

УДК 621.396.67

ЯВЛЕНИЕ УМЕНЬШЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ СИНТЕЗИРОВАННОЙ РАДИОГОЛОГРАММЫ

В. Н. МИЗГАЙЛОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Введение

При традиционном подходе к голограмме (радиоголограмме) она рассматривается, прежде всего, как интерференционное устройство, обладающее уникальными способностями сохранять воспроизводимую информацию о фазе и амплитуде электромагнитных колебаний. Практически всегда обращалось внимание на возможность точного, детального восстановления изображения при считывании с голограммы. Иными словами, радиоголограмму рассматривали как дифракционную проектирующую (фокусирующую) изображение систему. Существует специальный параметр – эффективность голограммы, который характеризует степень использования голограммой доли падающего на нее излучения в формировании изображения. Поэтому рассеяние электромагнитного сигнала вело к потерям качества изображения и считалось вредным. Однако, если искажения считать полезным свойством, например, маскирующим, то становится очевидным, что явление уменьшения радиозаметности объекта, следующее из нетрадиционного подхода к радиоголограммам, заслуживает пристального изучения.

Целью данной работы является возможность пояснения появления отраженного сигнала в направлениях, отличных от принимаемого, в диапазонах радио- и оптических волн.

1. Синтезированная радиоголограмма как структура, уменьшающая отражательную способность объекта

Эффекты уменьшения отражательной способности некоторых дифракционных структур известны [1], [2], [3]. Если рассматривать дифракционную структуру как некоторый объект сложной геометрической формы, то не существует универсального рецепта уменьшения радиозаметности такого объекта. Физически это очевидно, так как в общем случае не решается задача дифракции. Однако существует возможность разработки конструктивного и достаточно универсального подхода к решению задачи уменьшения отражательной способности любого объекта. Этот подход базируется на идее синтеза радиоголограмм по заданному полю излучения (переизлучения) и в свойствах процесса восстановления «отображения» с радиоголограмм.

Обратимся к традиционной схеме записи голограммы (рис. 1), из которой следует, что волны двух когерентных источников – предметная волна 1 и опорная волна 2, распределение фазы последней известно, встречаются в некоторой области 3, где и происходит запись пространственной структуры волны или волнового фронта интерференционной картины от взаимодействия двух волн. Контраст этой интерференционной картины определяется распределением интенсивности предметной волны, а густота интерференционных полос – изменением фазы.

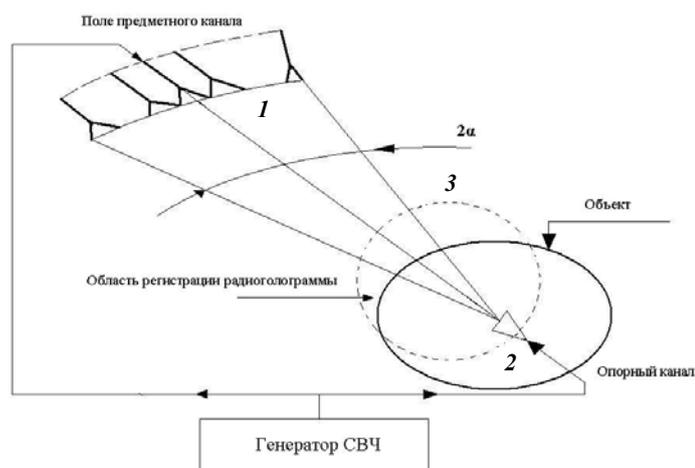


Рис. 1. Схема записи радиоголограммы

Итак, зарегистрировав интерференционную картину, получим голограмму (радиоголограмму), на которой будет зафиксирована не только амплитуда, но и фаза радиоволны. Опорный пучок как бы «останавливает» в пространстве радиоволну. Но этот же способ регистрации радиосигнала на каком-то носителе допускает и простое восстановление исходной волны. Для этого достаточно направить на зарегистрированную структуру (радиоголограмму) волну, служившую опорной при записи. За радиоголограммой восстановится исходное предметное волновое поле. Обращаем внимание на термин «предметное волновое поле». При создании объекта с уменьшенной эффективной поверхностью рассеяния под предметным полем будет пониматься поле переизлучения объекта, когда он освещается радиолокатором. В таком поле сигнал в направлении радиолокатора должен или полностью отсутствовать, или быть существенно уменьшен.

Таким образом, радиоголограмма – это интерференционная картина, образованная двумя когерентными волнами, – предметной и опорной. Сохранение воспроизводимой информации о фазе является уникальной особенностью голографического процесса.

Если считать, что предметное поле – это поле, которое необходимо переизлучить объектом, когда он облучается запросным полем (сигналом), то опорное поле – это поле запроса. Следовательно, радиоголограмма должна равномерно перераспределить падающее на нее излучение с одного направления $\vec{r}_{\text{запрос}}^0$ во все другие, кроме $\vec{r}_{\text{запрос}}^0$. Этой особенностью можно воспользоваться, если считать, что предметное поле задается равномерно во всем пространстве вокруг объекта в 4π стерадиан, кроме одного направления, которое выбирается случайно, и с этого направления приходит сигнал опорного поля. Чтобы обеспечить запись такой радиоголограммы, необходимо фактически одновременно со всей поверхности сферы облучать предметным и опорным полем объект, размещенный в центре сферы. Но так как любое направление запроса (облучения) объекта равновероятно, и оно для некоторой ситуации, например, однопозиционной радиолокации, единственное, тогда рациональной схемой записи радиоголограммы будет равномерное одновременное облучение когерентным предметным полем объекта со всех направлений с поверхности сферы с радиусом R , что эквивалентно записи радиоголограммы без опорного сигнала в области размещения объекта [5], [6].

Полученная радиоголограмма, размещенная на объекте, будучи облучена запросным (опорным) сигналом с одного из направлений из дальней зоны поверхности сферы, восстановит волновой фронт предметного поля во всех направлениях, с которых она облучалась при записи, кроме запросного (опорного).

На первый взгляд, может показаться, что все сказанное о возможности перераспределения отраженной электромагнитной энергии в пространстве от системы «объект–радиоголограмма» возможно только в том случае, если при записи радиоголограммы с объектом или без него соблюдается условие наличия встречных предметных сигналов, так как восстановление предметного сигнала по классической схеме «запись–восстановление» возможно лишь в направлениях, продолжающих ход лучей падающих при записи радиоволн. Казалось бы, иначе нужны сопряженные восстанавливающие сигналы, т. е. с противоположным направлением лучей падающих опорных (запросных) волн при записи. Но это ограничение снимается, если схема записи радиоголограммы с уменьшенной отражательной способностью при однопозиционной радиолокации строится по схеме решения задачи синтеза радиоголограммы. В этом случае предметным полем в области регистрации будут значения поля, полученные путем преобразования Фурье от требуемого поля переизлучения.

Таким образом, логически сформулированный принцип уменьшения для однопозиционной радиолокации отражательной способности радиоголограммы, синтезированной по требуемому полю переизлучения, нуждается в аналитическом или экспериментальном доказательстве. Рассмотрим примеры экспериментального подтверждения явления уменьшения эффективной поверхности рассеяния (ЭПР), как наиболее наглядные и убедительные.

2. Экспериментальный синтез радиоголограммы с требуемой индикатрисой рассеяния

Факт управления падающим на голограмму излучением очевиден, если направления облучения совпадают с направлениями сигналов при записи голограммы. Другое дело, если задать требуемую индикатрису рассеяния для радиоголограммы, размещенной на объекте или вблизи него. Потребуем уменьшить отражение радиоволн, падающих нормально к плоской металлической пластине, в плоскости, перпендикулярной этой пластине (рис. 2), и увеличить отраженный сигнал под углами $\pm 45^\circ$ к нормали в этой плоскости.

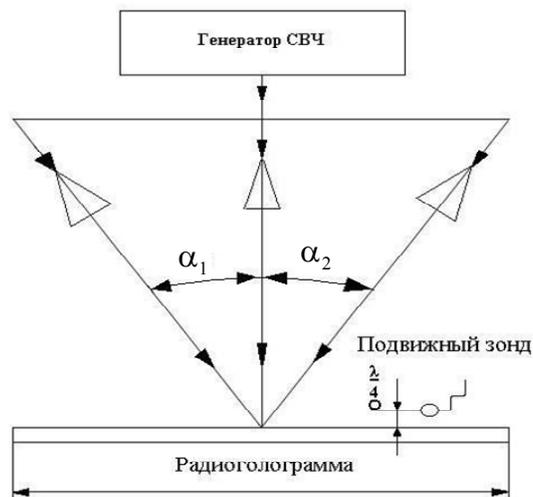


Рис. 2. Схема записи радиоголограммы без опорного сигнала

По терминологии, используемой в радиоголографии, сигнал, посылаемый по направлению нормали к пластине из дальней зоны, будет формировать опорный канал (запрос РЛС). В этом случае направления переизлучения $\pm 45^\circ$ относительно нормали к пластине будут формировать предметный канал. Таким образом, вырисовывается следующая схема эксперимента. Для записи радиоголограммы необходимо облучить плоскую металлическую пластину тремя когерентными источниками радиоволн, расположенными в одной плоскости нормали к пластине и под углами по отношению к нормали в 0° , 45° и -45° (рис. 2). Для этого разместим металлическую пластину в безэховой камере, облучим ее из трех равноудаленных рупорных излучателей, запитанных равноамплитудно и синфазно от трехсантиметрового генератора. Поляризация излучения – линейная, вертикальная (E_z -поляризация). Расстояние от рупоров до центра металлической пластины – 70λ .

Вблизи металлической поверхности возникает поле дифракции от трех источников плоских волн, Z -я составляющая которого измеряется зондом, перемещаемым вдоль оси OY на расстоянии $\lambda/8$ от пластины (рис. 2). Распределение интенсивности вертикальной составляющей (E_z -поляризация) электрического поля вблизи металлической пластины показано на рис. 3, кривая 2. Кривая 1 записана по схеме рис. 3, но в этом случае металлическая пластина была гладкой.

Результаты этих измерений легко проверяются расчетом. Действительно, суммарное поле вблизи металлической плоскости от трех источников, расположенных под углами α_1 , α_2 , α_3 в плоскости, перпендикулярной к пластине, запишется в виде:

$$|E_z|^2 = 4 \sin^2(k\rho \cos \varphi \cos \alpha) + 4 \sin^2(k\rho \cos \varphi \cos \alpha_1) + 4 \sin^2(k\rho \cos \varphi \cos \alpha_2) + \\ + 8 \sin(k\rho \cos \varphi \cos \alpha_1) \sin(k\rho \cos \varphi \cos \alpha_2) \cdot \cos[k\rho \sin \varphi (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2)].$$

Откуда следует его симметрия относительно нормали в плоскости измерения, перпендикулярной к металлической пластине.

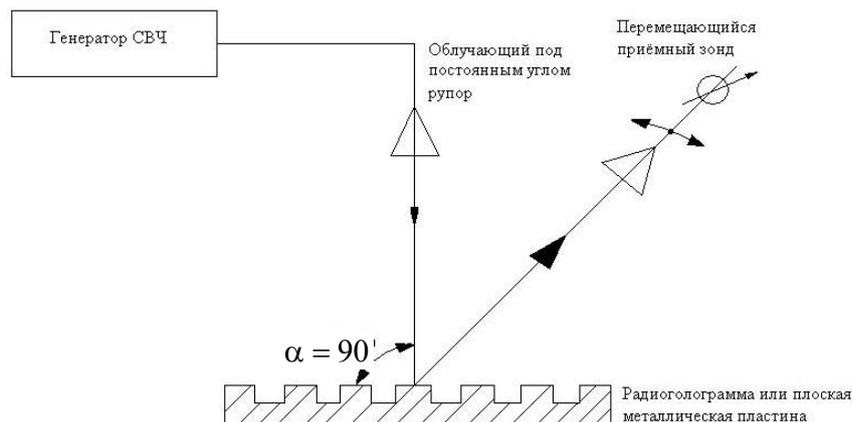


Рис. 3. Схема записи ответного сигнала в виде радиоголограммы

По результатам измерений строится радиоголограмма. Простейшим вариантом радиоголограммы считается плоская бинарная амплитудная или фазовая радиоголограмма. Поэтому достаточно измерений, выполненных по одной линии вдоль металлической плоскости. Как известно [5], [6], фазовая голограмма наиболее эффективна, даже плоская. Поэтому по данным измерений (рис. 3) строим бинарную фазовую ра-

диограмму следующим образом. На вариациях интенсивности поля вдоль плоскости находим координаты его максимального и минимального значения и уровней 0,5 от максимума. В качестве материала для фазовой радиоголограммы берем металл. Тогда техническая реализация фазовой радиоголограммы представляет из себя гофры, крайние координаты которых – координаты положения уровней $0,5|E_{\Sigma}|^2$, а положения центров гофр – это координаты максимумов значений $|E_{\Sigma}|^2$. Высота каждого гофра должна быть $\lambda/4$, что обеспечивает противофазное сложение отраженных электромагнитных долей от верхней и нижней границ гофра, при облучении последнего с направления $\alpha = 0$, выбранного в качестве запросного. По оси Z длина гофра не ограничена, так как отраженное поле Z -поляризации исследуется в горизонтальной плоскости.

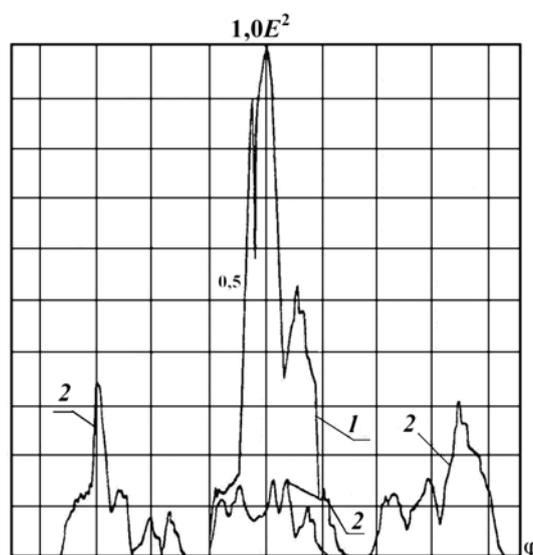


Рис. 4. Индикатрисы рассеяния объекта:
1 – без радиоголограммы; 2 – с радиоголограммой

Изготовленная фазовая радиоголограмма закрепляется на металлической пластине. Измерение величины отраженного сигнала при облучении пластины запросным сигналом с направления $\alpha = 0$ осуществлялось по схеме, показанной на рис. 3. Облучающий рупор неподвижен, а приемный рупор с детекторной секцией перемещается по дуге радиуса 70λ в секторе $\pm 90^\circ$. Такая схема измерения отраженного сигнала (многопозиционная радиолокация) применяется потому, что необходимо определить экспериментально, в каких направлениях перераспределится энергия отраженного сигнала.

Результаты измерений интенсивности отраженных сигналов на частоте 9375 МГц от радиоголограммы показаны линией 2 на рис. 4, там же в секторе $\pm 10^\circ$ даны результаты измерений отражений 1 по мощности от металлической пластины без радиоголограммы. В направлении запросного сигнала (0°) отраженный сигнал уменьшился в 12,5 дБ, а в направлениях $\pm 45^\circ$ наблюдается рост отражений, который не превышает 0,35 от максимума.

3. Экспериментальный синтез радиоголограммы в оптическом диапазоне

Практически вопрос снижения ЭПР объекта в оптическом диапазоне сводится к записи голограмм на поверхности этого макета, когда предметный сигнал имеет

пространственную амплитудно-фазовую структуру требуемой индикатрисы рассеяния от объекта, а опорный представляет из себя плоскую волну. Техническое осуществление возможности записи оптической голограммы связано с регистрирующей средой, которая должна быть нанесена на объект равномерным слоем и закреплена на нем таким образом, чтобы она не разрушалась после фиксации голограммы.

Отметим, что можно слово в слово повторить содержание параграфов 1 и 2 из предыдущего текста, заменяя лишь термины радио на оптические. Укажем лишь на отличительные особенности.

Голографический рельеф регистрируется специфическими методами, свойственными оптическим голограммам. Имитация осуществляется системой когерентных оптических излучателей со спецификой управления амплитудой и фазой оптического сигнала. Излучение осуществляется оптическими сигналами. Голографический рельеф отображается в изменении амплитудно-фазового рельефа материала на голограмме.

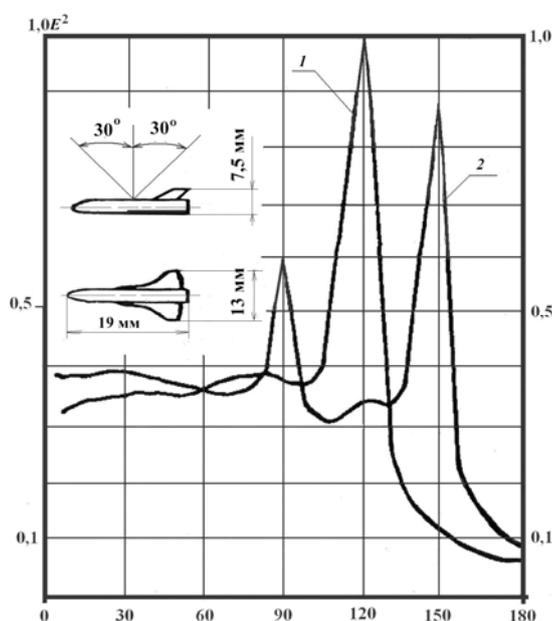


Рис. 5. Индикатрисы рассеяния объекта:
1 – без голограммы; 2 – с голограммой

Данную методику в оптическом диапазоне осуществим на модели летательного аппарата. В качестве модели взята конструкция, размеры которой по длине были 19 мм, по ширине – 13 мм, а высота – 7,5 мм. Проекция моделей изображены на рис. 5.

Модель облучалась по нормали к строительной оси цилиндра ее корпуса длиной волны 0,63 мкм. Облучение происходило по нормали к размаху крыльев.

Снималась индикатриса рассеяния, которая изображена кривой 1 на рис. 5. Затем на модель в вакууме наносился слой толщиной до 90–100 мкм из светочувствительного материала – халькогенидного стекла. Тем самым готовился слой, на котором была впоследствии нанесена голограмма по схеме, изображенной на рис. 2.

Далее по схеме рис. 2 тремя когерентными пучками с угловыми расстояниями между ними $\pm 30^\circ$ на длине волны зеленого цвета 0,53 мкм записывается голограмма. Результат запроса с голограммы представлен на рис. 5, кривая 2. Видно, что поступивший запрос на летательный аппарат с направления 0° сформирован голограммой в направлении 90° и 150° . Таким образом, модель будет незаметна, минимум, на 4,5–5 дБ.

Кроме того, интересно и то, что индикатриса записана на более короткой длине волны, чем голограмма. Таким образом, этот факт подтверждает возможность работы системы «объект–голограмма» в некотором диапазоне частот.

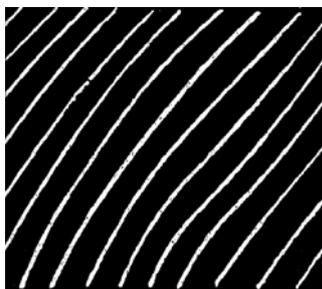


Рис. 6. Часть голограммы объекта (увеличена)

Чтобы убедиться в существовании голограммы, снимали ее. Голограмма изображена на рис. 6 и не имеет прямолинейной структуры – максимумы загибаются вдоль поверхности. Голограмма на рис. 6 изображена увеличенной. Она искажена дорисовкой линий ее максимумов, так как они более равномерно переходят в темные полосы, периодически повторяя этот переход.

Заключение

Явление уменьшения отражательной способности синтезированной радиоголограммы доказано экспериментально на радиоголограммах и голограммах, размещенных на объектах. Условия облучения запросными сигналами плоскости, полуплоскости и макетов существенно отличаются. Достижение одного и того же эффекта снижения отражательной способности в требуемых направлениях различными типами объектов и радиоголограмм, как фазовыми, так и амплитудными, позволяет сформулировать принципиально новый способ уменьшения ЭПР объектов.

Предложенный способ уменьшения эффективной поверхности объекта в целом фундаментален по своему физическому принципу. Это обеспечивает его высокую универсальность, возможность применения в сочетании с другими рациональными методиками.

Литература

1. Способ построения радиоголографической антенны и плоская радиоголографическая антенна, полученная указанным способом : пат. № 6748 Респ. Беларусь, МПК7 Н 01Q3/00 19/06 / заявитель и патентообладатель В. Н. Мизгайлов. – № а 20010282 ; заявл. 27.03.01 ; зарегистр. 09.09.04 // Афіц. бюл. № 4 / Дзярж. пат. кам. Рэсп. Беларусь.
2. Мизгайлов, В. Н. Способ построения радиоголографических антенн / В. Н. Мизгайлов // Тез. докл. II Междунар. науч. конф. по воен.-техн. проблемам, проблемам обороны и безопасности использования технологий двойного применения, Минск, 18–19 мая, 2005 г. – Минск, 2005. – С. 4–6.
3. Мизгайлов, В. Н. Эффект уменьшения отражательной способности синтезированной радиоголограммы / В. Н. Мизгайлов // Тез. докл. III Междунар. науч. конф. по воен.-техн. проблемам, проблемам обороны и безопасности использования технологий двойного применения, Минск, 2007 г. / Гос. ун-т «БелИСА». – Минск, 2007. – С. 7–8.

4. Способ уменьшения обратного радиолокационного отражения и устройство для его осуществления : пат. на изобретение № 2453954 Рос. Федерация / патентообладатель В. Н. Мизгайлов ; заявка № 2010136088 ; приоритет 31.08.10 ; зарегистр. в Гос. реестре изобрет. Рос. Федерации 20.06.12 ; срок действия пат. истекает 31.08.30 // Бюл. Рос. Федерации «Изобретения, полезные модели». – 2010. – № 12. – декабрь.
5. Ковальский, Л. В. Исследование возможности метода голографии без использования опорного пучка / Л. В. Ковальский, В. К. Полянский // АН СССР «Оптика и спектроскопия». – 1979. – Т. 2 В, вып. 2. – С. 338–344.
6. О голографии без опорного пучка / В. Ш. Шехтман [и др.] // ДАН СССР. – 1967. – Т. 177, № 1. – С. 65–67.

Получено 12.06.2015 г.