11

Исследование просветного рассеяния СВЧ-излучения на телах произвольной формы

© Н.А. Дугин,[1,2] Е.А. Панков[1,2]

[1] Научно-исследовательский радиофизический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Россия
[2] Волжский государственный университет водного транспорта,
Нижний Новгород, Россия
e-mail: ndugin@yandex.ru

Поступило в Редакцию 25 марта 2026 г.
В окончательной редакции 20 июня 2026 г.
Принято к публикации 7 июля 2026 г.

Рассмотрены результаты исследований дифракции СВЧ-излучения на плоских телах произвольной формы, моделирующие эффект просветной радиолокации. Эксперименты проводились дважды: в лабораторных условиях закрытых помещений и на открытом пространстве радиоастрономической обсерватории НИРФИ ННГУ. Измерена диаграмма рассеяния СВЧ-излучения на плоских телах в направлении „вперед“ с четким „просветным“ максимумом на оси в тени объекта; величина максимума не превышает 95% уровня „прямого“ сигнала для тел разного размера. Оценена нижняя граница соотношения размеров мишеней L к длине волны λ — объект должен быть более чем в 15–20 раз больше ($L > 15\lambda$). Наблюдается угловой сдвиг „просветного“ максимума в двух плоскостях от нормали к поверхности мишени в зависимости от характера несимметрии формы объекта. Величина отклонения пропорциональна относительным (к длине волны) размерам объекта. Выявлены некоторые особенности исследованной дифракции, для правильной интерпретации которых потребуется проведение дополнительных экспериментальных и теоретических исследований.

Ключевые слова: СВЧ-излучение, дифракция, просветное рассеяние.

DOI: 10.61011/JTF.2027.01.64190.79-26

Введение

В последние годы сотрудниками НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского проводятся исследования возможности применения метода радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) в бистатических РЛС, в том числе изучение и практическое применение эффекта просветной радиолокации [1–4].

Просветный эффект заключается в существенном (на 2–3 порядка) возрастании рассеянного объектом зондирующего сигнала по направлению „вперед“ по линии „передатчик–приемник“ по сравнению с отраженным „назад“ (см., например, [5]). Основные положения просветной локации можно сформулировать следующем образом:

1) рассеяние происходит на теневом контуре объекта и не зависит от формы и материала, из которого он сделан;

2) размер объекта L должен быть много больше длины волны λ зондирующего сигнала ($L \gg \lambda$);

3) эффективная площадь рассеяния (ЭПР, RCS — Radar Cross Section) объекта по направлению „вперед“ рассчитывается по соотношению [5] $\mathrm{RCS} = 4\pi(S/\lambda)^2$, где S — площадь апертуры объекта;

4) зона просветного рассеяния узкая (не превышает $\pm 5^\circ$), максимум рассеянного сигнала находится на линии максимума излучения зондирующего сигнала.

При подготовке экспериментов — выборе частотных диапазонов, источников зондирующих сигналов, исследуемых объектов и теоретическом анализе ожидаемых сигналов [6] — возникли вопросы по практической реализации перечисленных положений, а именно — количественной оценке границы понятия „много больше“, реальности расчетов ЭПР по приведенной формуле п. 3, ширины диаграммы рассеяния и направления максимума рассеянного излучения. Для лучшего понимания процесса „просветной“ дифракции и оценки ожидаемых уровней рассеянного объектом принимаемого сигнала были проведены исследования дифракции СВЧ-излучения на плоских объектах (мишенях) произвольной формы сначала в лабораторных условиях относительно небольших закрытых помещений, технические детали которы описаны в работе [7], и далее (после анализа результатов этих измерений) на открытом пространстве радиоастрономической обсерватории „Зименки“ НИРФИ ННГУ.

Исследования дифракции света на объектах различной формы проводились с самого начала развития оптики, результаты многочисленны и известны (например, [8]). Подробный обзор методов расчета дифракционных явлений в радиодиапазоне дан в методической работе [9]. В работе [10] приводятся, например, условия дальней зоны для объектов разных размеров при отражении и рассеянии на них радиоволн. Из-за сложности расчетов чаще всего рассматриваются объекты симметричной

Значения L/λ для объектов с указанными L на частотах F

Объекты	Частоты F (GHz)/ размеры L (m)		F1 8.2	F2 10.2	F3 11.8	F4 15	F5 17.8
„Прямоугольник“ 	$L_{\min}$	0.35	9.57	11.91	13.78	17.51	20.78
	$L_{\max}$	0.56	15.32	19.05	22.04	28.02	33.25
„Трапеция“ 	$L_{\min}$	0.395	10.80	13.44	15.55	19.76	23.45
	$L_{\max}$	0.455	12.45	15.48	17.91	22.77	27.02
„Груша“ 	$L_{\min}$	0.345	9.44	11.74	13.58	17.26	20.48
	$L_{\max}$	0.46	12.58	15.65	18.11	23.02	27.31
„Овал“ 	$L_{\min}$	0.29	7.93	9.87	11.41	14.51	17.22
	$L_{\max}$	0.5	13.68	17.01	19.68	25.02	29.69

или упрощенной формы, для которых можно получить аналитический вид дифракционной диаграммы. Эффекты отражения и рассеяния радиоволн хорошо изучены в радиолокации. Тем не менее описанный эксперимент позволяет более подробно рассмотреть эффект „просветной“ локации, развитие которой происходит достаточно интенсивно.

1. Схемы установок и условия проведения экспериментов

Были выбраны и изготовлены из различных материалов мишени разных размеров, и определен частотный диапазон. В качестве мишеней использовались:

• три круглых диска диаметром 30, 43 и 55 cm, изготовленные из углекомпозитного материала, аналогичного металлическому по отражательным свойствам, но имеющих шероховатые края;

• поглощающий материал диапазона 10 GHz — квадрат со стороной 34 cm;

• плоские фигуры неправильной формы, выполненные из композитного материала на 3D-принтере ИПФ РАН [11]; две мишени имели гладкую форму контура, две имели несколько острых углов; их характеристики приведены в таблице.

Размеры мишеней отличаются максимально в 2.3 раза. Измерения проводились на четырех частотах: 8.2, 10, 11.8 и 17.8 GHz в помещении ННГУ. Соответственно длины волн составляли 3.66, 3.00, 2.54 и 1.68 cm. На РАО — 8.4, 10.4, 11.8 и 15 GHz, длины волн составляли 3.57, 2.88, 2.54 и 2 cm. Величина L/λ варьируется в пределах от 8 до 33. Коррекция рабочих частот вызвана подстройкой под АЧХ приемо-передающих трактов использованных антенн.

Первые эксперименты проводились в самом большом помещении кафедры распространения радиоволн и радиоастрономии ННГУ им. Н.И. Лобачевского, предназначенном для лабораторных работ по изучению антенных систем, в том числе по измерению диаграмм направленности (ДН) антенн диапазона 10–20 GHz (в тексте — эксперимент „ННГУ“). Излучатель и приемное устройство были разнесены на максимально возможное расстояние, мишени передвигались перпендикулярно линии „излучатель–приемник“ на расстоянии 6 m как от приемной, так и от излучающей антенн. Такая схема моделировала условия реальных экспериментов, описанных в работах [3,4], когда объекты двигались в пространстве между источником зондирующего сигнала и наземной приемной антенной. Кроме того, была использована возможность измерения диаграммы рассеяния мишеней перемещением приемной антенны при неподвижной мишени, установленной на линии „передатчик–приемник“. Мишени и приемная антенна передвигались вручную в большинстве замеров в пределах ± 50 cm

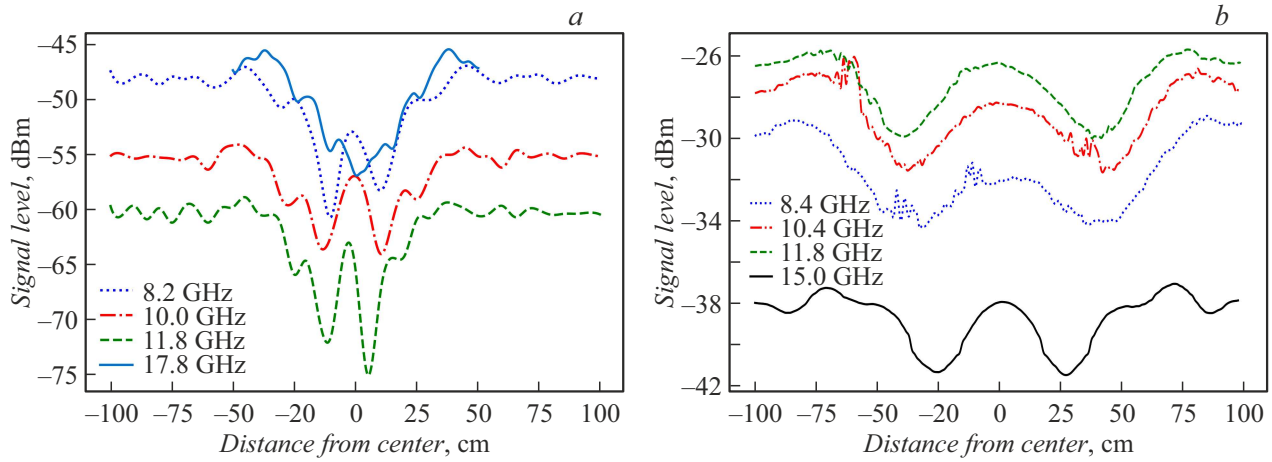


Рис. 1. Зависимость величины рассеянного сигнала от расстояния мишени от линии „излучатель–приемник“ для круга диаметром 43 cm: *a* — „ННГУ“, *b* — „РАО“.

от центральной линии „излучатель–приемник“ с шагом 2 cm, что позволяло считать влияние переотражений излучения от стен и внешних предметов на результирующий сигнал пренебрежимо малым. Использование приемной антенны с достаточно узкой ДН позволяло существенно подавить паразитный сигнал, отраженный от пола (высота антенн и мишеней над полом составляла 1.5 m).

Однако при работе с близким расположением излучающей антенны важно то, что на мишень приходит не плоская, а сферическая волна, и на краях мишеней появляется дополнительный фазовый сдвиг. Для объектов симметричной формы это обстоятельство не должно влиять на центральный максимум диаграммы рассеяния, для несимметричных мишеней в процессе работы возникли определенные сложности с проведением экспериментов и интерпретацией результатов. Заметим, что в радиолокации при расчете отраженного сигнала большое внимание уделяется распределению зон Френеля на поверхности цели, а изменение поля на краях объекта вносит дополнительные искажения в рассеянный сигнал. Все мишени в „ННГУ“ находились в пределах первой зоны Френеля, хотя пока неясно, насколько это важно в нашем случае. Однако при изменении поля на краях мишеней также возможны дополнительные дифракционные вариации амплитуды измеряемого сигнала (аналогично дифракции света на круглом диске).

Вторая серия измерений проводилась на открытой площадке у технологического здания РАО НИРФИ „Зименки“ (в тексте — „РАО“). Сотрудником обсерватории К.П. Стручевым была создана специальная система подвески мишеней и их плавного автоматического перемещения с выбранной скоростью в требуемой пространственной зоне. Расстояния от мишеней до передающей и приемной антенн составляли примерно 24 m. Фронт падающей на мишени волны — практически плоский. В диапазоне 8–12 GHz применялись эталонные серийные антенны П6-23А, на частоте 15 GHz — небольшие антенны лабораторного практикума кафедры, генератор — R&S SMF100A, в качестве приемника использовалась детекторная головка Keysight LAN Power Sensor (L2062XA). Скорость движения мишени — 7.14 cm/s, темп считывания данных приемной системы — 8 раз в секунду. Мишени передвигались в пределах ± 100 cm перпендикулярно центральной линии для точной фиксации уровня „прямого“ сигнала; замеры для повышения точности и надежности проводились дважды — при движении „туда и обратно“, поскольку на некоторых частотах возникали внешние помехи, а также наблюдались колебания мишеней из-за порывов ветра. Высота расположения антенн и мишеней над поверхностью земли — около 2 m, высокий травяной покров позволял существенно уменьшить отраженный от земли сигнал.

2. Основные результаты для объектов симметричной формы

В первую очередь необходимо было зафиксировать наличие „просветного“ максимума (аналога „пятна Пуассона“ в оптике — сигнал на осевой линии в тени мишени) и определить его интенсивность относительно „прямого“ сигнала, т. е. фактически „просветную“ ЭПР в зависимости от отношения размеров объекта к длине волны.

На рис. 1 в качестве примера приведены графики зависимости величины принимаемого (рассеянного) сигнала от положения мишени на линии передвижения, полученные в двух экспериментах (на рис. 1, *b* видны импульсные помехи в некоторых зонах). Общие характерные особенности:

• центральный максимум диаграммы рассеяния (ДР) проявляется для всех мишеней, но в ряде случаев для

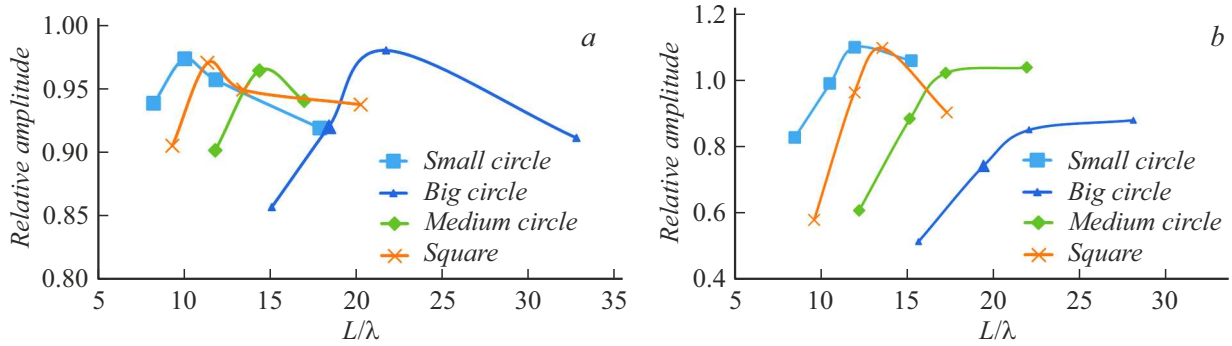


Рис. 2. Зависимости величины измеренных максимумов диаграмм рассеяния, нормированные к величине „прямого“ сигнала излучателя: *a* — „ННГУ“, *b* — „РАО“.

больших отношений L/λ выражен слабо; форма главного максимума хорошо описывается гауссовой функцией;

• при увеличении размера мишени заметно искажение формы центрального максимума, и появляются большие „боковые лепестки“;

• при значительном сдвиге мишени от центра перед установлением постоянной амплитуды „прямого“ сигнала в ряде случаев наблюдается некоторое увеличение уровня принимаемого сигнала;

• также в отдельных случаях наблюдалось некоторое превышение максимума ДР над уровнем „прямого“ сигнала.

На рис. 2 даны зависимости величины максимумов диаграмм рассеяния, нормированные к величине „прямого“ сигнала излучателя. Видно, что в обоих экспериментах вместо непрерывного роста ЭПР (согласно соотношению п. 3 Введения) наблюдается тенденция к установлению некоторого постоянного уровня порядка 0.8–0.95 от уровня „прямого“ сигнала, причем на графиках „ННГУ“ виден экстремум для всех мишеней, а для „РАО“ — только для самых малых объектов и, кроме того, его уровень превышает на несколько процентов уровень прямого сигнала. Помимо этого, на рис. 2, *b* наблюдается различие кривых при разных размерах кругов, что, скорее всего, определяется шириной диаграммы рассеяния, которая при увеличении L/λ становится уже. Из анализа этих результатов был сделан вывод, что наиболее стабильные характеристики рассеянного сигнала получаются при отношении L/λ превышающем 15–20.

Были также проведены оценки ширины главного максимума диаграммы рассеяния, которая рассчитывается по соотношению λ/L. Эксперименты показали, что нет четкой зависимости уменьшения ширины ДР при увеличении размеров мишеней и уменьшении частоты. Это связано, в первую очередь, с тем, что сложно определить уровень половинной мощности при размывании „склонов“ главного максимума. Кроме того, для того чтобы корректно измерить диаграмму рассеяния, необходимо передвигать приемную антенну при неподвижной мишени. Измерения показали, что в этом случае ширина ДР получается примерно в два раза больше измеренной при перемещении мишени. Т. е. возможно отклонение луча от нормали к поверхности при удалении мишени от центральной линии из-за изменения распределения фазы по объекту (сферичности падающей волны).

3. Основные результаты для объектов несимметричной формы

Для мишеней неправильной формы в „ННГУ“ сразу было определено смещение максимума рассеянного сигнала от осевой линии и искажение его формы (отличие от гауссовой функции). Для большей уверенности в наличии этого эффекта мишени разворачивались на 180° вокруг условно выбранной вертикальной оси, и измерения повторялись. На рис. 3 показаны диаграммы рассеяния для двух фигур (с гладкой и угловатой формой) при двух положениях относительно излучателя. Хорошо видна симметрия графиков, точка пересечения указывает на положение осевой линии (немного сдвинутой от расчетной за счет неточности определения направления линии между антеннами). Сдвиг максимумов диаграммы рассеяния в пределах ошибок измерений пропорционален L/λ.

Отметим следующую особенность: на рис. 3, *a* „замывается“ (искажается) склон главного максимума, обращенный в сторону сдвига, что объяснимо. Однако на рис. 3, *b* „замывается“ противоположный склон. Для двух других несимметричных мишеней наблюдается такая же особенность, которую не удалось связать с формой и размерами мишеней.

Было очевидно, что если есть смещение максимума рассеянного сигнала в одной плоскости при несимметричной форме объекта, то должно быть смещение и в другой. Это обстоятельство указывает на то, что в эксперименте „ННГУ“, где мишени устанавливались только на одной высоте, возможны ошибки в расчетах измеряемых величин (относительной амплитуды максимума диаграммы и его ширины) и соответственно приводимые результаты надо считать оценочными. В эксперименте „РАО“ при создании системы передвижения мишеней была заложена возможность изменения высоты их под-

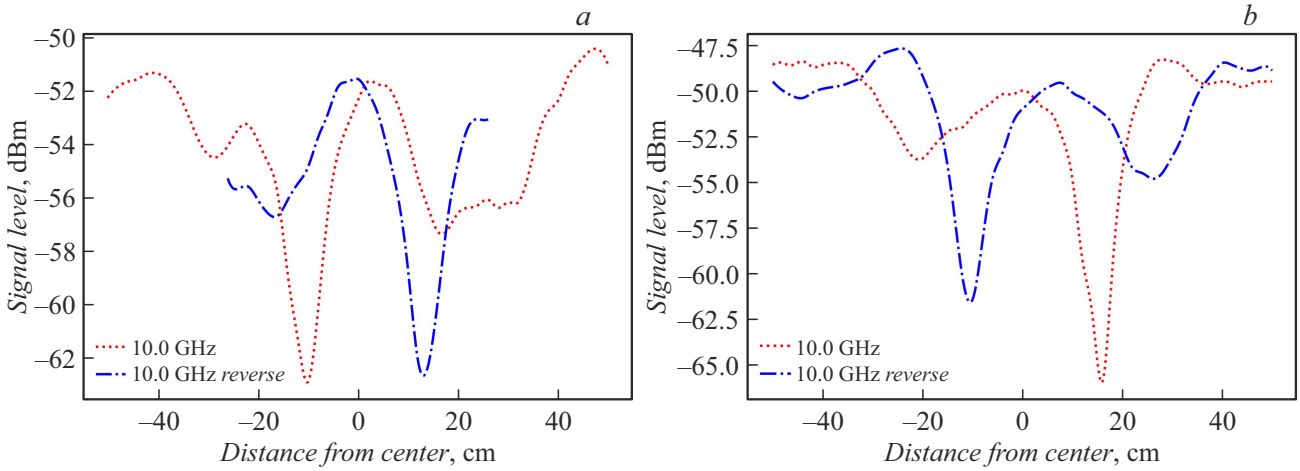


Рис. 3. Зависимость величины рассеянного сигнала при двух положениях мишени — прямом и повернутом на 180° (*a* — объект „груша“, *b* — объект „прямоугольник“).

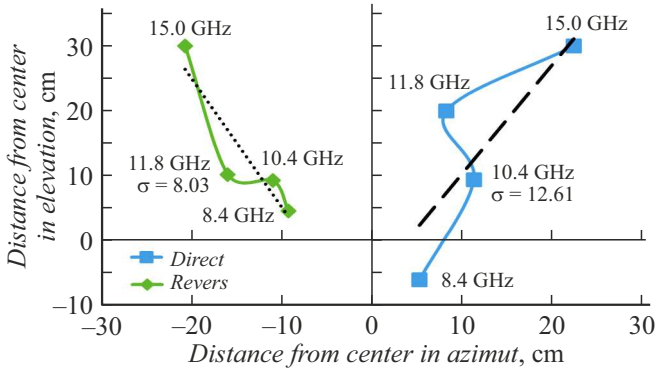


Рис. 4. Зависимость изменения координат мишени „прямоугольник“ при максимуме рассеянного сигнала в прямом (справа) и обратном положениях. Пунктир — линии аппроксимации с указанием погрешности.

вески. В зависимости от размеров и не симметрии формы мишеней, измерения проводились при 3–5 положениях объектов по высоте с шагом сдвига 5 и 10 cm, и также в двух положениях относительно условной вертикальной оси — прямом и повернутом на 180° („обратном“). По построенным в координатах мишени „высота–сдвиг от центральной линии–амплитуда“ измеренным кривым проводился поиск максимума сигнала с последующим уточнением всех параметров сдвига. На рис. 4 показаны исходные данные о том, в каком положении находится мишень при перемещении ее на плоскости „высота–азимут“ при максимуме дифракционной диаграммы в зависимости от L/λ для самого большого объекта („прямоугольника“). Видно, что разброс данных достаточно велик, но при их аппроксимации линейной функцией (пунктирные линии) углы наклона практически одинаковы; на графике указана погрешность аппроксимации. Фактически этот результат показывает отклонение рассеянного луча от нормали к поверхности мишени.

Для меньших по размеру мишеней разброс данных возрастает, погрешность увеличивается (особенно для самого малого объекта с L/λ порядка 8–10), но углы наклона линии аппроксимации также близки. На рис. 5 приведены зависимости изменения положения мишеней при максимальном рассеянном сигнале для всех четырех не симметричных объектов, угол наклона — средний по двум замерам. Видно, что с увеличением относительного размера мишени отклонение луча от нормали увеличивается. Для использованных в эксперименте мишеней максимальные углы отклонения достигают 0.7°. Эти данные также подтверждают вывод о том, что просвет-

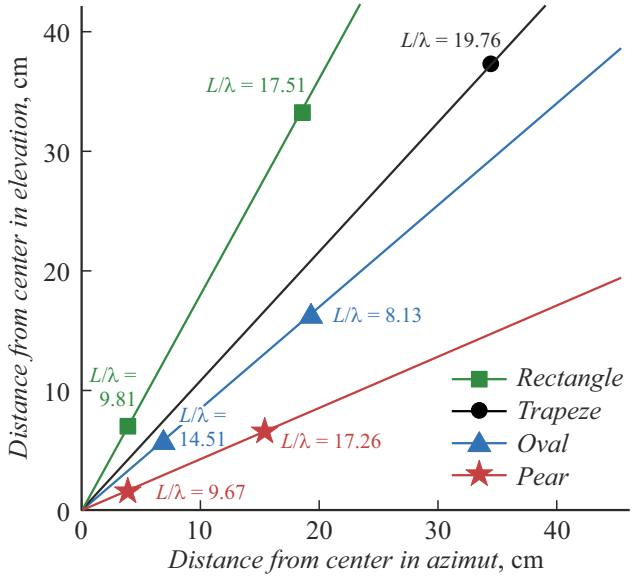


Рис. 5. Зависимости изменения координат мишеней при максимуме рассеянного сигнала для четырех несимметричных объектов: „прямоугольник“, „груша“, „трапеция“, „овал“.

ный эффект стабильно наблюдается при отношении L/λ больше 15.

Большой разброс данных измерений может быть вызван несколькими причинами: раскачиванием мишеней при их перемещении, погрешностями при многократной установке по высоте при „мягкой“ подвеске, наличием радиопомех на некоторых частотах и др. Однако общие тенденции изменения измеряемых параметров выражены достаточно четко, что позволяет сделать основные выводы.

Заключение

По результатам проведенных исследований сделаны следующие выводы:

1. Измерена диаграмма рассеяния СВЧ-излучения на плоских телах в направлении „вперед“ с четким „просветным“ максимумом на оси в тени объекта; величина максимума не превышает 95 % уровня „прямого“ сигнала для фигур разного размера. Этот результат не соответствует приведенному во Введении расчетному соотношению для ЭПР, но физически более понятен: ЭПР не может быть больше площади, ограниченной теневым контуром. Это хорошо согласуется с известным в оптике результатом: при размере круглого диска меньше первой зоны Френеля диск не оставляет тени [8].

2. Оценена нижняя граница соотношения размеров мишеней L к длине волны λ — объект должен быть более чем в 15–20 раз больше ($L > 15\lambda$).

3. Наблюдается угловой сдвиг „просветного“ максимума ДР в двух плоскостях от нормали к поверхности мишени в зависимости от характера несимметрии формы объекта. Величина отклонения пропорциональна относительным (к длине волны) размерам объекта.

Эти результаты показывают, что основная цель эксперимента достигнута: определены параметры сигналов при натурных измерениях просветного рассеяния на реальных объектах и условия достижения максимального эффекта в зависимости от взаимного расположения источника зондирующего сигнала и наблюдаемого объекта.

Но, кроме того, в ряде случаев выявлены некоторые особенности дифракционных явлений — небольшое превышение максимума ДР над уровнем „прямого“ сигнала, повышение уровня измеряемого сигнала относительно „прямого“ при вхождении мишени в зону облучения и выходе их нее, а также существенное различие в ширине максимума ДР, измеренного разными способами. Правильная интерпретация этих эффектов требует проведения дополнительных как экспериментальных, так и теоретических исследований. Очевидно, что необходимо сопоставить полученные результаты с особенностями дифракционных явлений в оптике и исследовать возможное влияние существенного различия в величине параметра L/λ на эти явления.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки: госзадание FSWR-2026-0011.

Благодарности

Авторы выражает благодарность зав. кафедрой распространения радиоволн и радиоастрономии радиофизического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского д.т.н. А.В. Калинину за предоставление возможности проведения исследований на оборудовании кафедры, К.П. Стручеву и Д.А. Смирнову за помощь в проведении экспериментов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Н.А. Дугин, А.Б. Бляхман. *Радиолокационный комплекс для обнаружения астероидов* (Пат. 2625542 Российская федерация, МПК RU 2 625 542 C1/ патентообладатель НИРФИ ННГУ — № 2016136255/28 (056981), заявл. 08.09.2016, бюлл. № 20)

[2] А.А. Антипенко, А.Ф. Дементьев, Н.А. Дугин, М.Б. Нечаева, Ю.В. Тихомиров. *Радиолокационный комплекс* (Пат. на изобретение № 2422849 (RU 2 422 849 C1) от 27.07.2011 (заявка № 2010106988, приоритет 24.02.2010, опубл. 27.06.2011, Бюл. № 18)

[3] Н.А. Дугин, М.Б. Нечаева, В.В. Безруков. Изв. вузов „Радиофизика“, **64** (12), 994 (2021). DOI: 10.52452/00213462_2021_64_12_994 [N.A. Dugin, M.B. Nechaeva, V.V. Bezrukov. Quant. Electron., **64** (12), 893 (2022). DOI: 10.1007/s11141-022-10187-y]

[4] Н.А. Дугин, Ю.В. Тихомиров, А.А. Антипенко, А.К. Чагунин, М.Б. Нечаева. *Возможности радиолокации воздушных объектов сигналами космических аппаратов*. II Всероссийская научная конференция „Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн“ — „Муром 2018“ (в рамках „VIII Всероссийских Армандовских чтений“) (26–28 июня, Муром, сборник трудов (электр.), 2018), с. 463–468.

[5] В.С. Черняк. *Многопозиционная радиолокация* (Радио и связь, М., 1993)

[6] Н.А. Дугин, Е.А. Панков. *Математическое моделирование эффекта просветной радиолокации при использовании широкополосных зондирующих сигналов*. Транспорт. Горизонты развития. 2024: Материалы международного научно-практического форума. (ФГБОУ ВО „ВГУВТ“, 2024), с. 68.

[7] Н.А. Дугин, Е.А. Панков, Д.А. Смирнов. *Лабораторные исследования дифракции СВЧ-излучения на плоских телах произвольной формы*. Тр. XXIX научной конференции по радиофизике, посвященной 80-летию радиофизического факультета (ННГУ, Нижний Новгород, 14–31 мая 2025)

[8] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики* (Наука, М.,1973)

[9] В.А. Тимофеев. *Рассеивающие свойства дискретных объектов в СВЧ диапазоне радиоволн* (ЯрГУ им. П.Г. Демидова, Ярославль, 2006)
[10] Е.А. Штагер, Е.В. Чаевский. *Рассеяние радиоволн на телах сложной формы* (Радио и связь, М., 1986)
[11] S. Korolyov, A. Goryunov, I. Illarionov, V. Parshin, P. Zemlyanukha. Sensors, **22** (19), 7132 (2022). DOI: 10.3390/s22197132