

Центральный научно-исследовательский
институт автоматики и гидравлики



В.А. Павельев, Д.В. ХАМИНОВ

**Рассеяние
электромагнитных волн
миллиметрового диапазона
природными
и антропогенными
объектами**

Под общей редакцией
д-ра техн. наук В.Л. Солунина



Москва 2009

УДК 621.537
ББК 32.842
П12

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. Н.А. Бей;
д-р техн. наук Э.П. Спирин

Павельев В. А.

П12 **Рассеяние электромагнитных волн миллиметрового диапазона природными и антропогенными объектами / В. А. Павельев, Д. В. Хаминов ; под ред. д-ра техн. наук В. Л. Солунина. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 277, [3] с. : ил.**

ISBN 978-5-7038-3232-5

В книге собраны и систематизированы материалы отечественной и зарубежной литературы по исследованию отражающих характеристик широкого класса земных подстилающих поверхностей (ПП) природного (естественного) и антропогенного происхождения, а также объектов местности в 8-мм диапазоне электромагнитных волн (ЭМВ). Приведены данные о средних значениях удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) для основных элементов ландшафта во всем диапазоне зенитных углов, зависимости изменения УЭПР от физических характеристик ПП, дана методика априорного определения УЭПР по таким информационным материалам, как топографические карты, фотоснимки, климатические и погодные сводки. Рассмотрены вопросы по определению эффективной площади рассеяния (ЭПР) для ряда антропогенных объектов, находящихся на земной поверхности.

Приведенные эмпирические модели можно использовать для прогнозирования поведения УЭПР и ЭПР при изменении параметров поверхностей под влиянием сезонных и погодных условий.

Для специалистов, занимающихся вопросами мониторинга земной поверхности, проектированием радиотехнических систем навигации и наведения в миллиметровом диапазоне.

УДК 621.537
ББК 32.842

© Павельев В.А., Хаминов Д.В., 2009
© Оформление. Издательство МГТУ
им. Н.Э. Баумана, 2009

ISBN 978-5-7038-3232-5

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	7
Список основных условных обозначений.....	10
Список основных сокращений	12
1. Специфика рассеяния электромагнитных волн 8-мм диапазона природными и антропогенными элементами ландшафта	13
1.1. Особенности взаимодействия ЭМВ 8-мм диапазона с элементами ландшафта	13
1.2. Классификация элементов ПП	19
1.3. Требования к базе данных по УЭПР и ЭПР.....	22
2. Фоновые подстилающие поверхности	25
2.1. Основные характеристики ПП	25
2.2. Информационные материалы о местности	29
2.3. Теоретические модели представления УЭПР ПП	32
3. Опорные поверхности – основа представления удельных эффективных площадей рассеяния подстилающих поверхностей	38
4. Отражающие свойства опорных подстилающих поверхностей	42
4.1. Антропогенные ПП	42
4.2. Почвы	53
4.3. Гидрогенные поверхности: вода, лед, снег	64
4.4. Растительные покровы	94
4.5. Аналитическое представление УЭПР ПП	124
4.6. Оценка точности представления УЭПР ПП.....	130
4.7. Флуктуации сигналов от разных типов ПП.....	132
5. Сезонные и погодные вариации удельной эффективной площади рассеяния	135

5.1. Сезонные изменения элементов ландшафта для средней полосы	135
5.2. Влияние снежного покрова на УЭПР	136
5.3. Кратковременные вариации УЭПР	143
6. Контрастные характеристики удельной эффективной площади рассеяния подстилающих поверхностей	150
6.1. Способы представления контрастных характеристик УЭПР	150
6.2. Сезонные изменения контрастов	158
7. Отражающие свойства антропогенных объектов	162
7.1. Определение и классификация АО	162
7.2. Элементы АО, определяющие их ЭПР	163
7.3. Формирование данных по ЭПР АО на основе натуральных, теоретических и модельных экспериментов	165
7.4. Параметры представления ЭПР АО	172
8. Эффективная площадь рассеяния основных типовых антропогенных объектов	176
8.1. Автомобили	177
8.2. Железнодорожный подвижной состав	181
8.3. Воздушный транспорт	183
8.4. Водный транспорт	194
8.5. Другие локальные объекты	198
8.6. Линейные протяженные объекты	204
8.7. Объекты с вертикальной ориентацией	211
8.8. Площадные объекты	214
8.9. Сводные таблицы ЭПР и УЭПР АО	218
9. Анализ контрастов антропогенных объектов на фоне различных подстилающих поверхностей	225
Заключение	230
Литература	234
Приложения	240
П1. ЭПР простых тел	240
П2. УЭПР для ЭМВ диапазона 0,3...3,2 см	253
П3. Шероховатые уголкового отражатели	260

ПРЕДИСЛОВИЕ

В работе представлены отражающие свойства подстилающих (фоновых) поверхностей (ПП) и ряда объектов местности антропогенного происхождения применительно к 8-мм диапазону электромагнитных волн (ЭМВ) для однопозиционных радиолокационных станций, реализованные в виде каталогов удельных эффективных площадей рассеяния (УЭПР) и эффективных площадей рассеяния (ЭПР). Актуальность появления этих материалов диктуется развивающимися в последнее время такими концептуальными областями знаний, как дистанционное зондирование (ДЗ) земной поверхности с летательных аппаратов (ЛА) и математическое моделирование в решении широкого спектра научных и прикладных задач, информационными параметрами которых являются характеристики рассеяния миллиметровых волн различными подстилающими поверхностями. Из них наиболее важными можно считать:

1) дистанционный многопрофильный мониторинг, обеспечивающий контроль состояния сельскохозяйственных угодий, лесов, коммуникаций, последствий природных и антропогенных катаклизмов и многое другое;

2) обеспечение задач навигации ЛА и судов по информативным элементам местности;

3) расчет и обоснование энергетических и информационных параметров радиолокаторов (РЛ) земного обзора и систем связи в этом диапазоне радиоволн.

Реализация задач математического и полунатурного моделирования с использованием параметров земной поверхности и объектов на ней, позволяющая существенно сократить затраты на исследования и разработку различных комплексов, также требует знания отражающих характеристик мест-

ности. Однако, как показывает анализ, приводимые в литературе данные по отражающим характеристикам различных ПП и объектов часто весьма противоречивы и не позволяют использовать их для расчетов контрастов радиояркостного изображения местности и определения параметров РЛ.

Наличие значительных расхождений в приводимых данных обусловлено большим разнообразием условий, в которых проводились измерения отражающих характеристик того или иного объекта или поверхности (погода, влажность, структура, угол, под которым проводилось облучение, и многое другое). В большинстве своем эти условия вообще не указывались в описаниях экспериментальных результатов.

Кроме того, большое разнообразие и сложность структуры земной поверхности, наличие растительного покрова не позволяют получать точные решения поставленных задач расчетными методами электродинамики, в связи с чем приходится использовать экспериментальные данные, в ряде случаев аппроксимируя их из других диапазонов ЭМВ. Обширная литература по определению УЭПР и ЭПР (см., например [7, 21, 23, 36, 45, 50, 54, 65, 66]) в большинстве случаев не позволяет пользователю провести априорную оценку средних значений УЭПР для конкретного участка местности с заданным набором объектов ландшафта и определить с требуемой точностью радиоконтрасты объектов на местности.

В настоящей книге сделана попытка свести воедино весь имеющийся у авторов материал как по УЭПР элементов местности, так и ЭПР отдельных объектов антропогенного происхождения и их радиоконтрастам в широком диапазоне углов зондирования и вида поляризации. Наличие такого материала позволит с большой достоверностью давать оценку информативности местности и контрастности находящихся на ней объектов с учетом погодных и сезонных условий.

Материал книги разделен на два больших подраздела, что связано со спецификой отражающих объектов.

В гл. 2–6 приведены данные о средних значениях УЭПР ПП для основных элементов ландшафта во всем диапазоне зенитных углов, полученные из литературных и экспериментальных источников, и зависимости изменения УЭПР от фи-

зических характеристик ИП. Дана методика априорного определения УЭПР при наличии таких информационных материалов, как топографические карты, фотоснимки, климатические и почвенные каталоги, а также метеорологические данные.

В гл. 7–9 приведены значения ЭПР типовых объектов местности антропогенного происхождения для различных углов облучения, полученные на основе использования натуральных и модельных исследований и теоретических зависимостей с учетом конструктивных характеристик этих объектов.

Данные экспериментов и эмпирические закономерности позволили откорректировать параметры многочисленных теоретических расчетов по отражающим свойствам тех или иных объектов.

В приложении П1 приведены формулы для расчета ЭПР простых тел, в приложении П2 кратко рассмотрены отличия УЭПР для диапазонов 3,2, 2,0, и 0,3 см относительно диапазона 0,86 см. В приложении П3 приведена методика расчета УЭПР шероховатых угловых отражателей (ШУО), из которых состоит большое число антропогенных объектов.

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам – доктору технических наук, профессору Н.А. Бею и доктору технических наук Э.П. Спирину за творческое обсуждение содержания книги и сделанные ценные замечания, а также благодарят В.В. Бурова, Н.К. Михайлова и Е.Г. Щукину за помощь в оформлении материалов книги.

СПИСОК ОСНОВНЫХ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

D – расстояние до объекта

ϑ – угол, отсчитываемый от вертикали (угол зондирования, зенитный угол)

ψ – угол, отсчитываемый от горизонтальной плоскости (угол скольжения, угол места)

φ – азимутальный угол

φ_{\perp} – угол в азимутальном направлении между максимумом отражения и направлением зондирования

$S_p = l_r l_{\varphi}$ – площадь элемента разрешения радиолокатора

l_r – размер элемента разрешения в радиальном направлении

l_{φ} – размер элемента разрешения в азимутальном направлении

L – длина антропогенного объекта

B – ширина антропогенного объекта

H – высота антропогенного объекта и неровностей у подстилающей поверхности

h – СКО неровностей подстилающей поверхности

σ – эффективная площадь рассеяния

σ^0 – удельная эффективная площадь рассеяния

$I_{\text{изл}}$ – интенсивность излученной волны

$I_{\text{отр}}$ – интенсивность отраженной волны

$|K_0|^2$ – энергетический коэффициент отражения при нормальном падении электромагнитной волны

f – частота электромагнитной волны

λ – длина электромагнитной волны

Λ – пространственная длина волны различных подстилающих поверхностей с периодической структурой

G – величина волнения моря в баллах, коэффициент усиления антенны

σ_h – мелкомасштабные средние квадратичные отклонения поверхности от средней линии

σ_{hk} – крупномасштабные средние квадратичные отклонения поверхности от средней линии

l_{xy} – мелкомасштабный радиус пространственной корреляции

l_{xyk} – крупномасштабный радиус пространственной корреляции

$\operatorname{tg} \beta$ – тангенс средних квадратичных отклонений углов наклона поверхности

$R(l_{xy})$ – автокорреляционная функция неоднородностей поверхности

ρ – плотность вещества

m – удельная масса единицы поверхности (объема)

ε – комплексная диэлектрическая проницаемость, $\varepsilon = \varepsilon_1 + j\varepsilon_2$

ε_1 – действительная часть ДП, определяющая отраженный сигнал

ε_2 – мнимая часть ДП, связанная с потерями электромагнитного излучения в данном материале

$\operatorname{tg} \delta = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$ – тангенс угла потерь

w – влажность, водность

w_v – влажность объемная

w_{va} – влажность абсорбционная

ξ – коэффициент затухания (поглощения, ослабления) в среде

СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- АО – антропогенный объект
ВПП – взлетно-посадочная полоса
ДНА – диаграмма направленности антенны
ДОР – диаграмма обратного рассеяния
ДП – диэлектрическая проницаемость
ж.-д. – железнодорожный
КО – контрастный объект
ЛА – летательный аппарат
ПП – подстилающая поверхность
РЛ – радиолокатор
РЛС – радиолокационная станция
СКО – среднее квадратичное отклонение
СХК – сельскохозяйственные культуры
УО – уголкового отражатели
УЭПР – удельная эффективная площадь рассеяния
ШУО – шероховатые уголкового отражатели
ЭМВ – электромагнитные волны
ЭПР – эффективная площадь рассеяния
ЭР – элемент разрешения

1. СПЕЦИФИКА РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН 8-мм ДИАПАЗОНА ПРИРОДНЫМИ И АНТРОПОГЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ЛАНДШАФТА

1.1. ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭМВ 8-мм ДИАПАЗОНА С ЭЛЕМЕНТАМИ ЛАНДШАФТА

Целый ряд задач народнохозяйственного, научного и оборонного значения требует знания отражающих характеристик различных объектов и фоновых подстилающих поверхностей (ПП) в различных диапазонах электромагнитных волн (ЭМВ). Из всего спектра ЭМВ в настоящее время все большее значение приобретает диапазон миллиметровых волн и, в частности, диапазон 8-мм волн, который обеспечивает:

- большую дальность действия (до 10 км) в различных метеорологических условиях;
- хорошее разрешение на местности при малых габаритах антенных устройств;
- большой динамический диапазон значений удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР) и радиоконтрастов как ландшафтных образований, так и объектов антропогенного происхождения, расположенных на местности.

Специфика взаимодействия ЭМВ 8-мм диапазона с природными и антропогенными элементами ландшафта заключается в следующем.

1. Как известно [50], величина сигнала, отраженного от раздела двух сред, одна из которых – воздух, определяется формулами Френеля:

2. ФОНОВЫЕ ПОДСТИЛАЮЩИЕ ПОВЕРХНОСТИ

2.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПП

Фоновыми ПП будем называть статистически однородные площадные образования на поверхности земли как естественного, так и антропогенного происхождения. Площадь ПП должна быть значительно больше, чем площадь элемента разрешения S_p РЛ и локальных АО, располагающихся на них.

Характеристики отражения ПП как площадных образований описываются УЭПР, $\frac{M^2}{M^2}$,

$$\sigma^0 = 4\pi D^2 \frac{I_{\text{отр}}}{I_{\text{изл}} S_p},$$

где D – расстояние от РЛ до объекта; $I_{\text{изл}}$ – интенсивность излученной (падающей) волны на единичном расстоянии от излучателя; $I_{\text{отр}}$ – интенсивность отраженной волны под данным ракурсом обзора на единичном расстоянии от объекта; S_p – площадь ЭР радиолокатора на местности.

В свою очередь, интенсивность отраженного сигнала может быть представлена в следующем виде:

$$I_{\text{отр}} = I_{\text{отр. осн}} + I_{\text{отр. к-п}},$$

где $I_{\text{отр. осн}}$ – основная поляризационная составляющая, при которой прием и излучение осуществляются на одном и том же виде линейной поляризации: вертикальной (ВВ) или го-

3. ОПОРНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ – ОСНОВА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ ЭФФЕКТИВНЫХ ПЛОЩАДЕЙ РАССЕЯНИЯ ПОДСТИЛАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Все материалы по УЭПР ПП (гл. 4–6) представлены в такой последовательности. Сначала задаются основные опорные поверхности. Для каждой опорной ПП рассмотрены первичные материалы по УЭПР и даются ее усредненные значения. По имеющимся эмпирическим зависимостям определяются методика пересчета УЭПР применительно к особенностям данной ПП и необходимые априорные сведения для пересчета. Далее рассматриваются контрастные характеристики УЭПР между основными опорными поверхностями для усредненных значений УЭПР. Отдельно приводятся данные по кратковременным вариациям УЭПР для различных погодных факторов, что при наличии необходимой метеорологической информации позволяет их учесть. Все значения УЭПР представлены в виде зависимости σ^0 от ϑ для обоих видов поляризации: вертикальной и горизонтальной (ВВ и ГГ), а при наличии исходных материалов приводятся данные по кросс-поляризации.

Широкое использование методов моделирования на ЭВМ требует представления материалов по УЭПР в удобной аналитической форме. Поэтому основные материалы по УЭПР опорных ПП даны в виде коэффициентов аналитического выражения $\sigma^0(\vartheta)$, которое является общим для всех ПП и отличается лишь значением коэффициентов (см. разд. 4.5).

Для определения УЭПР той или иной ПП необходимо как можно точнее задать характеристики самой поверхности. Однако громадное количество различного рода ПП не позволяет сделать это. Поэтому представляется правильным ограничиться конечным набором опорных поверхностей, характеристики которых известны более или менее точно, а другие поверхно-

4. ОТРАЖАЮЩИЕ СВОЙСТВА ОПОРНЫХ ПОДСТИЛАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

4.1. АНТРОПОГЕННЫЕ ПП

Бетон

Бетон представляет собой однородную массу, состоящую из цемента, песка и наполнителя в виде гравия или гальки, с достаточно стабильными параметрами, и поэтому УЭПР бетона также стабильна, что позволяет в ряде случаев использовать ее для внешней калибровки аппаратуры РЛ.

Физические характеристики бетона [3, 31] имеют следующие значения:

- тяжелый бетон, применяющийся при строительстве дорог, имеет плотность $\rho = 1,8...2,5 \text{ г/см}^3$;
- легкий бетон, применяющийся для облицовки стен, имеет плотность $\rho = 0,5...1,8 \text{ г/см}^3$.

Составляющие ε_1 и ε_2 ДП бетона для разных длин волн приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Значения ДП ε_1 и ε_2 бетона для разных длин волн

$\lambda = 3 \text{ см}$		$\lambda = 0,86 \text{ см}$		$\lambda = 0,22 \text{ см}$	
ε_1	ε_2	ε_1	ε_2	ε_1	ε_2
6,5	1,5	5,5	0,5	5,5	0,36

Геометрические параметры среднего бетона приведены ниже:

$\sigma_h \approx (1,5...1,6) \cdot 10^{-2} \text{ см}$ – СКО для мелкомасштабных неровностей;

5. СЕЗОННЫЕ И ПОГОДНЫЕ ВАРИАЦИИ УДЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ

5.1. СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЛАНДШАФТА ДЛЯ СРЕДНЕЙ ПОЛОСЫ

Ландшафт – природный территориальный комплекс, имеющий свои индивидуальные особенности. В качестве элементов ландшафта будем рассматривать ПП, данные об УЭПР которых приведены в разд. 4.

Наблюдаются следующие временные изменения параметров отдельных элементов ландшафта, сказывающиеся на их отражательной способности:

- межгодичные;
- сезонные;
- внутрисезонные (погодные);
- суточные.

По характеру сезонных вариаций ПП можно объединить в следующие группы:

- 1) бетон, асфальт, гравий;
- 2) водные поверхности;
- 3) открытые почвы;
- 4) луга, СХК;
- 5) лесные массивы.

Рассмотрим изменения параметров ПП в течение годового цикла.

У таких ПП, как бетон, асфальт, гравий, мало меняются основные параметры в течение года, так как температурные вариации слабо отражаются на ДП этих поверхностей, а структура поверхности зависит не столько от времени года, сколько от условий эксплуатации. При интенсивной эксплуатации с течением времени поверхность разрушается, что делает отра-

6. КОНТРАСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УДЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ ПОДСТИЛАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

6.1. СПОСОБЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ КОНТРАСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЭПР

Как отмечалось выше, для обеспечения навигации летательных аппаратов, использующих в качестве информативного поля радиолокационные карты местности, важны не абсолютные значения УЭПР ПП, а разница между ними, т. е. их контраст, который и определяет наличие границ между различными поверхностями. От контраста, в конечном итоге, будет зависеть надежность навигации и точность определения координат летательного аппарата на местности.

Контрастные характеристики УЭПР, т. е. наличие разницы между значениями УЭПР различных ПП, зависят так же, как и сами УЭПР от длины ЭМВ λ , угла зондирования ϑ , вида поляризации, времени года (сезона), погодных условий, района наблюдения и др.

Определение контрастов УЭПР различных ПП целесообразно производить либо на основе усредненных данных по УЭПР, полученных по совокупности имеющихся данных, либо по материалам одного источника (автора), так как в этих случаях исключаются систематические ошибки.

Данные по контрастам УЭПР могут быть представлены в разных видах в зависимости от требований пользователя. Перечислим некоторые способы представления.

1. Сводные графики $\sigma_i^0(\vartheta)$ для данного сезона. Фиксируются тип ПП (i), λ , сезон, вид поляризации. Представлен-

7. ОТРАЖАЮЩИЕ СВОЙСТВА АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

7.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ АО

Отнесем к АО объекты искусственного (не природного) происхождения как стационарные, так и мобильные. Как правило, материалами этих объектов являются металл, бетон, камень, пластмассы и др. Сюда же относятся насыпные объекты и объекты типа траншей, туннелей. Форма, размеры и материал АО варьируются в широких пределах. Существенным отличием АО от объектов природного происхождения является, как правило, их малая зависимость от погодных и сезонных условий (дождя, солнца, ветра). Это определяется значительной величиной ДП АО и практически постоянными характеристиками, влияющими на параметры отражения. Ввиду большого разнообразия основных характеристик у одноименных АО и параметров ПП, на которых они располагаются, классификация АО и оценка значений ЭПР и величин контрастов между АО и ПП должна проводиться с учетом целого ряда независимых признаков:

- по функциональному признаку;
- по геометрическим характеристикам, в том числе по отношению к размерам ЭР;
- по конструктивным особенностям;
- по материалу и структуре поверхности и т. д.

При известных геометрических размерах ЭР РЛ в основу классификации АО положен класс локальных объектов как объектов, размеры которых меньше размеров ЭР. Остальные АО можно отнести к классу распределенных вследствие то-

8. ЭФФЕКТИВНАЯ ПЛОЩАДЬ РАССЕЯНИЯ ОСНОВНЫХ ТИПОВЫХ АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

При рассмотрении имеющихся данных по ЭПР типовых АО и их основных элементов (при необходимости) приоритет будет отдаваться экспериментальным данным.*

Конструктивные параметры объекта и экспериментальные данные по его зондированию позволяют оценить среднюю ЭПР и ее вариации $\Delta\sigma$. Распределение элементарных отражателей на объекте позволяет оценить величину угловых флуктуаций $\Delta\phi$. Поскольку большинство измерений объектов производится с земной поверхности, то при описании уг-

* По мере необходимости в гл. 8 и 9 будут вводиться дополнительные материалы, заимствованные из теоретических и модельных исследований, а также ввиду недостаточности экспериментальных данных для 8-мм диапазона ЭМВ широко будут привлекаться данные, полученные на других частотах, и пересчитываемые на требуемые, а также использоваться модели в виде набора простых тел для оценки ЭПР некоторых АО.

Для большинства АО будет приводиться среднее значение ЭПР для конкретного ракурса зондирования $\sigma(\psi, \phi)$ и по возможности описание ожидаемой ДОР во всей полусфере ракурсов для наземных объектов.

В перечень рассматриваемых объектов будут входить АО местности, имеющие контраст с ПП. Данные об УЭПР ПП приведены в разд. 4.

Для сравнительно небольших локальных объектов при оценке ЭПР будем считать, что ЭР покрывает весь объект. Для больших объектов (типа стен строений, мостов, трубопроводов и т. п.) будем указывать удельную ЭПР на единицу площади или длины объекта соответственно.

9. АНАЛИЗ КОНТРАСТОВ АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НА ФОНЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОДСТИЛАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Для определения контрастных характеристик АО на земной поверхности необходим учет основных параметров РЛ, ракурса зондирования, рельефных характеристик местности и т. п. Без этих данных можно дать лишь общие соображения по контрастным характеристикам местности.

Характеристики ЭПР и УЭПР объектов местности даны в табл. 8.6–8.8. Там же приведены основные размеры объектов.

На рис. 9.1–9.3 представлены усредненные характеристики УЭПР основных ПП ландшафта в 8-мм диапазоне ЭМВ (см. разд. 4).

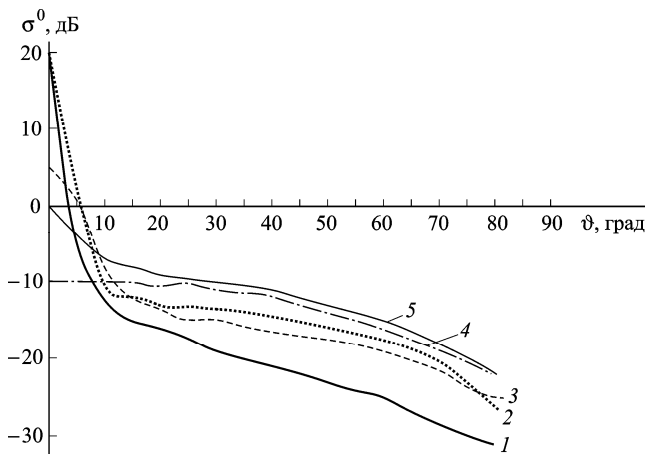


Рис. 9.1. Значения УЭПР основных элементов земной поверхности антропогенного и почвенного типов на $\lambda = 0,8$ см при ВВ-поляризации:

- 1 – бетон сухой; 2 – асфальт сухой; 3 – песок сухой; 4 – почва (пашня);
5 – гравий, шлак

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в книге материалы, охватывающие период публикаций и исследований начиная с 50-х годов прошлого столетия по настоящее время, свидетельствуют о постоянном интересе ученых, занимающихся исследованиями в области распространения ЭМВ, разработчиков бортовой радиолокационной аппаратуры, работников, специализирующихся в области дистанционного зондирования (ДЗ) поверхности земли, к проблеме рассеяния электромагнитных волн миллиметрового диапазона различными земными образованиями и объектами. Эти волны как составная часть электромагнитного спектра излучения используются при прогнозировании глобальных изменений окружающей среды, при оценке тенденций изменения состояния лесов, болот, пастбищ, сельскохозяйственных угодий, при определении параметров поверхностных волн акваторий и позволяют получать количественные оценки измеряемых параметров.

Значительное место волны этого диапазона занимают в системах навигации, обеспечивая безопасность полетов в сложных погодных условиях, используя в качестве навигационных ориентиров, как саму земную поверхность, так и объекты, находящиеся на ней.

В последнее время значительно увеличился поток исследований по влиянию геометрической структуры рассеивающих земных ландшафтов и структуры взволнованной водной поверхности и параметров волнения на свойства рассеяния ЭМВ. Продолжается процесс накопления информации о количественных параметрах рассеяния растительного покрова земной поверхности. Это позволяет более грамотно решать задачи оценки биологического состояния различных земных

образований, их влагосодержания и других характеристик по радиоконтрастам, а также помогает составлять более точные радиолокационные карты местности, что способствует повышению надежности ориентации летательных аппаратов в сложных погодных условиях, при плохой видимости или смене сезонов.

Современный объем проводимых работ по ДЗ земли для решения широкого спектра экономических задач или во всех областях хозяйственной деятельности обусловил необходимость внедрения в средства и методы ДЗ процесса автоматизации обработки получаемых данных на борту летательных аппаратов с помощью заранее подготовленных эталонов и использования методов математического моделирования и прогнозных расчетов.

Как показал анализ результатов опубликованных исследований, приводимые в них параметры отражающих характеристик различных ПП и объектов часто весьма противоречивы и не позволяют использовать их для расчетов контрастов радиояркогостного изображения местности, определения параметров радиолокатора, характеристик сельскохозяйственных культур и т. п. В целях придания одинакового подхода к описанию широкого круга разнообразных материалов в книге для всех объектов приведены основные физические и геометрические свойства поверхностей отражения. Такой подход позволил из огромной номенклатуры земных ландшафтов выделить класс так называемых опорных подстилающих поверхностей, для которых приводятся зависимости УЭПР от вида поляризации и угла зондирования. УЭПР остальных поверхностей могут быть определены по степени приближения их физических параметров к опорным.

Специфика геометрических и физических параметров АО проявилась в том, что классификация этих объектов проведена как по их размерам относительно ЭР радиолокатора, так и по характеру отражающих свойств элементов объекта. АО представлены по их функциональным признакам, что позволяет легко найти оценки их ЭПР.

Для АО даны именно оценки их ЭПР, что обусловлено большой неопределенностью точного состава сложного объекта и существенным изменением его ЭПР при небольших изменениях ракурса обзора. Однако наличие основных составляющих отраженных сигналов позволяет с помощью аналитического выражения определять ЭПР объектов и УЭПР ПП с реальной точностью. Многочисленные экспериментальные и модельные данные показали, что в большинстве случаев можно пренебрегать составляющей отражения, связанной с краевыми эффектами отражения, значение которой не превышает, как правило, нескольких процентов.

Все большее место в практике ДЗ занимают ландшафты, спецификой которых является наличие большого числа участков с вертикальными стенами, образующие с ПП так называемые шероховатые уголковые отражатели: города, поселки городского и сельского типов, промышленные строения. Для определения отражающей способности вертикальных строений разработана методика расчета шероховатых уголковых отражателей, что позволяет проводить оценку отражений от городских домов и других подобных объектов.

Таким образом, в монографии представлены все исходные данные, позволяющие проводить расчетные работы по широкому кругу задач, моделировать развитие различных природных процессов и обеспечивать формирование эталонной информации для последующей автоматизированной обработки данных, получаемых при ДЗ поверхности земли.

Учитывая интенсивное развитие строгих и приближенных методов анализа полей рассеянного излучения от тел разнообразной конфигурации и электрических параметров, собранный в данной книге материал позволяет перейти к более сложному описанию реальных рассеивающих элементов.

Наличие обширных экспериментальных и расчетных материалов по рассеивающим параметрам широкого класса объектов естественного и антропогенного происхождения и современным моделям рассеяния открывают возможность проводить имитационное моделирование перспективных па-

раметров вновь разрабатываемых радиолокаторов как широкого, так и конкретного применения, обеспечивая достижения в каждом случае оптимальных параметров.

Учитывая современные тенденции развития методов и средств ДЗ поверхности земли, авторы надеются на дальнейшее пополнение материалов данной книги.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ананьин Э.В.* Радиолокационная сигнатура наземного объекта при широкополосном зондировании // Труды юбилейной НТК, посвященные 30-летию образования ЦНИИРЭС. М., 2001. Т. 1. С. 163–167.
2. *Андреев Г.А.* Отражение и рассеяние миллиметровых волн земными покровами // Зарубежная радиоэлектроника. 1980. № 9. С. 3–32.
3. *Андреев Г.А., Потапов А.А.* Миллиметровые волны в радиолокации // Зарубежная радиоэлектроника. 1984. № 11. С. 28–62.
4. *Антифеев В.Н., Борзов А.Б., Быстров Р.П.* и др. Математические модели рассеяния ЭМВ на объектах сложной формы // Успехи современной радиоэлектроники. 1998. № 10. С. 39–54.
5. *Антифеев В.Н., Борзов А.Б., Павлов Г.Л.* Анализ радиолокационных характеристик танка Т80-БВ методом цифрового моделирования // Оборонная техника. 1997. № 9–10. С. 7–11.
6. *Арманд Н.А., Башаринов А.Е., Шутко А.М.* Исследование природной среды радиофизическими методами (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. Т. XX, № 6. 1977.
7. *Басс Ф.Г., Фукс И.М.* Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972.
8. *Богородский В.В., Канарейкин Д.Б., Козлов А.И.* Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. Л.: Гидрометеиздат, 1981. С. 204.
9. *Борзов А.Б., Быстров Р.П., Дмитриев В.Г.* и др. Радиолокационные системы: Научно-технические достижения и проблемы развития техники миллиметрового диапазона радиоволн // Успехи современной радиоэлектроники. 2001. № 5. С. 3–49.
10. *Борзов А.Б., Ноздрачев Д.А., Сучков В.Б.* Модель входных сигналов автономных бортовых радиолокационных систем // Оборонная техника. 2000. № 1–2. С. 66–71.
11. *Борзов А.Б., Соколов А.В., Сучков В.Б.* Методы цифрового моделирования радиолокационных характеристик сложных объек-

тов на фоне природных и антропогенных образований // Успехи современной радиоэлектроники. 2001. № 5. С. 55–66.

12. Борзов А.Б., Соколов А.В., Сучков В.Б. Цифровое моделирование входных сигналов систем ближней радиолокации от сложных радиолокационных сцен // Успехи современной радиоэлектроники. 2004. № 9–10. С. 38–62.

13. Быстров Р.П., Потапов А.А., Соколов А.В. и др. Проблемы распространения и применения миллиметровых радиоволн в радиолокации // Успехи современной радиоэлектроники. 1997. № 1. С. 4–20.

14. Внотченко С.Л., Достовалов М.Ю., Зайцев А.Б. и др. Результаты измерений ЭПР искусственных и естественных объектов по РЛ изображением РСА Компакт-100 // Исследование Земли из космоса. 2003. № 6. С. 49–57.

15. Волков А.М., Ефимов В.Б., Курекин А.С. и др. Радиолокационные исследования неоднородностей поверхности океана // Успехи современной радиоэлектроники. 2003. № 10. С. 41–53.

16. Волков А.М., Коваленко А.И., Куравлева Т.Г. и др. Перспективная РЛС ледовых наблюдений из космоса // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44, № 1. С. 29–36.

17. Вопросы перспективной радиолокации / Под ред. А.В. Соколова. М.: Радиотехника, 2003.

18. Гандурин В.А., Милянов Г.Л. Экспериментальные исследования отраженного от вертолета радиолокационного сигнала // Радиотехника. 2002. № 12. С. 8–12.

19. Диневич Л., Лешем Й. Селекция радиоэхо перелетных птиц и построение орнитологических карт по данным радиолокатора МРЛ-5 // Успехи современной электроники. 2008. № 3. С. 48–68.

20. Жерлаков А.В., Зимин Н.С., Кононов О.В. Радиолокационные системы предупреждения столкновения судов. Л.: Судостроение, 1984.

21. Жуков Б.С. Итоги науки и техники // Исследование Земли из космоса. Сер. Физические основы дистанционного зондирования. Т. 1. Под ред. Я.Л. Зимана. М., 1987.

22. Зеленецкий А.А., Кулемин Г.П., Курекин А.А. и др. Особенности тематической обработки многоканальных РЛ изображений почв // Успехи современной радиоэлектроники. 1999. № 11. С. 21–31.

23. Зубкович С.Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. М.: Сов. радио, 1968.

24. *Караев В.Ю., Каневский М.В., Баландин Г.Н.* Влияние региональных особенностей на точность определения скорости ветра над океаном // Исследование Земли из космоса. 2002. № 4. С. 32–42.

25. *Кобак В.О.* Радиолокационные отражатели. М.: Сов. радио, 1975.

26. *Король О.В., Костюк А.В., Струев А.В.* Экспериментально-расчетная методика оценки ЭПР кольцевых технологических швов объекта // Радиотехника. 2002. № 5. С. 11–17.

27. *Кравцов С.Л., Мурашко Л.А.* Обнаружение и прогноз развития нефтяных пятен на водной поверхности при использовании спутниковых данных // Исследование Земли из космоса. 2004. № 2. С. 53–60.

28. *Крапивин В.Ф., Кондратьев К.Я., Шутко А.М.* Адаптивная информационная технология в задачах микроволновой радиометрии земных покровов // Исследование Земли из космоса. 2004. № 6. С. 12–20.

29. *Кудрявцев В.Н., Акимов Д.Б., Иоханнессен О.М.* Проявление мезомасштабной изменчивости моря на радиолокационных изображениях его поверхности // Исследование Земли из космоса. 2003. № 2. С. 27–46.

30. *Кулемин Г.П., Луценко В.И.* Обратное рассеяние миллиметровых радиоволн морской поверхностью // Зарубежная радиоэлектроника. 1996. № 7. С. 16–28.

31. *Кулемин Г.П., Разказовский В.Б.* Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами. Киев: Наукова думка, 1987.

32. *Кулемин Г.П., Яцкевич С.Е.* Взаимосвязь обратного рассеяния радиоволн СВЧ-диапазона с параметрами растительного покрова и открытых почв при дистанционных методах зондирования // Успехи современной радиоэлектроники. 2004. № 3. С. 24–34.

33. *Лабунец Л.В., Анищенко Н.Н., Уруллин А.Р.* Математическое моделирование переходных характеристик 3D-объектов в радиолокационной системе ближнего действия // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 3. С. 279–302.

34. *Лаврентьев Ю.В., Ногинова Н.Е., Сильвинский С.В.* и др. Экспериментальные исследования отражения и рассеяния мм волн от шероховатых поверхностей зданий // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35, № 3. С. 650–652.

35. *Лобач В.Т., Буряк В.А., Бухарин В.Д.* Бортовой измеритель высоты, длины и направления распространения морских волн // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 8. С. 10–15.

36. Мельник Ю.А., Зубкович С.Г., Степаненко В.Д. Радиолокационные методы исследования Земли. М.: Мир, 1980.
37. Мельяновский П.А., Кащеев В.А., Зайцев Г.Л. Радиоокеанографические исследования морского волнения в декаметровом диапазоне радиоволн // Зарубежная радиоэлектроника. 1966. № 7. С. 40–51.
38. Нуждин В.М., Сулимов Ю.О., Сидоров Н.В. Определение коэффициента передачи тракта автомобильного РЛ 8-мм диапазона на результаты натуральных измерений // Радиотехника. 2001. № 3. С. 52–54.
39. Павельев В.А., Хаминов Д.В. Шероховатые уголкового отражатели радиолокационных сигналов // Нелинейный мир. 2003. № 1–2. С. 64–68.
40. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба. М.: Воениздат, 1989.
41. Пересада В.П. Радиолокационная видимость морских объектов. Л.: Судпромгиз, 1961.
42. Писаревский И.Ф., Евдокимов Н.О., Маршалов Б.А. Радиолокационная математическая модель человека при наклонном дистанционном зондировании // Радиотехника. 2003. № 3. С. 76–78.
43. Потапов А.А. Радиофизические эффекты при взаимодействии электромагнитного излучения миллиметрового диапазона волн с окружающей средой // Зарубежная радиоэлектроника. 1993. № 3. С. 7–9.
44. Разказовский В.Б. Поле миллиметровых радиоволн над сушей при малых углах скольжения // ИРЭ. Успехи современной радиоэлектроники. 2000. № 3. С. 3–35.
45. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Сколника. В 4 т. Т. 1. Основы радиолокации. М.: Сов. радио, 1976.
46. Сухонин Е.В. Затухание в гидрометеорах. Распространение мм волн в осадках // Успехи современной радиоэлектроники. 2002. № 9. С. 72–79.
47. Тейлор Р. Измерение РЛ отражений от земной поверхности на частотах 10, 15,5 и 35 ГГц // Зарубежная радиоэлектроника. 1960. № 3.
48. Тематический выпуск. Эффективная площадь отражения сложных радиолокационных объектов // ТИИЭР. 1989. Т. 77, № 5. С. 35–42.
49. Уфимцев П.Я. Метод краевых волн физической теории дифракции. М.: Сов. радио, 1963.

50. *Финкельштейн М.И.* Основы радиолокации. М.: Радио и связь, 1983.

51. *Хлопов Г.И.* Когерентная радиолокация в миллиметровом диапазоне // *Успехи современной радиоэлектроники*. 1999. № 9. С. 3–27.

52. *Чухланцов А.А., Маречак С.В., Новичихин Е.П.* и др. Лабораторные измерения ослабления электромагнитных волн фрагментами растительности // *Радиотехника и электроника*. 2004. Т. 49, № 6. С. 677–682.

53. *Чухланцов А.А., Шутко А.М., Головачов С.П.* Ослабление электромагнитных волн растительными покровами // *Радиотехника и электроника*. 2003. Т. 48. № 11. С. 1285–1311.

54. *Штагер Е.А.* Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. М.: Радио и связь, 1986.

55. *Штагер Е.А., Чаевский Е.В.* Рассеяние волн на телах сложной формы. М.: Сов. радио, 1974.

56. *Штейншлейгер В.Б., Мисежников Г.С., Сельский А.Г.* Эксперименты по дистанционному исследованию природных ресурсов в миллиметровом диапазоне радиоволн с использованием принципа синтезированной апертуры // *Радиотехника и электроника*. 1986. Т. 31, № 5. С. 1046–1047.

57. *Currie N.C., Echard J.D. Gary M.J.* et al. Millimeter Wave Measurements and Analysis of Snow-covered Ground // *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*. 1988. Vol. 26, N 3. P. 307–318.

58. *De Leeneer J.* et al. Comparison of the computed and measured RCS of helicopter // *SPIE*. Vol. 2742/402, Brussels, 1994.

59. *Dobson M.C., Ulaby F.T.* *IEEE Trans Geosci. and Remote Sens*, 1986. GE-24. N 1. P. 23–26.

60. *East J., Li N., Ulaby F., Dobson M.* Backscattering Properties of Simulated Geological Surfaces // *Geoscience and Remote Sensing*. 1987. Vol. 2.

61. *Freedman A.* The High Frequency Echo Structure of Some Simple Body Shapes. // *Acoustica*. 1962. Vol. 12, N 2. P. 61–70.

62. *Grant G.R., Yaplee B.S.* Back Scattering from Water and Land Surface at Centimeter and Millimeter Wavelengths // *Proc. IRE*. 1957. Vol. 7, N 7. P. 976–982.

63. *Heichele L., Knopf A., Popp B.* Radar Crosssection Measurement on Various Species of Tree Branches at 35 GHz // *IEEE Trans. Geosc and Remote Sens*. 1982. Vol. 1.

64. *Jane's Fighting Ships за 1989–90, Ninety.* Second Edition, Jane's Information Group.

65. Long M.W. Radar Reflectivity of Land and Sea. Artech House. Boston – London, 2001. Third Edition / www.scitechpub.com / Long-Rad-Refl.htm.

66. Nathanson F., Reilly E., Patrick J., Marvin N. Radar Design Principles. N.Y: McGraw-Hill, Inc., 1991.

67. Schwering F.K., Violette E.J., Espeland R.H. Millimetre-Wave Propagation in Vegetation: Experiments and Theory // IEEE Trans. Geosc and Remote Sens. 1988. Vol. 26, N 3. P. 355–367.

68. Ulaby F.T., Batlivala P.P. // IEEE Trans Antennas and Propagation, 1976. Vol. 24, N 1. P. 11–17.

69. Ulaby F.T., Haddock T.F., East J.R. et al. A Millimeter – Wave Network Analyzer based Scatterometr // IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing. 1988. Vol. 26. P. 75–81.

70. Ulaby F., Jedleka K. // IEEE Trans. Geosc and Remote Sens., 1984. GE-22. N 4. P. 406–415.

71. Williams M.M., Beex A.A. RCS Data Encoding Based on AR Spectral Estimation Techniques // International Radar Conference. The Record of the IEEE 1995.

72. Wiltse J.C., Schleisinger S.P., Johnson C.M. Backscattering Characteristics of the Sea in the Region from 10 to 50 kMc // Proc. // IRE. 1957. Vol. 45, N 2. P. 220–228.

ПРИЛОЖЕНИЯ

П1. ЭПР простых тел

В этом приложении приводятся расчетные формулы ЭПР простых тел, взятые из разных литературных источников [25, 41, 50, 61], которые могут быть использованы для оценки ЭПР АО.

Как уже отмечалось, ЭПР объекта определяется следующим выражением:

$$S_3 = \sigma = 4\pi D^2 \frac{I_2}{I_1},$$

где I_1 – интенсивность зондирующего поля на объекте; I_2 – интенсивность отраженного сигнала.

Ниже, если не оговорено особо, используются следующие обозначения:

S_3 – ЭПР объекта, $S_3 = \sigma$;

D – дистанция до объекта;

L – длина объекта;

S – площадь объекта;

a, b, c – радиус (длина полуосей) поверхностей 2-го порядка, размер грани;

d – диаметр;

ρ – коэффициент отражения.

Иногда, вместо ЭПР объекта используется понятие ее эквивалентного радиуса R_3 , связанного с ЭПР следующим соотношением:

$$S_3 = \pi R_3^2.$$

В приводимых далее соотношениях содержатся данные для тел с зеркально отражающей поверхностью и диффузно отражающих тел.

Поверхность считается отражающей зеркально, если выполняется соотношение Релея

$$\sigma_h \sin \psi < \frac{\lambda}{4},$$

где σ_h – СКО поверхности от средней линии; ψ – угол скольжения (рис. П1.1).

При расчете ЭПР зеркально отражающих тел используется понятие 1-й зоны Френеля, радиус которой

$$r_{\Phi} = \sqrt{\frac{\lambda D}{2}}.$$

Диффузно отражающие поверхности имеют ДОР с $S_3 \sim \sim \cos \vartheta$ (закон Ламберта). При этом коэффициент отражения, в отличие от зеркальных поверхностей, $\rho < 1$.

Рассмотрим расчетные формулы ЭПР конкретных тел.

1. Бесконечная плоскость. Зеркальное отражение

$$S_3 = \pi D^2.$$

Для зеркального отражения вплоть до достижения 1-й зоны Френеля

$$R_3 = D.$$

Диффузное отражение

$$S_3 = \pi D^2 \rho; \quad R_3 = D \sqrt{\rho}.$$

Диффузное отражение определяется шириной диаграммы направленности антенны РЛ и коэффициентом диффузного отражения ρ .

2. Плоская пластина произвольной формы площадью S . Зеркальное отражение при нормальном падении луча

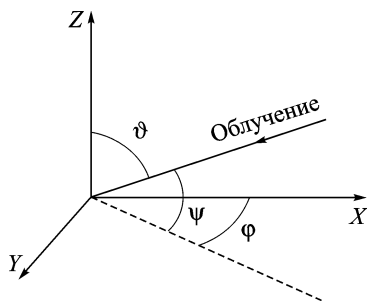


Рис. П1.1. Схема зондирования объектов

$$S_3 = 4\pi \frac{S^2}{\lambda^2} \quad \text{при} \quad S < \pi r\Phi^2;$$

$$R_3 = \frac{2S}{\lambda} \quad \text{при} \quad D \gg \frac{S}{\lambda}.$$

Диффузное отражение

$$S_3 = 4S\rho \cos \vartheta.$$

3. Круглая плоская пластина радиуса a . Зеркальное отражение

$$\begin{aligned} S_3 &= 4\pi \frac{S^2}{\lambda^2} \cos^2 \vartheta \left[\frac{I_1(2ka \sin \vartheta)}{ka \sin \vartheta} \right]^2 = \\ &= \pi k^2 a^4 \cos^2 \vartheta \left[\frac{I_1(2ka \sin \vartheta)}{ka \sin \vartheta} \right]^2, \end{aligned}$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; I_1 – функция Бесселя 1-го рода.

4. Прямоугольная плоская пластина (рис. П1.2). Зеркальное отражение

$$S_3 = \frac{k^2 a^2 b^2}{\pi} \cos^2 \vartheta \left[\frac{\sin(ka \sin \vartheta \sin \varphi)}{ka \sin \vartheta \sin \varphi} \right]^2 \left[\frac{\sin(kb \sin \vartheta)}{kb \sin \vartheta} \right]^2.$$

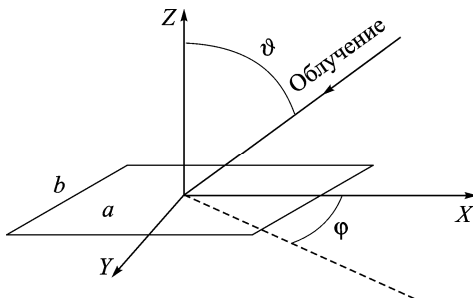


Рис. П1.2. Схема облучения плоской пластины

Ширина первого лепестка ДОР

$$\Delta\vartheta = \frac{\lambda}{2a}.$$

Соотношения пригодны для дальней зоны при

$$D \gg \frac{a^2}{\lambda} \text{ и } D \gg \frac{b^2}{\lambda}.$$

5. Эллиптическая плоская пластина (рис. П1.3). Зеркальное отражение

$$S_3 = \pi k^2 a^2 b^2 \left[\frac{I_1 \left(2k \sqrt{a^2 \cos^2 \vartheta \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi} \right)}{k \sqrt{a^2 \cos^2 \vartheta \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}} \right]^2.$$

При $D \gg \frac{2a^2}{\lambda}$; $D \gg \frac{2b^2}{\lambda}$; $S = \pi ab < \pi r_{\text{ср}}^2$.

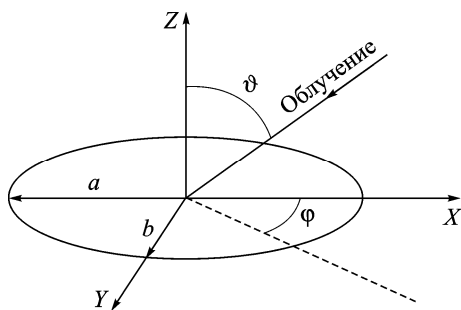


Рис. П1.3. Схема облучения эллиптической плоской пластины

6. Бесконечная плоская полоса шириной h (рис. П1.4). Зеркальное отражение определяется так же, как для бесконечной плоскости.

Диффузное отражение

$$S_3 = \frac{3}{2} h D \cos^2 \vartheta.$$

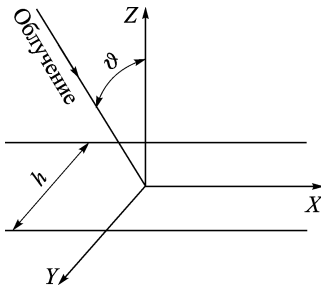


Рис. П1.4. Схема облучения бесконечной плоской полосы шириной h

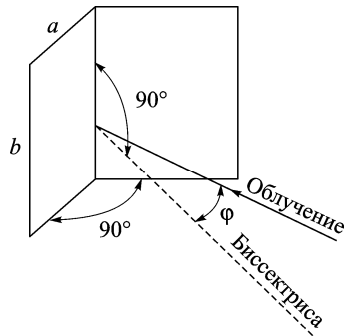


Рис. П1.5. Схема облучения двухгранного уголка

7. Угловые отражатели.

Двухгранный угол с перпендикулярными гранями площадью S (рис. П1.5)

$$S_3 = 16\pi \left(\frac{S}{\lambda} \right)^2 \cos^2(\pm \varphi),$$

где $ab = S$, $0 \leq \varphi \leq 45^\circ$, угол φ измеряется относительно биссектрисы.

Трехгранные уголки:

- треугольные грани (рис. П1.6)

$$S_{\text{гр}} = \frac{a^2}{2};$$

$$S_3 = \frac{4}{3} \pi \frac{a^4}{\lambda^2} = \frac{16\pi S_{\text{гр}}^2}{3\lambda^2};$$

- квадратные грани (рис. П1.7)

$$S_{\text{гр}} = a^2;$$

$$S_3 = 12\pi \frac{a^4}{\lambda^2} = 12\pi \left(\frac{S_{\text{гр}}}{\lambda} \right)^2;$$

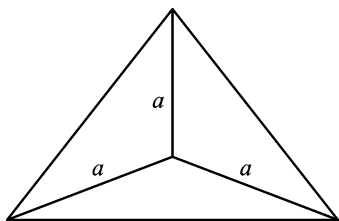


Рис. П1.6. Трехгранный УО с треугольными гранями

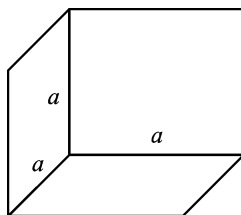


Рис. П1.7. Трехгранный УО с квадратными гранями

- секторные грани (рис. П1.8)

$$S_{гр} = \frac{\pi a^2}{4} \cong 0,8 a^2;$$

$$S_3 = \frac{16\pi a^4}{3\lambda^2}.$$

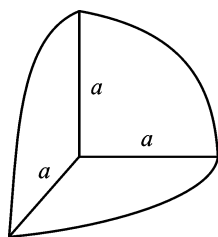


Рис. П1.8. Трехгранный УО с секторными гранями

8. Полость – круглое отверстие радиуса a при $a > \frac{\lambda}{2}$.

$$S_3 = 4\pi \frac{S_{\text{полости}}^2}{\lambda^2}.$$

Для круглого отверстия диаметром $2a$ максимальная оценка

$$S_3 = 1,44\pi \cdot 10^4 \lambda^2 (ka)^4.$$

Полуэмпирическая формула для $ka \geq 5$

$$R_3 = \lambda (2ka)^{3/2} \left(\frac{0,05}{\pi} \right)^{1/2} = 0,126\lambda (2ka)^{3/2} = 2\lambda \left(\frac{2a}{\lambda} \right)^{3/2}.$$

Угловая зависимость R_3 от угла зондирования ϑ

$$F(\vartheta) = \left[\cos \vartheta \frac{\sin(2ka \sin \vartheta)}{2ka \sin \vartheta} \right]^{1/2}.$$

9. Цилиндр бесконечный круглый радиуса a при $a \gg \lambda, D \gg a$.

Зеркальное отражение

$$S_3 = \pi \frac{D^2}{1 + \frac{D}{a}} \approx \pi D a.$$

Диффузное отражение

$$S_3 = 2\pi a D \theta_{0,5} \cos^2 \vartheta,$$

где $\theta_{0,5}$ – ширина ДНА в радианах в сечении, покрывающем цилиндр.

10. Круглый цилиндр длиной L при $D \gg \frac{L^2}{\lambda}$ и $a \ll D$ (рис. П1.9).

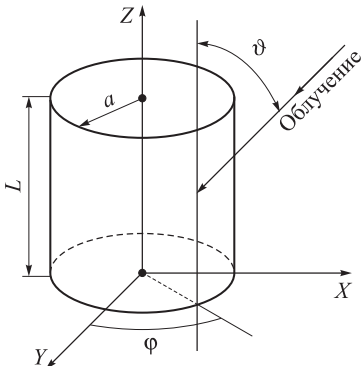


Рис. П1.9. Схема облучения бесконечного круглого цилиндра

Зеркальное отражение

$$S_3 = \pi \frac{2L^2 a}{\lambda} \cos \vartheta \left[\frac{\sin(kL \sin \vartheta)}{kL \sin \vartheta} \right]^2;$$

$S_3 = 2\pi \frac{L^2}{\lambda} a$ при $\vartheta = 0$ – нормальное падение.

Диффузное отражение

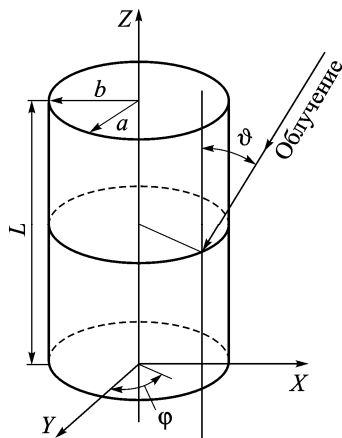
$$S_3 = 2\pi L a \cos \vartheta.$$

11. Эллиптический цилиндр (конечный) при $D \gg \frac{L^2}{\lambda}$ (рис.

П1.10).

Зеркальное отражение

$$S_3 = \frac{ka^2b^2L^2 \sin \vartheta}{\left(a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi\right)^{\frac{3}{2}}} \times \left(\frac{\sin kL \cos \vartheta}{kL \cos \vartheta}\right)^2$$



при $D \gg a, D \gg b, \lambda \ll a, b, L$.

Рис. П1.10. Схема облучения конечного эллиптического цилиндра

12. Тонкие цилиндры (провода) при $a \ll \lambda; L \gg \lambda$.

$$R_3 = \frac{L \sin \vartheta \frac{\sin \vartheta \left(\frac{2\pi L}{\lambda} \cos \vartheta\right)}{2\pi L \cos \vartheta} \cos^2 \varphi}{\sqrt{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 + \left(\ln \frac{\lambda}{\gamma \pi a \sin \theta}\right)^2}},$$

где φ – угол между плоскостью поляризации и плоскостью провода и луча.

Упрощенное выражение расчетной формулы ЭПР для $\frac{\pi}{4} < \varphi < \frac{\pi}{2}$ имеет следующий вид:

$$R_3 = \frac{L}{\pi} \cos^2 \varphi.$$

Низкочастотная аппроксимация

$$R_3 = \frac{L}{8} (\varepsilon - 1) (kd)^2,$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость, при $\varepsilon = 3$ $R_3 \approx 3 \dots 10$.

В работе [51] для витых проводов дано выражение $S_3 = \pi d^2 D \cos^2 \varphi$.

13. Бесконечный конус (угол при вершине 2α) (рис. П1.11). Зеркальное отражение при локации со стороны вершины

$$R_3 = \frac{\lambda}{4\pi} \operatorname{tg}^2 \alpha; \quad S_3 = \frac{\lambda^2}{16\pi} \operatorname{tg}^4 \alpha.$$

14. Конечный конус (круглый) (рис. П1.12).

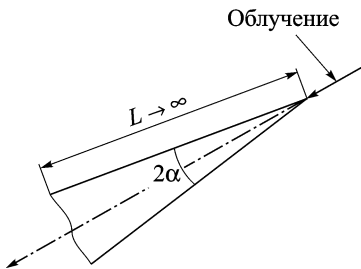


Рис. П1.11. Схема облучения бесконечного конуса

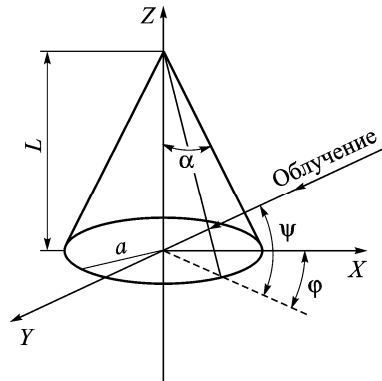


Рис. П1.12. Схема облучения конечного круглого конуса

Зеркальное отражение

$$S_3 = \pi D^2 \operatorname{tg}^2 \alpha$$

при облучении со стороны вершины;

$$S_3 = kD \frac{\cos(\vartheta - \alpha)}{\cos^2 \vartheta} \left[\frac{\sin\left(kL \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\vartheta}\right)}{\left(kL \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\vartheta}\right)} \right]^2$$

при $\vartheta \leq 65^\circ$.

15. Усеченный конус (рис. П1.13).

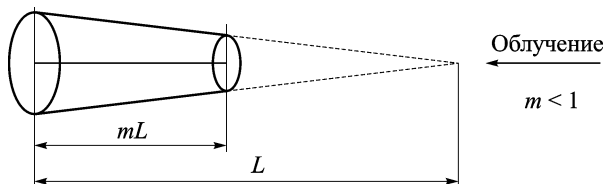


Рис. П1.13. Схема облучения конечного усеченного конуса

Зеркальное отражение при облучении со стороны вершины

$$R_3 = 2 \frac{S}{\lambda} \left[1 - \frac{2 \sin kmL}{kL(1-m)^2} + \frac{1}{k^2 L^2 (1-m)^2} \left(\frac{1}{(1-m)^2} - \frac{2 \cos 2kmL}{1-m} + \cos 2kmL \right) \right].$$

16. Биконический отражатель (рис. П1.14).

$$R_{3 \max} = \sqrt{2} h \sqrt{\frac{d_{\max} + d_{\min}}{2\lambda}} = h \sqrt{\frac{d_{\text{ср}}}{\lambda}};$$

$$R_3(\vartheta) = h \sqrt{\frac{d_{\text{ср}}}{\lambda}} \cos \vartheta;$$

$$S_3 = \frac{2\pi h d_{\text{ср}}^2}{\lambda} \cong \frac{S}{\lambda} d_{\text{ср}},$$

где $S = h d_{\text{ср}}$.

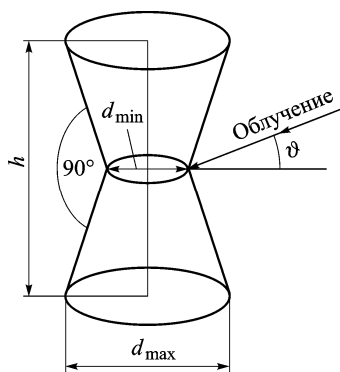


Рис. П1.14. Схема облучения биконического отражателя

17. Сфера радиуса a (рис. П1.15).

Зеркальное отражение при $\lambda \ll a; D \gg a$

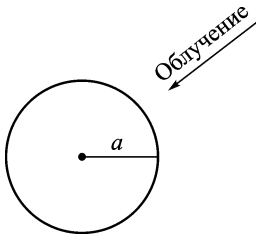


Рис. П1.15. Схема облучения сферы радиуса a

$$R_3 = \frac{a}{1 + \frac{a}{D}} \cong a;$$

$$S_3 = \pi a^2.$$

Для малых сфер ($\lambda \gg a$, $D \gg a$)

$$R_3 = a \left[1 - \frac{\sin 2ka}{ka} + \left(\frac{\sin 2ka}{ka} \right)^2 \right];$$

$$S_3 = \pi \left(\frac{m-1}{m+2} \right)^2 \frac{(2a)^6}{\lambda^4} -$$

формула Ми, где m – комплексный показатель преломления.

Диффузное отражение при $a \gg \lambda$, $D \gg a$:

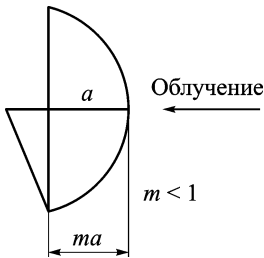


Рис. П1.16. Схема облучения сферического сегмента

- для металлической сферы

$$S_3 = \frac{8}{3} \pi a^2;$$

- для диэлектрического материала

$$S_3 = \pi \left(\frac{\sqrt{\varepsilon} - 1}{\sqrt{\varepsilon} + 1} \right)^2 a^2.$$

18. Часть сферы при $a \gg \lambda$, $D \gg a$ (рис. П1.16).

Зеркальное отражение

$$R_3 = a \sqrt{4(1-m) \sin^2 kma + m^2 \left[1 - \frac{\sin 2kma}{kma} + \left(\frac{\sin 2kma}{kma} \right)^2 \right]}.$$

Диффузное отражение

$$R_3 = a \sqrt{\frac{8}{3}} (1 - \cos^3 \vartheta).$$

19. Трехосный эллипсоид при $D \gg a, b, c$; $\lambda \ll a, b, c$ (рис. П1.17).

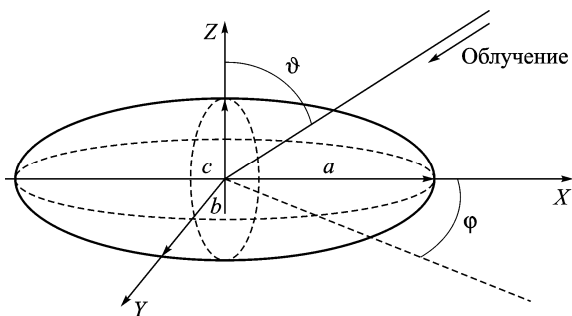


Рис. П1.17. Схема облучения трехосного эллипсоида

Зеркальное отражение

$$S_3 = \frac{\pi a^2 b^2 c^2}{(a^2 \sin^2 \vartheta \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \vartheta \sin^2 \varphi + c^2 \cos^2 \vartheta)^2}.$$

20. Веретенообразное тело вращения (рис. П1.18).

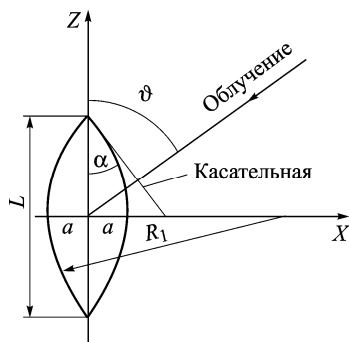


Рис. П1.18. Схема облучения веретенообразного тела вращения

Зеркальное отражение:

- при $0 \leq \vartheta \leq (90^\circ - \alpha)$

$$R_3 = \frac{\lambda \operatorname{tg}^2 \alpha}{4\pi \cos^3 \vartheta (1 - \operatorname{tg}^2 \alpha \operatorname{tg}^2 \vartheta)^{\frac{1}{3}}};$$

- при $0 \leq \vartheta < (90^\circ - \alpha)$

$$R_3 = \frac{a}{2\pi \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} = \frac{R_1 \sin \alpha}{2\pi};$$

- при $\vartheta \leq (90^\circ - \alpha)$

$$R_3 = R_1 \sqrt{\left(1 - \frac{R_1 - a}{R_1 \sin \vartheta}\right)}.$$

П2. УЭПР для ЭМВ диапазона 0,3...3,2 см

Рассмотрим изменения УЭПР и ЭПР для ЭМВ диапазонов 0,3 и 3,2 см относительно $\lambda = 0,86$ см, как наиболее употребительные в различных приложениях. Использование этих длин волн в зависимости от решаемых задач лимитируется затуханием в атмосфере, габаритами антенных систем, обеспечивающих необходимые параметры ДНА, и т. п.

Сначала рассмотрим потери в атмосфере (дБ/км) для выбранных диапазонов, представленные в табл. П2.1.

Таблица П2.1. Затухание ЭМВ разной частоты в атмосфере

Условия распространения	Длина ЭМВ $\lambda_{\text{ср}}$, см			
	0,3	0,86	2,0	3,2
Чистая атмосфера	0,4	0,1	0,03	0,01
Туман $w = 0,1 \text{ г/м}^3$	0,6	0,18	0,05	0,015
Дождь $I = 5 \text{ мм/ч}$	3...4	1,0	0,25	0,1

Следует отметить, что затухание в гидрометеорах зависит от их высоты над земной поверхностью, температуры, геометрических параметров водных образований и т. д.

Из данных, приведенных в табл. П2.1, следует что в диапазоне $\lambda = 0,3$ см можно работать на дистанциях до 100...500 м, диапазоны 0,86 см и 2,0 см обеспечивают дальность до 5...10 км, а диапазон 3,2 см – до десятков километров.

Рассмотрим отражательные характеристики естественных и антропогенных объектов для этих диапазонов ЭМВ относительно 0,86-см диапазона.

Диапазон $\lambda = 0,4 \dots 0,27$ см, $\lambda_{\text{ср}} = 0,32$ см. Оценку УЭПР и ЭПР будем проводить в виде отношения $\Delta\sigma^0 = \sigma_{0,3}^0 / \sigma_{0,86}^0$ дБ или $\Delta\sigma = \sigma_{0,3} / \sigma_{0,86}$ дБ соответственно. Для диапазона 0,3 см относительные изменения УЭПР в зависимости от ПП даны в табл. П2.2.

Таблица П2.2. Относительные изменения УЭПР в зависимости от ПП для диапазона 0,3 см

Наименование ПП	ϑ , град	$\Delta\sigma^0$, дБ
Асфальт	0	-5
	20...70	+2...+4
Гравий	20...70	+3...+5
Грунт открытый	20...70	+3...+7
Вода взволнованная	20...70	0
Снег сухой	0	0
	20...70	+2...+5
Снег влажный	0	-2...-5
	20...70	+2...+4
Трава	0	+2...+4
	20...70	+5...+7
Камыш над водой	20...70	+1
Лес хвойный (ель)	20...70	+3...+5
Лес лиственный	20...70	+3...+5

Для этого коротковолнового диапазона при $\vartheta = 0$ практически все ПП, включая асфальт и бетон, являются шероховатыми. Поэтому при малых углах зондирования УЭПР уменьшаются, а при углах зондирования $20 \dots 70^\circ$ увеличиваются. В зависимости от конкретных параметров ПП (влажность, геометрические характеристики и т. п.) возможны вариации σ^0 на $3 \dots 5$ дБ.

Рассмотрим АО. Объекты типа зданий, дорог и мостов для этого диапазона следует идентифицировать как ПП. Объекты, состоящие в основном из металлических элементов, следует пересчитывать по соотношениям: $\sigma_{0,3} = \sigma_{0,86}$ для элементов с двойной кривизной; $\sigma_{0,3} = \sigma_{0,86}(\lambda_{0,3} / \lambda_{0,86})^{-1}$ – для элементов с цилиндрической поверхностью и $\sigma_{0,3} = \sigma_{0,86}(\lambda_{0,3} / \lambda_{0,86})^{-2}$ – для плоских и уголковых элементов.

Поэтому объекты сельскохозяйственной техники на $\lambda_{cp} = 0,32$ см будут иметь значения ЭПР на 5...9 дБ больше, чем на $\lambda = 0,86$ см, а значения ЭПР таких объектов, как легковые автомобили, будут отличаться незначительно.

Диапазон $\lambda = 1,67...2,4$ см; $\lambda_{cp} = 2$ см. Отражающая способность ПП в диапазоне 2,0 см ЭМВ характеризуется сложными зависимостями из-за того, что многие элементарные отражатели для этого диапазона находятся в резонансной области по отношению к длине волны, т. е. $\sigma_h / \lambda \approx 1$. По сравнению с диапазоном 0,86 см значения коэффициентов Френеля при вертикальном зондировании вследствие увеличения ДП возрастают в 1,5 раза. В то же время из-за роста λ и зависимости УЭПР некоторых объектов, пропорциональной σ_h^2 / λ^4 , отражающая способность ПП уменьшается не менее, чем на порядок. Экспериментальные данные этого раздела основаны на анализе радиолокационных измерений, полученных с помощью РЛС «Торос», «Игла» и «Нить», а также из литературных данных [21, 36].

В табл. П2.3 приведены относительные изменения УЭПР некоторых поверхностей для диапазона 2,0 см: $\Delta\sigma^0 = \sigma_{2,0}^0 / \sigma_{0,86}^0$ дБ.

Аналитическое выражение для УЭПР, дБ, основных ПП имеет вид

$$\sigma^0(\vartheta) = 10 \lg \left[a_1 \exp(-a_2 \vartheta^2) + a_3 \cos^{a_4}(a_5 \vartheta) \right].$$

Таблица П2.3. Относительные изменения УЭПР для диапазона 2,0 см

Наименование ПП	ϑ , град	$\Delta\sigma^0$, дБ
Бетон	20...70	-8...-10
Асфальт	20...70	-5...-10
Гравий, галька, щебень	20...70	-1...-3
Песок сухой	0...10	-3...-5
Вода:		
спокойная	20...70	-1...-3
взволнованная	0...70	~ 0
Снег:		
сухой	20...70	-3...-7
влажный	20...70	0...-3
Поле, луг:		
лето	20...70	0...-2
осень	20...70	-2...-5
Лес	10...30 30...70	-2...-3 0...-1

Коэффициенты a_i для разных ПП и диапазона 2,0 см сведены в табл. П2.4. При расчетах значения углов ϑ брались в радианах.

Таблица П2.4. Коэффициенты a_i для аналитического выражения УЭПР для диапазона 2,0 см

Наименование ПП	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Бетон	3,1	330,3	0,003	7,0	0,57
Асфальт	3,1	230,8	0,01	6,0	0,57
Гравий, шлак	0,125	40,0	0,1	2,5	0,86
Песок сухой	1,0	33,0	0,04	5,0	0,57
Вода:					
спокойная	31,0	197,0	0,003	1,5	1,15
взволнованная	20,0	9,85	0,3	5,0	0,97
Снег:					
сухой	0,55	0,98	0,0	0,0	0,0
влажный	1,0	65,66	0,06	6,0	0,57
Поле, луг:					
лето	0,13	1,15	0,0	5,0	0,57
осень	0,05	23,0	0,015	2,0	0,57
Лес	0,1	0,43	0,0	0,0	0,0

При рассмотрении АО можно прогнозировать их положения, относящиеся к диапазону 3 мм, с учетом того, что отношение длин волн будет обратным.

Такие объекты, как здания, дороги, мосты для 3-мм диапазона следует идентифицировать как ПП. Значения ЭПР объектов, состоящих в основном из металлических элементов, следует пересчитывать исходя из соотношений: $\sigma_{2,0} = \sigma_{0,86}$ для элементов с двойной кривизной; $\sigma_{2,0} = \sigma_{0,86} \times (\lambda_{2,0} / \lambda_{0,86})^{-1}$ – для элементов с цилиндрической поверхностью и $\sigma_{2,0} = \sigma_{0,86} (\lambda_{2,0} / \lambda_{0,86})^{-2}$ – для плоских и угловых элементов. Поэтому такие объекты, как сельскохозяйственная техника будут иметь ЭПР на несколько децибел меньше, чем на $\lambda = 0,86$ см, а значения ЭПР легковых автомобилей будут отличаться незначительно. В табл. П2.5 приведены приближенные данные по УЭПР и ЭПР некоторых объектов. Первые шесть объектов содержат УЭПР площадных объектов в децибелах относительно 1 м^2 , остальные – полные ЭПР объектов.

Таблица П2.5. УЭПР и ЭПР АО для ЭМВ в диапазоне 2,0 см для ГГ-поляризации

Наименование объекта	Среднее значение УЭПР объекта, дБ	Условия наблюдения
Порты, верфи	1,0...3,0	$\vartheta = 70^\circ$
Заводы нефтеперерабатывающие, химические	1,5...2,0	
Промышленный район	1,5	
Ж.-д. узел	1,0...2,5	
Городской район	0,3...0,5	$\vartheta = 80^\circ$
Поселковый район	0,1...0,2	
Ж.-д. мост металлический	20...25	$\vartheta = 70^\circ, \varphi = 90^\circ$
Ж.-д. мост бетонный	15...20	

Окончание табл. П2.5

Наименование объекта	Среднее значение УЭПР объекта, дБ	Условия наблюдения
Трактор большой	8...10	$\vartheta = 90^\circ$
Автомобиль	5...8	
Судно среднее	30	

Диапазон $\lambda = 2,4...3,75$ см, $\lambda_{\text{ср}} = 3,2$ см. Этот диапазон широко представлен в литературных источниках (см., например [23, 36]). Поэтому далее приводится такая же таблица отношений $\sigma_{3,2}^0 / \sigma_{0,86}^0$ для основных ПП (табл. П2.6), а более подробные сведения можно найти в литературных источниках.

Таблица П2.6. Относительные значения УЭПР для ЭМВ диапазона 3 см

Наименование ПП	ϑ , град	$\Delta\sigma^0$, дБ
Бетон	20...70	-10...-12
Асфальт	20...70	-8...-12
Гравий, галька, щебень	20...70	-8...-10
Песок сухой	20...70	-4...-10
Море взволнованное	10...30	-7...-10
	40...80	0...-3
Снег:		
	сухой	20...70
влажный	20...70	0...-3
Поле, луг:		
	лето	20...70
осень	20...70	-10
Лес	10...30	-1...-3
	30...70	0...-1

ЭПР АО при длине волны 3 см мало отличаются от таковых для ЭМВ $\lambda = 2$ см. Для площадных объектов – ж.-д. стан-

ций, заводских территорий, городских кварталов – значения УЭПР для 3-см волн меньше таковых для 2-см волн в среднем на 1...3 дБ. У локальных объектов типа сельскохозяйственной техники значения ЭПР на несколько децибел меньше, чем на $\lambda = 2,0$ см, а значения ЭПР таких объектов, как легковые автомобили, самолеты, будут отличаться незначительно.

ПЗ. Шероховатые уголкового отражатели

Расчет ЭПР плоских отражающих поверхностей различного типа осуществляется на основе использования УЭПР этих поверхностей и определяется соотношением

$$\sigma = \sigma^0(\vartheta, \varphi) S_p(\vartheta, \varphi).$$

Значения $\sigma^0(\vartheta, \varphi)$ для ПП даны в разд. 4. Далее приводится методика расчета ЭПР объектов, поверхности которых образуют двугранный угол с ПП (стены зданий, заборы и др.) так называемых шероховатых уголкового отражателей (ШУО). При этом обе грани УО имеют разную шероховатость (асфальт, бетон, снег, трава – для горизонтальных ПП, штукатурка, кирпич, стекло, металл – для вертикальных граней).

При расчете ЭПР (УЭПР) ШУО должны быть решены две основные задачи:

1) определен уровень сигнала, отраженного от шероховатого уголка;

2) учтено расширение ДОР на его поверхностях.

Рассмотрим сначала идеальный двугранный угол, образованный гладкими поверхностями [25] (рис. ПЗ.1).

При падении сигнала РЛ в плоскости, перпендикулярной ребру УО, с площадью грани, равной S , под углом ϑ_0 к биссектрисе сигнал отразится УО под углом $\vartheta_r = \vartheta_0 \pm \pi \pm 2\alpha$. При $\alpha = \pi/2$ $\vartheta_r = \vartheta_0$, т. е. сигнал отражается под тем же углом, что и падающий, а значение ЭПР УО

$$\sigma(\vartheta) = 2 \sigma_{\max} \cos\left(\frac{\pi}{4} + |\vartheta|\right),$$

где $\sigma_{\max} = \frac{8\pi S^2}{\lambda^2}$; $S = ab$; $-\frac{\pi}{4} < \vartheta < \frac{\pi}{4}$.

При $\alpha = \pi/2 + \Delta\alpha$ $\vartheta_r = \vartheta_0 + 2\Delta\alpha$, т. е. отраженный луч отклонится от направления падающего на удвоенный угол $\Delta\alpha$ [25].

При $S > S_p$ уровень сигнала будет определяться площадью ЭР.

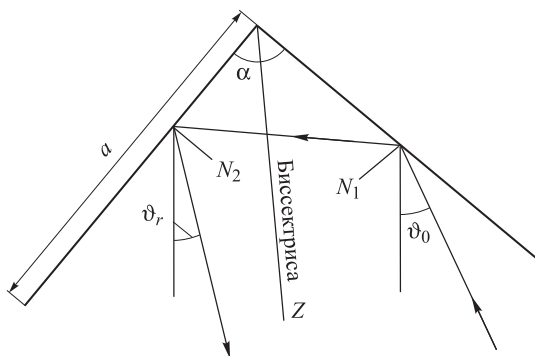


Рис. ПЗ.1. Схема облучения двухгранного УО в нормальном направлении

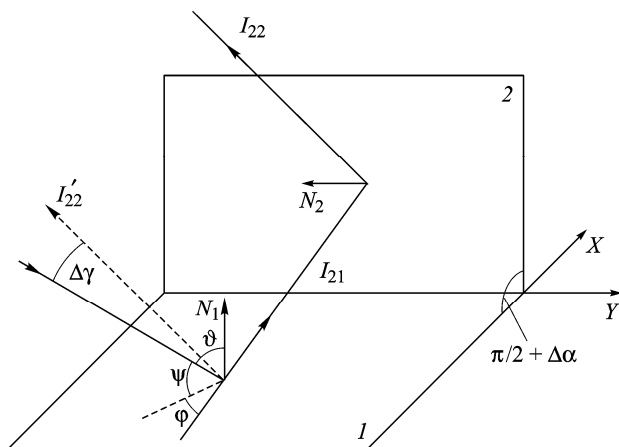


Рис. ПЗ.2. Схема облучения двухгранного УО в произвольном ракурсе

При падении луча в плоскости, развернутой от нормали к ребру УО под углом φ (рис. ПЗ.2), отраженный сигнал также получит дополнительный сдвиг по азимуту на угол $\Delta\varphi$ и не отразится в обратном направлении. При изменении ракурса зондирования φ и параметра УО $\Delta\alpha$ получим суммарный эффект отклонения отраженного луча в обоих направлениях от направления падающего луча $\Delta\gamma$:

$$\Delta\gamma = 2 \arccos\left(\cos\Delta\alpha \sqrt{1 - \cos^2\psi \sin^2\varphi}\right).$$

Рассмотрим отражение сигнала РЛ от реальных поверхностей, образующих УО. Вертикальной гранью УО чаще всего являются стены зданий из бетона или кирпича, как правило, оштукатуренные. Поэтому их поверхности можно принимать по отражающим свойствам, подобными бетону или кирпичной кладке. Реже встречаются УО, где одна грань является металлическим кузовом автомобиля, забора или остекленной поверхностью и т. п. Более подробно такие поверхности будут рассмотрены далее. Горизонтальная грань УО в городе чаще всего представляет собой асфальт или газон. Кроме этих ПП горизонтальной гранью может быть бетон, гравий, песок, утрамбованная почва, снег и т. д. Именно эта грань может лежать не горизонтально, а иметь небольшой уклон $\Delta\alpha \leq 10^\circ$ в сторону от стены здания (кузова автомобиля и т. п.). Характерными особенностями таких уголкового образований являются сравнительно большие размеры граней и шероховатая поверхность обеих граней.

Рассмотрим физические эффекты отражения ЭМВ волн от шероховатых поверхностей. В отличие от гладких поверхностей, отражение от которых носит абсолютно зеркальный характер и определяется по формулам Френеля, у шероховатых поверхностей отраженный сигнал имеет как зеркальную, так и диффузную составляющие, причем диффузная нередко превалирует над зеркальной. Соотношение между этими составляющими определяется характером поверхности и в пер-

вую очередь такими ее параметрами, как СКО от средней линии поверхности σ_h и интервалом корреляции в направлениях X и Y вдоль грани l_x и l_y .

Зеркальная составляющая формируется областью, примерно соответствующей 1-й зоне Френеля. Модуль коэффициента отражения для зеркальной составляющей у шероховатой поверхности связан соотношением

$$R_3 = R_0 r_3,$$

где R_0 – коэффициент Френеля для гладкой поверхности; r_3 – коэффициент зеркального отражения [50],

$$\sqrt{r_3^2} = \exp \left[- \left(\frac{4\pi\sigma_h}{\lambda} \cos \vartheta \right)^2 \right],$$

если полагать гауссовым распределение неровностей на поверхности [25].

Для направления зондирования, близкого к нормальному, R_3 имеет существенную величину лишь при малых значениях σ_h и ϑ .

Аналогично вводится коэффициент отражения и для диффузной составляющей в направлении зеркального отражения [4]:

$$R_d = R_0 r_d.$$

Как показывает эксперимент, $r_d = 0,1 \dots 0,4$ для большинства шероховатых поверхностей.

Приблизительный вид зависимостей r_3 и r_d от параметров поверхности и угла зондирования ϑ дан на рис. ПЗ.3 [4].

Экспериментальные данные для сельских ландшафтов (луг, пашня, кустарник) на $\lambda = 8$ мм дают следующие значения коэффициента отражения $r_{\text{эф}}$, содержащего обе составляющие отражения, [44]:

$$r_{\text{эф}} = 0,1 \dots 0,6 \text{ при } \psi \approx 1^\circ; \quad r_{\text{эф}} \leq 0,1 \text{ при } \psi > 10^\circ.$$

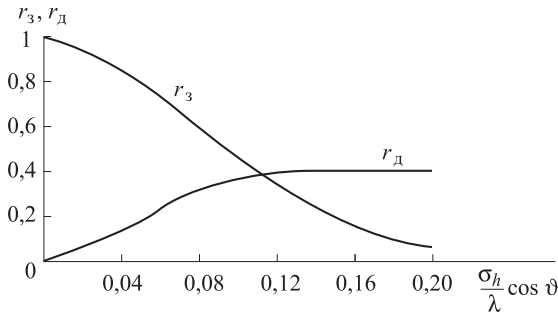


Рис. ПЗ.3. Зависимости $r_з$ и $r_д$ от параметров поверхности и угла облучения ϑ

Наличие любого растительного покрова снижает значение $r_{эф}$ до 0,1...0,2. Зимой при появлении льда и снега $r_{эф}$ может возрасти до 0,8...0,9.

При полном разрушении зеркальной составляющей [44] угловая ширина конуса рассеяния в угломестном и азимутальном направлениях пропорциональна углу скольжения ψ . Однако при $\psi = 0$ диффузная составляющая не обращается в нуль и угловая ширина обратного излучения также имеет конечное значение.

В работе [7] приведены результаты вычислений индикатрис рассеяния поверхностью с коэффициентом корреляции неровностей, распределенным по нормальному закону:

$$R(\rho) = e^{-\frac{I_x^2}{2l_x^2} - \frac{I_y^2}{2l_y^2}},$$

где $\rho^2 = l_x^2 + l_y^2$, I_x , I_y – составляющие сигнала по осям X и Y ; l_x и l_y – составляющие радиуса корреляции по этим осям.

На рис. ПЗ.4 изображена индикатриса рассеяния от игольчатого луча E_0 , падающего на шероховатую поверхность, расположенную в плоскости ZX . Угол $2\Delta\varphi$ характеризует индикатрису рассеяния по уровню $1/e$ в азимутальной плоскости, а $2\Delta\vartheta$ – в угломестной.

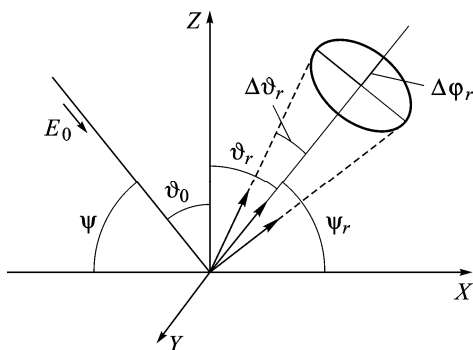


Рис. ПЗ.4. Схема расширения отраженного игольчатого луча в нормальной и азимутальной плоскостях

При условии $\Delta\vartheta \ll \psi$, получаем [7] следующие выражения для расширения луча:

- в угломестной плоскости

$$\Delta\vartheta = \sqrt{8} \operatorname{tg} \frac{\sigma h}{l_x};$$

- в азимутальной плоскости

$$\Delta\varphi = \sqrt{8} \operatorname{tg} \frac{\sigma h}{l_y} \operatorname{tg} \psi.$$

В разд. 4 были рассмотрены УЭПР различных поверхностей, составляющих в основном горизонтальные элементы ШУО. Здесь мы попытаемся оценить УЭПР некоторых типов поверхностей, составляющих вертикальные элементы ШУО. Сюда в первую очередь можно отнести следующие поверхности:

- стены из красного и силикатного кирпича;
- оштукатуренные стены;
- стеклянные (остекленные) поверхности;
- металлические поверхности;
- деревянные стены;
- стены из сайдинга (пластмассы).

Кроме того, в настоящее время все более широкое распространение получают крыши, представляющие собой залитую битумом и покрытую рубероидом поверхность, гофрированные шиферные и пластмассовые крыши, которые также являются хорошо отражающими поверхностями.

В табл. ПЗ.1 приведены основные характеристики наиболее типичных ПП природного и антропогенного происхождения, образующие грани УО.

Исходя из данных табл. ПЗ.1 и зависимостей $\sigma^0(\vartheta)$ для поверхностей, занимающих восемь последних строк табл. ПЗ.1, их УЭПР можно свести к трем типам (рис. ПЗ.5).

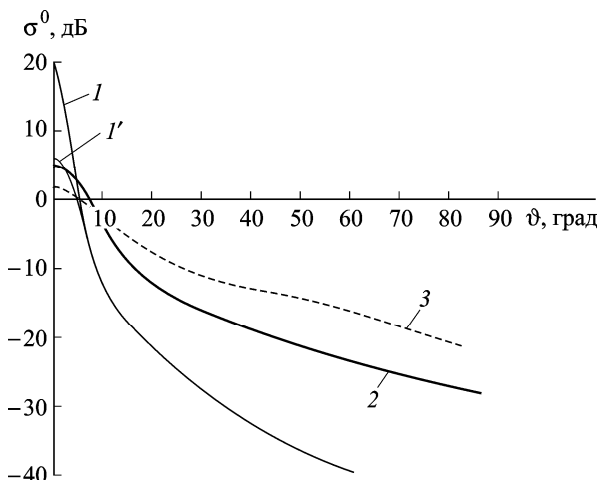


Рис. ПЗ.5. УЭПР стеновых поверхностей:

1 и *1'* – гладкие поверхности из металла, листового стекла и шифера соответственно; *2* – поверхности с кирпичной кладкой и оштукатуренные поверхности; *3* – деревянные и пластиковые поверхности (данные о пластиковых поверхностях обладают наибольшей неопределенностью)

Следует сказать, что все данные относятся к плоским поверхностям, гофрированные металлические, шиферные, пластиковые поверхности и деревянные бревенчатые стены будут давать совсем другое отражение при некоторых ракурсах зондирования.

Таблица ПЗ.1. Основные характеристики наиболее типичных ПП

Наименование ПП	ρ , г/см ³	ε_1	σ_h , см	ξ , дБ/см	$\sigma^0(0)$, дБ	$\Delta\Psi$, $\Delta\Phi$, град	Ψ_p , град
Бетон	1,7...2,0	5,5	7,5	0,1...0,3	+14	2...3	30
Асфальт	1,3...2,1	2,5	13,6	0,1...0,4	+12	15	20
Галька, щебень	1,8	4,0...10	~10,0	0,5...3,0	0	45	5
Песок	1,2...1,6	4,0	6,8	0,2...0,5	+5	5...10	20
Глина	1,6...2,0	3,0	7,5	–	+3	3...5	–
Пашня	–	2,5	5,0...7,0	1,0...5,0	–8	25	10
Луг (трава)	–	1,1	2,7	0,1...1,0	–10	20	15
Вода	1,0	19,5	190,0	1,0...300,0	+18	3...10	–
Лед	0,92	3,0	0,1	–	+3	0...5	30
Снег	0,4...0,6	2,0...6,0	1,2	0,2...2,0	+5...–2	10...15	10
Металл	2,7...9,0	∞	∞	0	+20	0	90
Кирпич: красный силикатный	1,6...1,7 1,7...1,9	4,2 3,4	2,0 1,4	0,1...0,2 0,1...0,2	+6 +4	5...10 5...10	25 25
Штукатурка известковая	1,1	3,0	1,50	0,2...0,5	+3	5...10	30...5
Шифер	2,6...2,9	6,0...7,0	–	0,1	+7	0...3	20
Стекло	2,2...2,5	7,0	2,2	0	+6	0	90
Дерево	0,4...0,7	2,0...4,0	8,2	0,01...0,1	–2	0...3	–
Пластмассы	1,2...2,4	2,0...6,0	–	0...0,1	+4	0...3	90...20

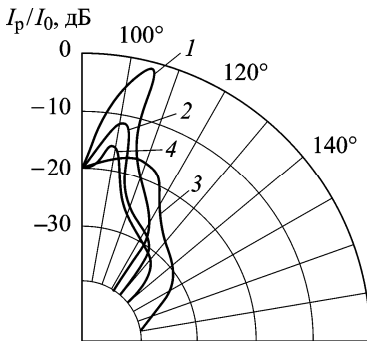


Рис. ПЗ.6. Экспериментальные ДОР от стен разных типов на $\lambda = 0,86$ см ГГ- и ВВ-поляризации при $\vartheta = 15^\circ$, $\theta_{0,5} = 5^\circ$:

1 – металл; 2 – кирпич силикатный ($\sigma_h = 0,8$ мм); 3 – кирпич красный ($\sigma_h = 2,5$ мм); 4 – штукатурка ($\sigma_h = 1,2$ мм)

На рис. ПЗ.6 представлены экспериментальные результаты [34] по расширению ДОР при отражении от двух типов кирпича и штукатурки по сравнению с гладкой металлической поверхностью.

Ниже приведены данные по потерям при отражении от поверхностей городских зданий для $\lambda \approx 1$ см и $\vartheta \approx 0$ по сравнению с потерями при отражении в свободном пространстве [43]:

Материал	Потери при отражении, дБ
Металл	-3 ± 2
Бетон сборный	-11 ± 1
Бетон рифленый	-9 ± 2
Кирпич красный	-14 ± 2
Кирпич силикатный	-10 ± 3

Изображенные на рис. ПЗ.5 кривые получены для соотношения, определяющего УЭПР ПП через коэффициенты a_{ij} аналитического выражения (ϑ в град)

$$\sigma^0(\vartheta) = a_1 \exp(-a_2 \vartheta^2) + a_3 \cos^{a_4}(a_5 \vartheta),$$

значения которых приведены в табл. ПЗ.2.

Таблица ПЗ.2. Значения коэффициентов a_{ij} аналитического выражения

Материал	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Металл, стекло, шифер	100	0,09	0,015	40,0	0,009
Кирпич, штукатурка	3,0	0,016	0,05	13,0	0,009
Дерево, пластик	1,4	0,008	0,12	30,0	0,005

На рис. ПЗ.7 представлена схема расширения узкого луча I_0 при последовательном отражении от двух диффузно рассеивающих граней ШУО в плоскости XZ (см. рис. ПЗ.7, *а*) и в плоскости XY (см. рис. ПЗ.7, *б*). При косом направлении зондирующего луча I_0 и угле $\alpha \neq \pi/2$ качественно картина останется такой же, только отраженный зеркально луч I_{r2} и сопутствующие ему границы диффузной составляющей сместятся в соответствующем направлении.

Следует учесть, что приведенные в выражениях для $\Delta\vartheta$ и $\Delta\varphi$ расширения ДОР относятся к линейной величине E_r , взятой по уровню $1/e$. Для энергетических характеристик это расширение составит $\frac{1}{2}e \approx 0,13$ от максимума.

Аппроксимируя ДОР функцией $\cos \alpha$, находим, что уровень 0,13 соответствует $\alpha = 82,5^\circ$, а уровень 0,8, к которому желательно привести ДОР, соответствует углу $\alpha = 53^\circ$ ($0,83 \approx 0,5$)*.

Поэтому для нашего случая учета двойного отражения от двух граней следует значения $\Delta\vartheta$ и $\Delta\varphi$ умножить на поправочный коэффициент $K = 53^\circ/82,5^\circ = 0,64$, т. е. брать более узкую область рассеяния подстилающими поверхностями ДНА локатора $\Delta\vartheta_{\text{эф}} = \Delta\vartheta K$, $\Delta\varphi_{\text{эф}} = \Delta\varphi K$.

* Значение 0,8 выбрано из принятой в радиолокации оценки уровня ДНА, равной 0,5 по мощности с учетом дополнительных отражений от двух граней ШУО.

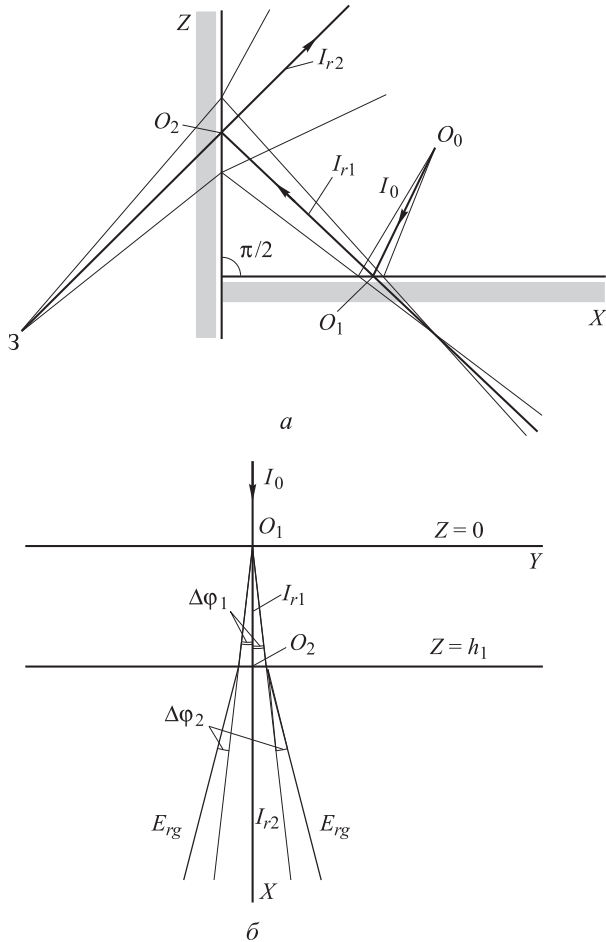


Рис. ПЗ.7. Схемы уширения луча при падении на ШУО в разных плоскостях:

a – плоскость XZ ; *b* – плоскость XY

Очевидно, что для реальной ДНА, имеющей конечную ширину в обеих плоскостях, общее расширение будет суммой влияния ДНА и ДОР обеих граней ШУО. Чтобы отраженный от ШУО луч попал в диаграмму направленности приемной антенны, необходимо, чтобы отклонение отраженного луча от падающего не превысило общего угла:

$$\Delta\theta \leq \theta_{0,5\text{ант}} / 2 + \Delta\vartheta_{\text{эф1}} + \Delta\vartheta_{\text{эф2}};$$

$$\Delta\varphi \leq \varphi_{0,5\text{ант}} / 2 + 2\Delta\varphi_{\text{эф1}} + 2\Delta\varphi_{\text{эф2}}.$$

В этом случае ЭПР от ШУО может быть значительной.

Оценим уровни сигналов, поступающих после отражения от граней ШУО. Поскольку ЭПР ШУО будет определяться в нашем случае площадью ЭР S_p , то следует говорить об УЭПР граней, а не их ЭПР. При очень большой площади S_p радиолокатора ЭПР ШУО может определяться либо размерами граней ШУО, участвующих в отражении, либо величиной S_p . В большинстве случаев площадь ЭР будет определяться известным выражением

$$S_p = l_r l_\varphi,$$

($l_r = \frac{c\tau}{2\sin\vartheta}$; $l_\varphi = D\varphi_{0,5}$) или размерами грани у объекта при его небольших габаритах. Естественно, в отраженном сигнале будет превалировать диффузная составляющая. Оценим размеры такой составляющей.

Прямые эксперименты по двухпозиционному рассеянию от шероховатых поверхностей проводились на волне $\lambda = 3,2$ см, при которых исследовались сигналы, отраженные во всех направлениях от двух типов поверхностей – кирпичной стены и травяного покрова.

Анализ интенсивности отраженных в зеркальном направлении сигналов показывает их резкое увеличение при углах зондирования $\psi < \psi_p$ (см. табл. П3.1, последний столбец). Для кирпичной стены увеличение интенсивности сигнала начинается с углов $\psi = 25...20^\circ$; при $\psi \approx 0$ $\Delta I = 12$ дБ; для углов $\psi > \psi_p$ $\Delta I \approx 0$.

Таким образом, уровень сигнала, отраженного в зеркальном направлении ($\vartheta_r = \vartheta_0$), по данным как теории, так и эксперимента не меньше, чем при зондировании шероховатой

поверхности при $\vartheta = 0$ (нормальное падение на ПП – $I_0(0)$). Исходя из этого в первом приближении можно принять уровень I_0 за уровень сигнала, отраженного в зеркальном направлении для углов $0 < \vartheta < \vartheta_p$, где ϑ_p определяется из формулы Релея. При $\vartheta > \vartheta_p$ уровень сигнала можно считать растущим линейно (в децибелах) вплоть до $\vartheta = 90^\circ$. Для $\lambda = 0,8$ см ϑ_p увеличится по сравнению с углами для $\lambda = 3,2$ см и составит: для кирпича $\vartheta_p = 83^\circ$ ($\psi_p = 7^\circ$), а для травяного покрова $\vartheta_p = 86^\circ$ ($\psi_p = 4^\circ$).

Таким образом, увеличение уровня I_0 для нашего случая практически не реализуется и его в дальнейших расчетах

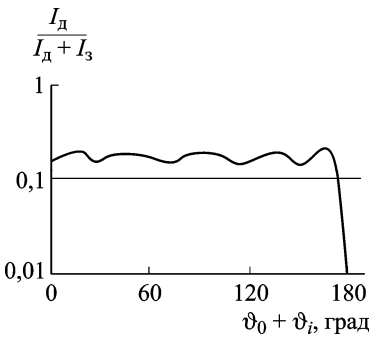


Рис. ПЗ.8. Экспериментальные данные по диффузной составляющей отражения от песка на $\lambda = 0,8$ см

можно не учитывать. Подтверждением этому служит рис. ПЗ.8, на котором приведены данные эксперимента по диффузной составляющей отраженной от гладкой песчаной поверхности на $\lambda = 0,86$ см относительно прямого сигнала [43]. Видно, что до рэлеевских углов $\vartheta_0 + \vartheta_r \approx 180^\circ$ диффузная составляющая постоянна и лишь при 180° начинает преобладать зеркальная составляющая.

При малых углах скольжения ($\psi \leq 7 \dots 5^\circ$) для реальных ДНА можно считать, что для $\lambda = 0,8$ см на вторую грань ШУО падает прямой луч от локатора и в отражении участвует лишь одна грань (стенка), а не ШУО в целом.

Как следует из данных, приведенных в табл. ПЗ.1, к поверхностям, где отражение происходит в слое (затухание $L < 3$ дБ) следует отнести: травяной покров, лед, снег, кир-

пич. При этом из-за малой толщины слоя сдвиг луча не существен и следует учитывать лишь ослабление в слое. Исходя из значений $\sigma^0(0)$, которое учитывает затухание в слое, можно из этого списка исключить также все поверхности, кроме травяного покрова. Затухание сигнала в траве можно принять постоянным, не зависящим от ϑ и равным 10 дБ (см. разд. 4).

Таким образом, ЭПР ШУО будет определяться выражением $\sigma = \sigma^0 S_p$. Выражения для S_p обсуждались ранее, значение σ^0 вычисляется по формуле

$$\sigma^0(0) = \frac{G_g}{G_0},$$

где G_0 – коэффициент усиления ДНА радиолокатора, $G_0 \cong \frac{35000}{\theta_{0,5}\varphi_{0,5}}$; G_g – ДОР, учитывающая расширение лучей при двойном отражении от поверхностей ШУО,

$$G_g = \frac{35000}{(\theta_{0,5} + 2\Delta\vartheta_1 + 2\Delta\vartheta_2)(\varphi_{0,5} + 2\Delta\varphi_1 + 2\Delta\varphi_2)}.$$

Рассмотрим несколько примеров расчета σ для различных пар поверхностей.

Будем считать $G_0 = 1000$, т. е. $\theta_{0,5} = 6^\circ$, $\varphi_{0,5} = 6^\circ$.

Пара бетон – асфальт – $\sigma^0(0) = +15$ дБ = 32

$$\frac{G_g}{G_0} = \frac{6 \cdot 6}{(6 + 6 + 30)^2} = \left(\frac{6}{42}\right)^2 = \frac{1}{7^2} = \frac{1}{49} = 0,02;$$

$$\sigma^0 = 32 \cdot 0,02 = 0,64 = -4 \text{ дБ} = 0,64.$$

Для $S_p = 25 \text{ м}^2$ $\sigma = \sigma^0$, $S_p = 0,64 \cdot 25 = 16 \text{ м}^2$.

Угол ДОР ШУО $\sim \pm 20^\circ$ в обеих плоскостях.

Пара бетон – бетон

$$\frac{G_g}{G_0} = \frac{6 \cdot 6}{(6+6+6)^2} = \left(\frac{6}{18}\right)^2 = \frac{1}{3^2} = 0,11; \quad \sigma^0 = 18 \text{ дБ};$$

$$\sigma^0 = 18 \text{ (дБ)} \cdot 0,11 = 63 \cdot 0,11 = 7 \frac{\text{М}^2}{\text{М}^2} = 8,5 \text{ дБ};$$

$$\sigma = \sigma^0 S_p = 25 \cdot 7 = 175 \text{ м}^2.$$

Угол ДОР $\sim \pm(7,5 \times 7,5)^\circ$ в обеих плоскостях.

Пара бетон – трава

$$\frac{G_g}{G_0} = \frac{6 \cdot 6}{(6+6+20)^2} = \left(\frac{6}{32}\right)^2 \cdot 0,1 = \frac{0,1}{5^2} = 0,004 = -24 \text{ дБ};$$

$$\sigma^0 = 0,004 \cdot 63 = 0,25 \frac{\text{М}^2}{\text{М}^2};$$

$$\sigma = \sigma^0 S_p = 0,25 \cdot 25 = 6,25 \text{ м}^2.$$

Угол ДОР $\sim \pm 16^\circ$ в обеих плоскостях.

Таким образом, ДОР ШУО для этого случая можно представить в виде косинусообразной фигуры с угловым раствором, определяемым суммой углов первичной ДНА и ее расширений, зависящих от параметров шероховатости σ_h и l_{xy} (рис. ПЗ.9).

Наличие окон, балконов, автомобилей и других неоднородностей, расположенных на одной или обеих гранях ШУО, может исказить ДОР и изменить величину ЭПР. Это искажение может быть учтено использованием принципа суперпозиции – учетом основного ШУО и дополнительных элементов на его гранях.

Необходимо также учитывать возможное затенение областей отражения на гранях ШУО посторонними предметами (деревьями, другими постройками, автомобилями). Особенно существенно это может сказываться в условиях городского ландшафта узких улиц с высокими зданиями.

Рассмотрим уголкового образования, состоящие из плоской поверхности и цилиндрического тела. Сюда можно отнести: опоры мостов на воде, столбов на траве или асфальте, баков для хранения легковоспламеняющихся жидкостей, колонн, стволов деревьев и т. д.

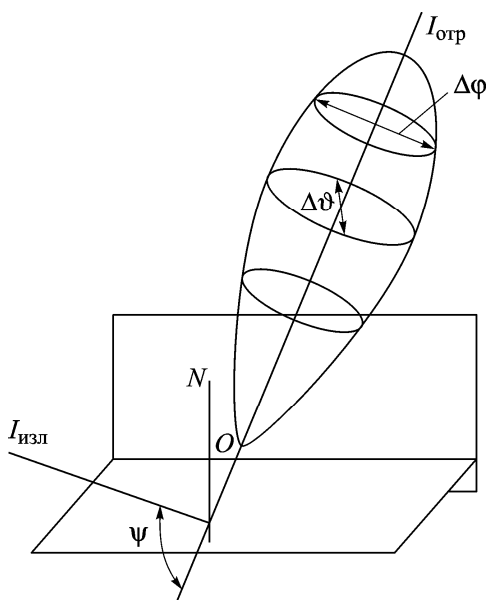


Рис. П3.9. Схема формирования ДОР ШУО

Поскольку цилиндрические поверхности имеют круговую ДОР в азимутальной плоскости, то практически всегда будем иметь стабильный уголкового эффект. Однако следует учитывать малую ЭПР цилиндрических поверхностей.

Так, конечный цилиндр радиусом a и длиной L имеет зеркальную составляющую ЭПР

$$\sigma_{\text{ц.з}} = \frac{2\pi}{\lambda} a L^2 \sin \vartheta \left[\frac{\sin \frac{2\pi}{\lambda} L \cos \vartheta}{\frac{2\pi}{\lambda} L \cos \vartheta} \right]^2,$$

где ϑ – угол между осью цилиндра и направлением излучения.

Для $a = 1$ м, $L = 1$ м, $\lambda = 0,01$ м имеем

$$\sigma_{\text{ц.з}}(90^\circ) = 2\pi \cdot 100 \cdot 1(\text{м}^2) = 630 \text{ м}^2.$$

Диффузная составляющая при $\vartheta = 90^\circ$

$$\sigma_{\text{ц.з}}(90^\circ) = 2\pi \cdot 1 \cdot a \cdot \sin \vartheta = 6,3 \cdot 1 = 6,3 \text{ м}^2.$$

Для бесконечного цилиндра при $D = 1000$ м и $\theta_{0,5} = 0,05 = 3^\circ$

$$\sigma_{\text{ц.з}}(0) = \pi \cdot D \cdot a = 3140 \text{ м}^2,$$

$$\sigma_{\text{ц.д}} = 2\pi \Delta a \theta_{0,5} \cdot \sin^2 \vartheta = 6,3 \cdot 1 \cdot 1000 \cdot 0,05 = 315 \text{ м}^2.$$

Для $L = 5$ м $\sigma_{\text{ц.з}}(0) = \pi D a = 3140 \text{ м}^2,$

$$\sigma_{\text{ц.д}} = 2\pi a \cdot 5 \cdot \sin^2 \vartheta = 6,3 \cdot 5 = 31,5 \text{ м}^2.$$

Следует учесть, что для ШУО зеркальная составляющая может практически отсутствовать, т. е. $\sigma_{\text{ц}} \approx 30 \text{ м}^2$.

Таким образом, для расчета ЭПР ШУО с цилиндрическими поверхностями следует учитывать одинарное расширение ДОР на плоской поверхности и отражение от цилиндрической поверхности в широком диапазоне углов по азимуту и расширение ДОР по углу места $\Delta\vartheta_2$ на цилиндре. Необходимо также учитывать размеры ЭР – l_r и l_φ .

ДОР в азимутальной плоскости при $l_{\varphi 1} > 2a$ будет практически всенаправленной, а по углу места определяться рас-

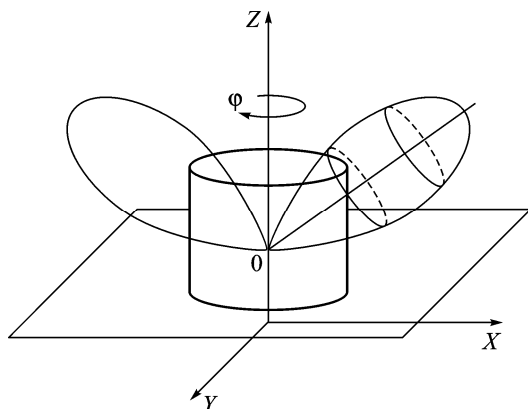


Рис. ПЗ.10. Схема ДОР от цилиндрической вертикальной поверхности

ширением $\Delta\vartheta_1$ и $\Delta\vartheta_2$ на цилиндре вокруг зеркального направления, т. е. (рис. ПЗ.10)

$$G_g = \frac{35\,000}{(\theta_{0,5} + 2\Delta\vartheta_1 + 2\Delta\vartheta_2)(\varphi_{0,5} + 2\Delta\varphi_1)}.$$

Для $l_\varphi < 2a$ ДОР будет определяться величиной сектора зеркального отражения основной ДНА плюс $2\Delta\varphi_1$. В остальном ЭПР определяется как и в предыдущем случае.

Научное издание

**Павельев Виталий Александрович
Хаминов Дмитрий Васильевич**

**РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН
МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
ПРИРОДНЫМИ И АНТРОПОГЕННЫМИ
ОБЪЕКТАМИ**

Редактор *Н.Е. Овчеренко*
Технический редактор *Э.А. Кулакова*
Художник *Н.Г. Столярова*
Корректор *Р.В. Царева*
Компьютерная графика *О.В. Левашовой*
Компьютерная верстка *О.В. Беляевой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Санитарно-эпидемиологическое заключение
№77.99.60.953.Д.003961.04.08 от 22.04.2008 г.

Подписано в печать 06.07.09. Формат 60×90 1/16.
Усл. печ. л. 17,5. Тираж 500 экз.
Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
E-mail: press@bmstu.ru.
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5.

Отпечатано в ГУП ППП «Типография «Наука».
121099, Москва, Шубинский пер., 6.