

УДК 621.396.969

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПРОСВЕТНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Дугин Николай Александрович^{1,2}, доктор физико-математических наук, профессор кафедры

e-mail: ndugin@yandex.ru

Панков Евгений Андреевич^{1,2}, аспирант

e-mail: pankevg98@yandex.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

² Научно-исследовательский радиопизический институт ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. Проведено лабораторное моделирование эффекта просветной радиолокации, основанное на изучении дифракции СВЧ излучения на плоских телах произвольной формы. Эксперименты проводились на оборудовании и в наибольшем по площади помещении кафедры распространения радиоволн и радиоастрономии ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Основным результатом данного исследования является подтверждение наличия просветного эффекта, но выявлен также ряд особенностей его проявления, для правильной интерпретации которых, возможно, потребуется проведение дополнительных экспериментальных и теоретических исследований.

Ключевые слова: локация на просвет, высокочастотное излучение, лабораторные исследования.

MODELING OF THE FORWARD SCATTER EFFECT IN LABORATORY CONDITIONS

Nikolai A. Dugin^{1,2}, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor

e-mail: ndugin@yandex.ru

Evgenii A. Pankov^{1,2}, Doctoral Student

e-mail: pankevg98@yandex.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

² Radiophysical Research University of Lobachevsky State University, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. Laboratory modeling of the forward scatter radio effect was carried out and based on the study of microwave radiation diffraction on flat bodies of arbitrary shape. The experiments were carried out on the equipment and in the largest laboratory of the Department of Radio Wave Propagation and Radio Astronomy of the Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod. The main result of this study is the confirmation of the presence of the forward scatter effect. However, a number of additional features of its manifestation were revealed, for the correct interpretation of which require additional experimental and theoretical studies.

Keywords: forward scatter radiolocation, high frequency radiation, laboratory research.

Введение

Изучение и практическое применение эффекта просветной радиолокации является в последние годы одним из важных направлений исследований бистатических РЛС, проводимых в том числе коллективом отдела радиоастрономических исследований НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского [1, 2]. Просветный эффект заключается в существенном возрастании рассеянного объектом зондирующего сигнала по направлению «вперед» по линии «передатчик-приемник» - на 2-3 порядка по сравнению с отраженным «назад». Главным условием возникновения просветного эффекта является многократное превышение размеров объекта в сравнении с длиной волны излучателя. При проведении экспериментальных исследований [3] возникла проблема интерпретации результатов при неопределённом положении объекта относительно линии «передатчик-приемник». Для оценки ожидаемых уровней принимаемых (рассеянных на объекте) сигналов и направления максимума диаграммы рассеяния было принято решение провести лабораторные измерения характеристик рассеяния СВЧ излучения на плоских мишенях различной формы, главным образом, для определения зоны просветного рассеяния и соотношения уровней прямого и рассеянного сигналов.

Описание эксперимента

Для проведения экспериментов использовалось лабораторное помещение размером примерно 14 x 5 метров. Приёмная и передающая антенны располагались на расстоянии 12 метров друг от друга, мишень передвигалась перпендикулярно линии «приёмник-передатчик» в центре данной конфигурации. Такая схема измерений соответствует условиям реального эксперимента, когда объект движется между источником зондирующего сигнала и приёмной антенной.

Измерения проводились на четырех частотах: 8.2, 10, 11.8 и 17,8 ГГц, длины волн соответственно: 3.66, 3.00, 2.54 и 1,68 см. Для всех длин волн мишени находятся в ближней (промежуточной) зоне приемной антенны, но сокращение дальней зоны невелико и качественно не влияет на конечные результаты. Это подтверждается данными лабораторных работ на этой установке: ДН антенны сформирована и практически соответствует расчетной. Более 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 влияет на центральный (просветный) максимум диаграммы рассеяния, для несимметричных мишеней возникают сложности с интерпретацией результатов.

В качестве излучателя с лабораторной установке применялся генератор Rohde & Schwarz SMF 100A в нашем частотном диапазоне – от 8 до 18 ГГц, в качестве приемника использовался спектроанализатор Rohde & Schwarz FSL18. Зондирующий сигнал излучался рупорными антеннам с широкими ДН для равномерного распределения мощности излучения по поверхности объекта во всей зоне его перемещения. Прием для повышения чувствительности проводился неподвижной узконаправленной антенной, ориентированной на передающую антенну.

Размеры, форма и материал исследуемых мишеней выбирались, исходя из основных положений просветной локации, которые заключаются в следующем:

- 1) рассеяние происходит на теневом контуре объекта и не зависит от его формы и материала;
- 2) размер объекта L должен быть много больше длины волны λ зондирующего сигнала ($L \gg \lambda$);



3) максимальная ЭПР объекта по направлению «вперед» рассчитывается по соотношению $\sigma = 4\pi (S/\lambda)^2$, где S – площадь апертуры объекта.

Поскольку граница понятия «много больше» точно не определена, были выбраны мишени разных размеров и несколько длин волн излучателей, крайние из которых отличаются более чем в 2 раза.

В качестве мишеней использовались:

- 1) три рефлектора дипольных антенн - круглые диски диаметром 30, 43 и 55 см, изготовленные из углекомпозитного материала, аналогичного по действию металлическому;
- 2) рефлектор овальной формы с длинами осей 49х25 см;
- 3) комбинация круглого и овального рефлекторов;
- 4) поглощающий материал диапазона 10 ГГц – квадрат со стороной 34 см;
- 5) плоские фигуры неправильной формы, выполненные из композитного материала на 3D принтере.

Важным аспектом процедуры измерений был выбор зоны перемещения мишени и шаг единичного сдвига. Оптимальным оказалось сочетание величины перемещения мишени $\pm 0,5$ м относительно центральной линии с шагом 2 см. Однако, при малом шаге с погрешностью установки мишени в нужную точку порядка нескольких миллиметров возрастала неравномерность измеряемых величин сигналов. Подобные искажения потребовали аппроксимации измеренных зависимостей гладкими функциями.

Предварительные результаты

На рисунке 1 показан график изменения рассеянного сигнала от круглого диска размером 55 см на четырёх частотах. Подобная картина характерна для мишеней симметричной формы: хорошо виден центральный просветный максимум, достаточно точно определяются его ширина и амплитуда в сравнении с «прямым» сигналом. Однако, прослеживается тенденция появления двух «боковых» лепестков диаграммы рассеяния при возрастании размера объекта (как на приводимом рисунке).

На рисунке 2 показаны графики изменения рассеянного сигнала от несимметричной мишени гладкой формы с максимальным размером 50 см. Форма и положение фигуры отображены в правом нижнем углу рисунка. На данных графиках хорошо видно отклонение максимума рассеянного луча от осевой линии и искажение его формы.

Выводы

По результатам данных экспериментов сделаны следующие предварительные выводы.

Определены требования к условиям лабораторных исследований по данной тематике и к соотношению размеров мишеней к длине волны (предварительно мишень должна быть более, чем в 15 раз больше); эти данные могут использоваться в планировании дальнейших экспериментов.

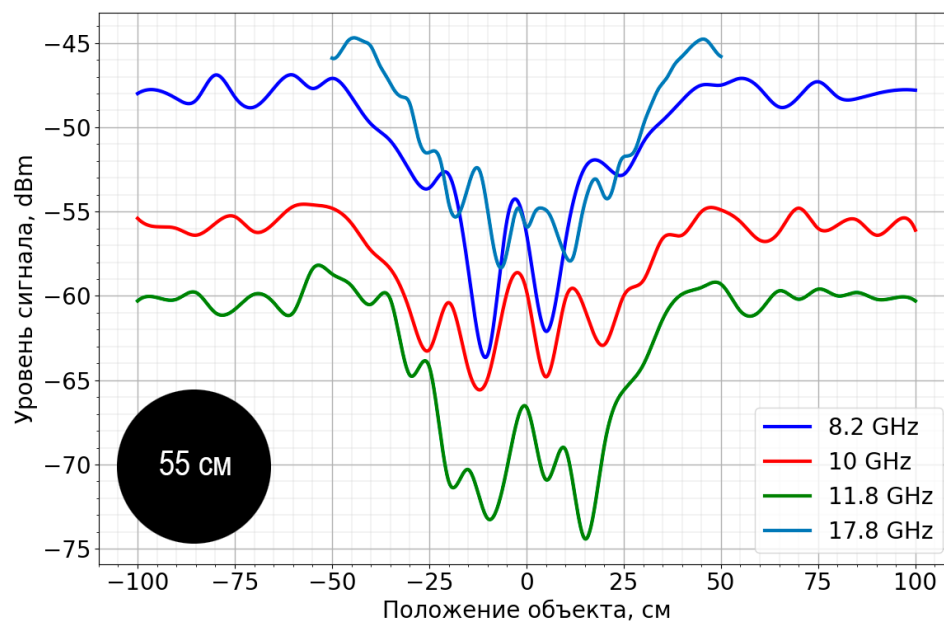


Рисунок 1 – Зависимость уровня рассеянного сигнала от положения объекта для круглого диска

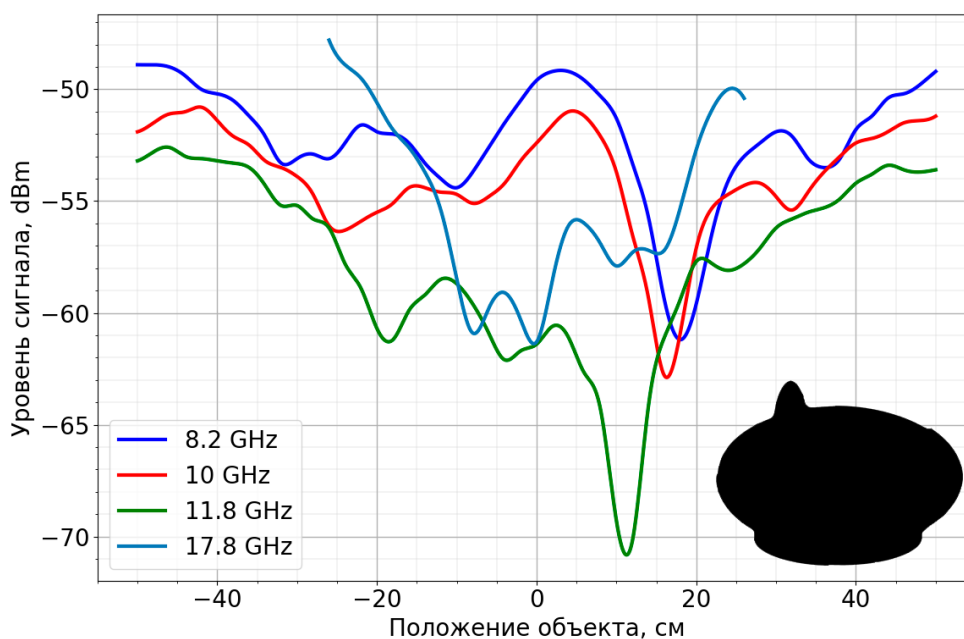


Рисунок 2 – Зависимость уровня рассеянного сигнала от положения объекта для несимметричного объекта

Подтверждено наличие просветного максимума при дифракции СВЧ излучения на плоских телах, величина его варьируется в пределах (75-95)% от максимального («прямого») сигнала для фигур разного размера. Этот результат не соответствует приведенному выше расчетному соотношению для ЭПР, но физически более понятен: ЭПР не может быть больше площади, замыкаемой теневым контуром. Но следует заметить, что практически для всех мишеней при выходе из зоны облучения заметно некоторое возрастание сигнала (рис.1), превышающее величину «прямого» сигнала (без мишени). Этот эффект можно объяснить интерференцией прямого и рассеянного сигналов, когда они оба попадают в ДН приемной антенны. Естественно, в дальнейших экспериментах следует исследовать это явление более подробно, так как в реальных условиях также возможно

возрастание уровня принимаемого рассеянного сигнала выше уровня зондирующего излучения.

Форма главного максимума просветной диаграммы рассеяния близка к гауссовой функции для симметричных фигур и искажена для не симметричных.

Наблюдается сдвиг просветного максимума от осевой линии в зависимости от величины искажений формы объекта. Правильная интерпретация этого эффекта может быть сделана только при учете сферичности волны зондирующего сигнала.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки: госзадание FSWR-2023-0038. Авторы выражают благодарность зав. кафедрой распространения радиоволн и радиоастрономии радиофизического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского д.т.н. А.В. Калинин за предоставление возможности проведения исследований на оборудовании кафедры и Д.А. Смирнову за помощь в проведении экспериментов.

Список литературы:

1. Дугин Н.А., Нечаева М.Б., Безруков В.В. // Возможности бистатических радиолокационных систем в решении задачи обнаружения потенциально опасных небесных тел. Изв.ВУЗов «Радиофизика», 2021, т.64, №12, С.994-1003.

2. Дугин Н.А., Тихомиров Ю.В., Антипенко А.А., Чагунин А.К., Нечаева М.Б. // 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»), 2018, 26-28 июня, Муром, сборник трудов (электр.), С.463-468.

3. Дугин, Н. А. Математическое моделирование эффекта просветной радиолокации при использовании широкополосных зондирующих сигналов / Н. А. Дугин, Е. А. Панков // Транспорт. Горизонты развития: Труды 4-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород-Новосибирск-Владивосток-Самара, 23–26 апреля 2024 года. – Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2024. – С. 68

