянная мощность с левой круговой поляризацией	$\gamma_{Lv} = \frac{1}{2} \gamma_{vv}$
Падающая мощность с горизонтальной поляризацией и рассеянная мощность с левой круговой поляризацией	$\gamma_{Lh} = \frac{1}{2} \gamma_{hh}$

Прилагаемый документ D к Приложению

Модель спектра значений высоты поверхности моря

Спектр значений высоты поверхности моря подразделяется на два спектра: спектр крупномасштабной градации (гравитационная волна) и спектр мелкомасштабной градации (капиллярная волна), которые обозначаются символами $W_l(\kappa, \psi)$ и $W_s(\kappa, \psi)$, соответственно. Спектр крупномасштабной градации упоминается для справки, но прямая необходимость в нем отсутствует. Спектр мелкомасштабной градации связан со спектром поверхности моря, $W(\kappa, \psi)$, следующим образом:

$$W_s(\kappa, \psi) = \begin{cases} 0, & \text{если } \kappa < \kappa_d \\ W(\kappa, \psi) & \text{в других случаях} \end{cases}, \quad (\text{d.1})$$

где κ_d – волновое число высоты отсечения двух градаций, а (κ, ψ) – полярные координаты волновых чисел высоты во встречном и поперечном направлениях, связанные с прямоугольными координатами наклонов поверхности (S_u, S_c) . Спектр направленности $W(\kappa, \psi)$ определяется следующим образом:

$$W(\kappa, \psi) = \kappa^{-1} S(\kappa) \varphi(\kappa, \psi), \quad (\text{d.2})$$

где $S(\kappa)$ – функция изотропного (всенаправленного) спектра, а $\varphi(\kappa, \psi)$ – функция углового расхождения. Изотропный спектр, $S(\kappa)$, определяется выражением:

$$S(\kappa) = \left(\frac{B_l + B_h}{\kappa^3} \right) G^\gamma \exp \left\{ -1,25 \left(\frac{\kappa_p}{\kappa} \right)^2 \right\} \quad (\text{d.3})$$

B_l – волновой спектр длинных гравитационных волн:

$$B_l = 0,003 \Omega^{0,5} \frac{U_{10}}{\Omega c(\kappa)} \exp \left\{ \frac{-\Omega}{\sqrt{10}} (\sqrt{\kappa/\kappa_p} - 1) \right\} \quad (\text{d.4})$$

$$G = \begin{cases} 1,7; & \text{если } \Omega < 1 \\ 1,7 + 6,0 \log_e(\Omega), & \text{если } 1 \leq \Omega < 5 \\ 2,7 \Omega^{0,57}, & \text{если } \Omega \geq 5 \end{cases} \quad (\text{d.5})$$

$$\gamma = \exp \left\{ -(\sqrt{\kappa/\kappa_p} - 1)^2 / 2 \xi^2 \right\} \quad (\text{d.6})$$

$$\xi = \begin{cases} 0,08(1 + 4\Omega^{-3}), & \text{если } \Omega < 5 \\ 0,16; & \text{если } \Omega \geq 5 \end{cases} \quad (\text{d.7})$$

$$C(\kappa) = \sqrt{g \{1 + (\kappa/\kappa_m)^2\}} / \kappa \quad (\text{d.8})$$

$$\kappa_p = g \left\{ \frac{\Omega}{U_{10}} \right\}^2, \quad g = 9,81, \quad \kappa_m = 364,52 \quad (\text{d.9})$$

B_h – волновой спектр коротких капиллярных волн:

$$B_h = 0,5 \alpha_m \left(\frac{0,232}{c(\kappa)} \right) \exp \left\{ -0,25 \left(\frac{\kappa}{\kappa_m} - 1 \right)^2 \right\} \quad (\text{d.10})$$

$$\alpha_m = 0,014(u/0,232) \quad (\text{d.11})$$

$$u = U_{10} \sqrt{0,001(0,81 + 0,065 U_{10})} \quad (\text{d.12})$$

Ω – возраст обратной волны. Предполагаются следующие состояния моря:

- полностью взволнованное море, когда значения Ω близки к 0,84;
- умеренно взволнованное море, когда значения Ω близки к 1;
- слабо взволнованное море, когда значения $\Omega > 2$.

U_{10} – скорость ветра (обычно от 3 м/с до 33 м/с) на высоте 10 м над поверхностью моря, u – скорость трения (то есть скорость ветра на поверхности моря). В уравнении (d.3) γ – поверхностное натяжение воды, в уравнении (d.5) g – ускорение воды под действием силы тяжести в м/с².

Функция углового расхождения $\varphi(\kappa, \psi)$ в уравнении (d.2) показывает азимутальную зависимость спектра направленности $W(\kappa, \psi)$ и определяется следующим выражением:

$$\varphi(\kappa, \psi) = \frac{1}{2\pi} \{1 + \Delta(\kappa) \cos(2\psi)\}, \quad (\text{d.13})$$

где ψ соответствует встречному направлению, а $\Delta(\kappa)$ – амплитуда угловой зависимости:

$$\Delta(\kappa) = \tanh \left\{ \frac{\log_e(2)}{4} + 4 \left(\frac{\Omega C(\kappa)}{U_{10}} \right)^{2,5} + \frac{0,13u}{0,232} \left(\frac{0,232}{C(\kappa)} \right)^{2,5} \right\} \quad (\text{d.14})$$

Отметим, что $C(\kappa)$ в уравнении (d.4) стремится к ∞ , когда κ стремится к нулю. Однако, когда κ стремится к нулю, $S(\kappa)$ также стремится к нулю. В результате, когда $\kappa = 0$, следует установить $S(\kappa) = 0$ без дальнейших вычислений.

Прилагаемый документ Е к Приложению

Мощность помех, создаваемых в приемнике отраженным от поверхности моря сигналом

Е.1 Введение

Мощность двухпозиционного рассеяния P_{rp} поверхностью моря, поступающая на приемную антенну с линейной поляризацией p , представляет собой сумму двух компонентов – когерентного компонента P_{cr} и диффузного (некогерентного) компонента P_{dr} .

$$P_{rp} = P_{cr} + P_{dr} \quad (\text{e.1})$$

В нижеследующих разделах представлены расчеты принимаемой мощности для: а) общего случая и б) аппроксимаций для конкретного случая передатчика на геостационарной орбите (ГСО) и приемника на низкой околоземной орбите (LEO).

Е.2 Принимаемая когерентная мощность

В случае идентичных для передачи (падающая мощность) и приема (рассеянная мощность) линейных поляризаций, p , принимаемая когерентная мощность, P_{cr} (Вт), определяется следующим образом:

$$P_{cr} = \frac{P_{tp} G_{tp} L_{tp}}{4\pi(R_t + R_r)^2} \frac{\lambda^2 G_{rp} L_{rp} L_d}{4\pi} \gamma_{pp}^c \quad (\text{Вт}), \quad (\text{e.2})$$

где:

- P_{tp} : передаваемая мощность с поляризацией p (Вт);
- G_{tp} : усиление передающей антенны в направлении точки отражения от поверхности Земли (линейная);
- R_t : расстояние между передатчиком и точкой зеркального отражения на поверхности Земли (м);
- R_r : расстояние между точкой зеркального отражения на поверхности Земли и приемной антенны (м);
- G_{rp} : усиление приемной антенны в направлении точки зеркального отражения на поверхности Земли (линейная);

- L_{tp} : атмосферные потери (например, затухание в атмосферных газах) на трассе от источника помех до точки зеркального отражения. Затухание в атмосферных газах, A_{gas} (дБ), возможно рассчитать, используя Приложение 1 или Приложение 2 к Рекомендации МСЭ-R P.676-12, и в этом случае $L_{tp} = 10^{-A_{gas}/10}$;
- L_{rp} : атмосферные потери (например, затухание в атмосферных газах) на трассе от точки зеркального отражения до приемной антенны. Затухание в атмосферных газах, A_{gas} (дБ), возможно рассчитать, используя Приложение 1 или Приложение 2 к Рекомендации МСЭ-R P.676-12, и в этом случае $L_{rp} = 10^{-A_{gas}/10}$;
- λ : длина волны (м);
- L_d : потери на расхождение вследствие кривизны поверхности Земли, которые определяются следующим образом:

$$L_d = \frac{1}{\left[\left(1 + \frac{2R_e}{a \cos \theta} \right) \left(1 + \frac{2R_e \cos \theta}{a} \right) \right]}, \quad (e.3)$$

где:

- a : средний радиус Земли (6 371 000 м);
- R_e : эффективная дальность $R_e = \frac{R_t R_r}{R_t + R_r}$ (м);
- θ : зенитный угол падения.

Е.2.1 Передатчик на ГСО и приемник на LEO: когерентный компонент

Для компонента зеркального отражения $R_t + R_r$ – это общее расстояние, а $4\pi(R_t + R_r)^2$ – потери на расхождение. $P_{tp}G_{tp}$ – эквивалентная изотропно-излучаемая мощность (э.и.и.м.). Для передатчика на ГСО и приемника на LEO аппроксимация $R_t + R_r \cong R_t$ вносит в когерентный член погрешность в несколько процентов. В этом случае уравнение (e.2) принимает вид:

$$P_{cp} = \frac{P_{tp}G_{tp}L_{tp}}{(4\pi R_t)^2} \lambda^2 G_{rp}L_{rp}L_d \gamma_{pp}^c \quad (\text{Вт}). \quad (e.4)$$

γ_{pp}^c – когерентный компонент коэффициента двухпозиционного рассеяния, определенный уравнением (11) для падающей волны с линейной поляризацией и рассеянной волны с линейной поляризацией. Для других комбинаций поляризации падающей и рассеянной волн возможно использовать соответствующие преобразования поляризации, описанные в Прилагаемых документах А, В и С.

Е.3 Принимаемая диффузная мощность

Принимаемая диффузная мощность, P_{dp} (Вт) может быть рассчитана с использованием традиционного уравнения бистатического радара (например, уравнение (73) в Рекомендации МСЭ-R P.452-16). Мощность диффузного рассеяния, принимаемая антенной с поляризацией p и поляризацией передачи q определяется следующим образом:

$$P_{dp} = P_{tq} \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \iint \frac{G_{rp}(\hat{k}_i)G_{tq}(\hat{k}_s)}{r_t^2 r_s^2} L_{tq}(\hat{k}_i) \gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_s, \hat{k}_i) \cos \theta_s L_{rp}(\hat{k}_s) dA \quad (\text{Вт}), \quad (e.5)$$

где:

- P_{tq} : мощность передачи с поляризацией q (Вт);
- \hat{k}_i : направление падения в дифференциальной зоне рассеяния;
- \hat{k}_s : направление рассеяния в дифференциальной зоне рассеяния;
- $G_{rp}(\hat{k}_i)$: усиление передающей антенны в направлении падения \hat{k}_i (линейная поляризация);
- $G_{tq}(\hat{k}_s)$: усиление приемной антенны в направлении приема \hat{k}_s (линейная поляризация);
- dA : дифференциальная зона рассеяния на поверхности (м²);

- r_t : расстояние между передатчиком и дифференциальной зоной рассеяния на поверхности Земли (м);
- r_r : расстояние между дифференциальной зоной рассеяния на поверхности Земли и приемником (м).

Е.3.1 Передатчик на ГСО и приемник на LEO: диффузный компонент

В следующей аппроксимации предполагается, что усиление передающей антенны является постоянной величиной в пределах зоны обслуживания приемной антенны (разумное допущение для передатчика на ГСО с антенной со средним усилением и приемника на LEO с антенной с высоким усилением), а расстояния от передающей антенны до поверхности Земли и от поверхности Земли до приемной антенны существенно не различаются в пределах зоны обслуживания приемной антенны. Тогда уравнение (е.5) можно аппроксимировать следующим образом:

$$P_{dp} \cong \frac{P_{tq} G_{tq} \lambda^2 L_{tq}(\hat{k}_i) L_{rp}(\hat{k}_s)}{(4\pi R_t)^2} \gamma_{pq}^{dif}(\hat{k}_{s0}, \hat{k}_{i0}), \quad (\text{е.6})$$

где:

- \hat{k}_{i0} : направление падения в дифференциальной зоне рассеяния вдоль главного луча передающей антенны;
- \hat{k}_{s0} : направление рассеяния в дифференциальной зоне рассеяния вдоль главного луча приемной антенны;
- R_t : расстояние между передатчиком и центром находящейся на поверхности Земли зоны обслуживания, которую облучает передающая антенна (м).

Преобразования поляризации, описанные в Прилагаемых документах А, В и С, возможно использовать для расчета $\gamma_{pq}^{dif}(\vec{r}_{t0}, \vec{r}_{r0})$ применительно к поляризациям падающей и рассеянной волн, отличным от линейная-линейная и круговая-круговая.