

УДК 621.396.96

ОБ ОЦЕНКЕ ЗАМЕТНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ЦЕЛЕЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

А.А. Масловский, М.Н. Легенький

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

E-mail: alex.maslovesky@gmail.com

Поступила в редакцию 25 апреля 2014 г.

В статье рассмотрены методы расчета рассеяния электромагнитных волн на объектах сложной формы, расположенных на подстилающей поверхности. Представлена методика статистической обработки полученных результатов, позволяющая получить зависимость вероятности обнаружения объекта от разрешения радара. Показано сходство рассеяния волн на объекте сложной формы, расположенном на подстилающей поверхности, с рассеянием волн на угольном отражателе. Показана возможность снижения уровня отражения от объекта при использовании наклонных боковых стенок. С помощью представленной методики статистической обработки результатов, показано, что объект с наклонными стенками является менее заметным, чем исходный.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радиолокационная цель, заметность, подстилающая поверхность, вероятность обнаружения, угольный отражатель.

В статті розглянуто метод і розрахунок розсіяння електромагнітних хвиль на об'єктах складної форми, розташованих на підстильній поверхні. Представлено методику статистичної обробки отриманих результатів, що дозволяє отримати залежність вірогідності виявлення об'єкту від роздільної здатності радара. Показана схожість розсіяння хвиль на об'єкті складної форми, розташованому на підстильній поверхні з розсіянням хвиль на кутовому відбивачі. Показано можливість зменшення рівня відбиття від об'єкта при використанні нахильних стінок. За допомогою наданої методики статистичної обробки результатів, показано, що об'єкт з нахильними стінками є менш помітним, ніж вихідний.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: радіолокаційна ціль, помітність, підстильна поверхня, вірогідність виявлення, кутовий відбивач.

In this paper methods for calculating scattering of electromagnetic field on the complex form object, that situated on the underlying surface were considered. The methodic for statistical processing of obtained data, that gives an ability to obtain the objects detection possibility dependence on a radar resolution was presented. The similarity of wave scattering on the complex form object, which situated on underlying surface and wave scattering on the corner reflector was shown. The possibility of object's reflection level reducing, with the help of sloping the object's sidewalls was introduced. With using the introduced methodic of statistical results processing is shown, that object with inclined sidewalls is less detectable, then source one.

KEYWORDS: radiolocation target, detectability, underlying surface, detection possibility, corner reflector.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время чрезвычайно важной является проблема снижения радиолокационной заметности военной техники. Для ее разрешения целесообразно проводить предварительные расчеты ЭПР разрабатываемой техники.

Для расчета ЭПР, в большинстве случаев, необходимо решить соответствующую дифракционную задачу, определить поляризационные компоненты рассеянного поля и далее провести вычисления по формуле [1]:

$$\sigma = \frac{4\pi R_0^2 \Pi_r}{\Pi_i}, \quad (1)$$

где:

- R_0 - расстояние между передатчиком и объектом;
- Π_r - плотность потока энергии рассеянной волны вблизи приемника;
- Π_i - потока энергии падающей волны вблизи объекта рассеяния.

В данной работе рассматриваются вопросы заметности сложных радиолокационных объектов, расположенных на подстилающей поверхности. Рассмотрены методы моделирования рассеяния электромагнитных волн на объектах сложной формы, а также методы обработки полученных результатов, которые позволяют оценить снижение радиолокационной заметности объекта при некоторых геометрических изменениях его конструкции либо при использовании радиопоглощающих материалов. Проведены расчеты рассеяния электромагнитных волн на модели грузовика,

расположенного на подстилающей поверхности. Показано, что в формализованном виде этот процесс может быть рассмотрен как дифракция волны на угольном отражателе, стенки которого представляют собой вертикальную боковую поверхность объекта и прилегающий участок подстилающей поверхности. Зачастую угол между гранями в таком «угольном отражателе» оказывается равным 90° , что приводит к высокому уровню отраженного сигнала. Указаны возможности снижения уровня отраженного сигнала при использовании наклонных боковых стенок объекта. Вопросы снижения заметности объектов при использовании наклонных боковых стенок были рассмотрены авторами в тезисах конференций [2] и [3], а методика обработки результатов моделирования рассеяния электромагнитных волн на объектах сложной формы – в тезисах [4].

РАСЧЕТ ЗАМЕТНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБЪЕКТА

1. Моделирование рассеяния электромагнитных волн на объектах сложной формы

Для моделирования поверхности радиолокационных объектов сложной формы использована программа 3dМакс [<http://www.autodesk.ru/products/3ds-max/overview>]. Эта программа позволяет представить поверхность сложного объекта в виде совокупности плоских треугольных факетов. В данной работе для проведения численных экспериментов была использована модель грузовика КРАЗ 255 Б (рис 1). На рис.1а представлена фотография реального автомобиля КРАЗ, а на рис.1б показана модель КРАЗа, созданная в программе 3dМакс и используемая в дальнейшем для расчетов. Исследуемый автомобиль имеет следующие размеры: ширина 4 м, длина 10.5 м, высота 4.3 м. Ниже представлены результаты расчетов ЭПР для исследуемой модели в моностатическом случае, угол места равен 40 градусов от вертикали, получена азимутальная зависимость ЭПР, с шагом в 0.5 градуса.



Рис. 1. Фотография КРАЗ 255 Б - (а) и расчетная модель грузовика, созданная в программе 3dМакс - (б)

2. Метод расчета

В работе для расчета рассеяния волн на объектах сложной формы используется метод "The Physical Optics -Shooting and Bouncing Ray" (PO-SBR) [5]. Это численный метод, в различных аспектах которого используются элементы методов геометрической и физической оптики [6]. При этом в рамках метода геометрической оптики распространение электромагнитного поля рассматривается, как распространение набора лучей. Эти лучи характеризуются амплитудой, направлением и фазой. В рамках метода физической оптики на поверхностях исследуемого объекта поле падающей электромагнитной волны пересчитывается в эквивалентные поверхностные токи. Эти токи переизлучают электромагнитные волны в направлении точки наблюдения. В методе PO-SBR «запускается» множество таких лучей от источника (антенна или фронт плоской волны). При этом амплитуда каждого луча может зависеть от вида источника. Каждый луч затем распространяется в вычислительной области и переотражается между поверхностями объекта по законам геометрической оптики. Для нахождения точек пересечения используются быстрые компьютерные алгоритмы (к примеру kd-tree [7]). Рассеяние от точки пересечения луча и объекта по направлению ко всем точкам наблюдения рассчитывается с помощью метода физической оптики. Для нахождения полного отраженного электромагнитного поля все поля рассеянные объектом в направлении приемника суммируются. Конечно, такой метод расчета не является точным, однако он дает возможность быстро оценить отраженное поле в случае электрически больших структур.

Для расчетов рассеянного поля на радиолокационных объектах использовалась трехмерная программа, в которой реализован PO-SBR алгоритм. При этом возможен расчет отраженного поля для объекта или отдельных его частей, при этом поверхность объекта либо предполагается идеально-металлической, либо обладает некоторым поверхностным импедансом. В данной статье рассматриваются объекты, расположенные на некоторой подстилающей поверхности, к примеру: корабль на воде, автомобиль на дорожном покрытии. Следовательно, в расчетах необходимо принимать во внимание отражение от объекта, отражение от подстилающей поверхности и переотражения между объектом и подстилающей поверхностью. Подстилающая поверхность обычно является шероховатой. Таким образом, существует как зеркальное, так и диффузионное отражение. При использовании вышеупомянутой расчетной программы подстилающая поверхность рассматривается, как гладкий диэлектрик, характеризуемый некой эффективной диэлектрической проницаемостью - следовательно, рассматривается только зеркальная часть отраженного поля. Диффузное отражение будет учтено ниже на этапе анализа данных.

Следует отметить, что в расчетах используется только та часть подстилающей поверхности, которая может быть освещена лучами, отраженными от объекта. Считаем, что объект почти полностью состоит из идеального электрического проводника. Кроме этого используются еще 3 материала: резина для неметаллических частей шин, стекло для окон и бетон для подстилающей поверхности. Для этих материалов задается импеданс, который может быть рассчитан из диэлектрической проницаемости по формуле (2)

$$Z = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon}} \quad (2)$$

Здесь $Z_0 = 120\pi$ Ом – импеданс свободного пространства. Все используемые в работе материалы и их поверхностные импедансы (вычисленные с помощью формулы (2)) для рассматриваемой длины волны ($\lambda = 10$ см) представлены в Таблице 1. В общем случае стекло представляет собой радиопрозрачный материал с потерями, однако в рамках используемого метода расчета сложно учесть это. Поэтому стекло также моделируется поверхностным импедансом.

Таблица 1. Диэлектрическая проницаемость и импеданс материалов для $\lambda=10$ см.

материал	Диэлектрическая проницаемость	импеданс
Бетон	4,5	177,7
Стекло	4,7	174
Резина	7	142,5

3. Анализ результатов расчета ЭПР

Результаты расчетов с помощью описанной выше программы представлены в виде угловой зависимости ЭПР (в квадратных метрах) для исследуемой модели (см. рис. 2). Как видно, диаграмма ЭПР является осциллирующей

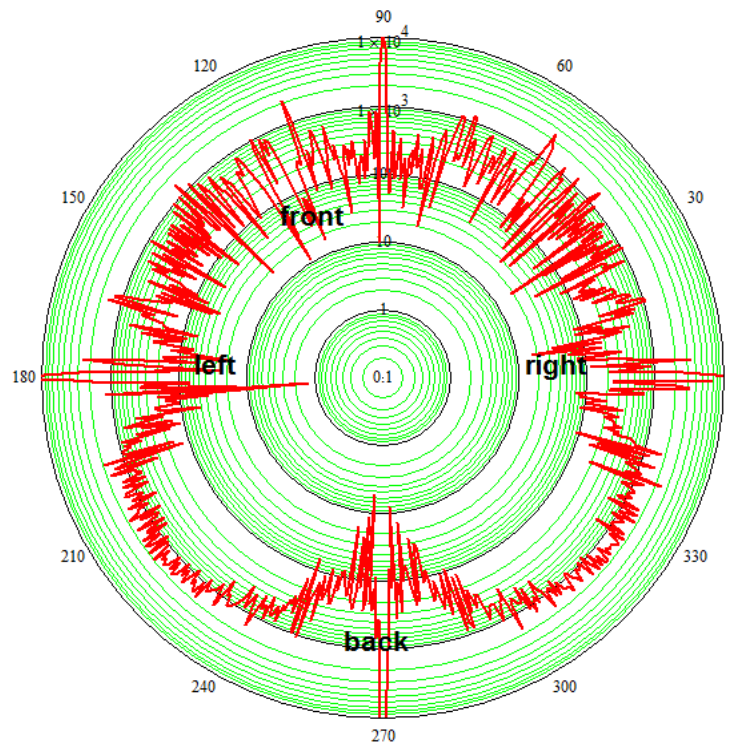


Рис. 2. Угловая зависимость ЭПР для КРАЗа при горизонтальной поляризации падающего поля.

Таблица 2. Статистические параметры для зависимости изображенной на рис. 2

Статистические параметры	Значение в м ²
Минимум	1,2
Максимум	30857,5
Среднее значение	784,5
Медианное значение	414,2

Возможность обнаружения или не обнаружения объекта в заданном направлении можно определить из статистического анализа полученной зависимости ЭПР. Для рассматриваемого случая полученная угловая зависимость ЭПР (рис. 2) имеет статистические параметры, которые представлены в Таблице 2.

Следует отметить, что средние и медианные значения ЭПР имеют большие численные значения. Это объясняется тем, что модели объекта имеют большое число уголкового отражателей, которые дают большой уровень отражения в широком секторе углов наблюдения от 45° до 90° от вертикали.

Для расчета плотности распределения полученных данных представим данное распределение в виде суммы дельта функций, пики которых соответствуют рассчитанным значениям ЭПР σ_i и имеют амплитуды $1/N$ (вероятность получить значение ЭПР равно σ_i):

$$F_{obj}(u) = \sum_{i=1}^N \delta(u - \sigma_i) / N . \tag{3}$$

В расчетах не учитывалось диффузное отражение от подстилающей поверхности, однако подстилающая поверхность в общем случае является шероховатой и ее ЭПР может рассматриваться как некий случайный сигнал с плотностью распределения Рэлея

$$F_{bg}(u, s) = (u / s^2) \exp(-u^2 / 2s^2) , \tag{4}$$

где u -случайное значение ЭПР, s - параметр распределения, который соответствует медианному значению случайной величины.

В дальнейших расчетах, для определенности, использованы данные для удельной ЭПР некоторых подстилающих поверхностей из работы[8]. Для рассматриваемого случая (длина волны $\lambda=10$ см, угол падения $\varphi=45^\circ$) удельная ЭПР подстилающей поверхности (бетон) равна $\sigma_{sp} = -46.7$ дБ от м².

Умножение данного значения σ_{sp} на площадь освещаемой части подстилающей поверхности S (которая определяется параметрами радара) дает значение параметра $s = S\sigma_{sp}$ в распределении (4).

Для получения распределения вероятности для рассматриваемого объекта, расположенного на подстилающей поверхности с учетом диффузного рассеяния необходимо сложить 2 случайных сигнала: полученное ЭПР объекта с распределением плотности вероятности (3) и ЭПР подстилающей поверхности (плотность вероятности (4)). Плотность вероятности для суммы двух случайных сигналов представляет собой свертку распределений плотности вероятности для каждого из этих случайных сигналов ((3) и (4)):

$$\begin{aligned} F_{obj+bg}(u, s) &= \int_0^{\infty} F_{obj}(v)F_{bg}(u-v, s)dv = \\ &= \sum_{i=1}^N F_{bg}(u-\sigma_i, s) / N. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, получено полное распределение плотности вероятности для исследуемого объекта на подстилающей поверхности как сумму смещенных распределений Рэлея.

Распределение плотности вероятности (5) для рассматриваемого объекта в случае, когда параметр распределения Рэлея равен $s = 20$ приведено на рис.3. Пунктирной линией здесь обозначено распределение Рэлея для фона. Сплошная линия – полное распределение плотности вероятности ЭПР объекта, полученное по формуле (5). Для исследуемой модели данная линия является хорошей аппроксимацией для расчетной гистограммы – данный объект хорошо виден на фоне подстилающей поверхности.

Из полученного распределения плотности вероятности ЭПР (5) можно оценить вероятность обнаружения для заданного разрешения радара. С этой целью следует определить пороговое значение ЭПР σ_{th} . Обычно σ_{th} выбирается таким, чтобы вероятность ложной тревоги радара была равна некой величине P_{fa} (обычно и в данной работе используется $P_{fa} = 10^{-4}$). Вероятность ложной тревоги – это вероятность того, что радар будет «срабатывать» от фона. Таким образом, пороговое значение ЭПР σ_{th} определяется из следующих вычислений

$$P_{fa} = \int_{\sigma_{th}}^{\infty} F_{bg}(u, s)du = 1 - \int_0^{\sigma_{th}} F_{bg}(u, s)du. \quad (6)$$

В случае, когда F_{bg} представляет собой плотность распределения Рэлея (4), интеграл (6) может быть рассчитан аналитически и формула для определения порогового значения ЭПР σ_{th} упрощится к виду $\sigma_{th} = (-\ln(P_{fa})2s^2)^{1/2}$.

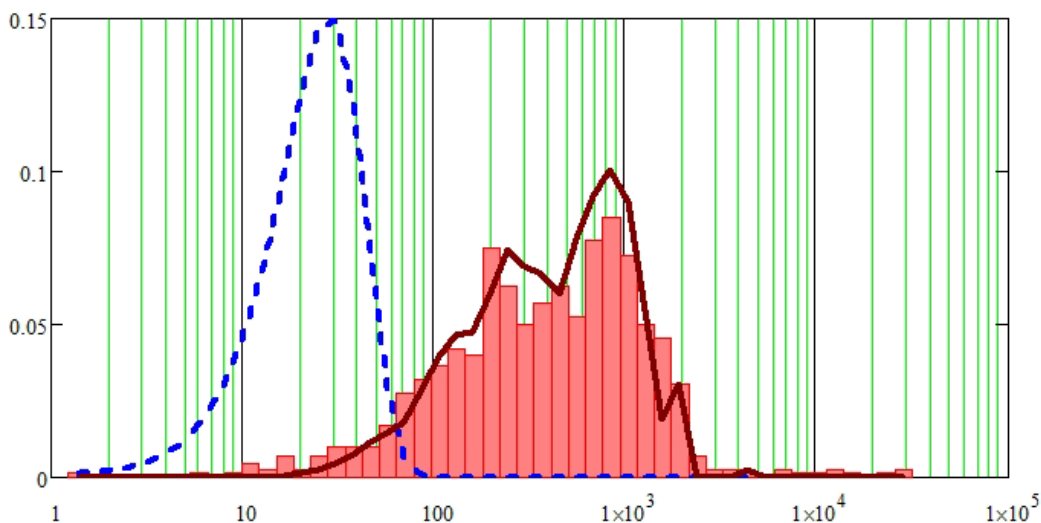


Рис. 3. Полное распределение плотности вероятности ЭПР для объекта из формулы (5) – сплошная линия, гистограмма ЭПР для объекта и распределение плотности вероятности ЭПР для фона из формулы (4) – пунктирная линия

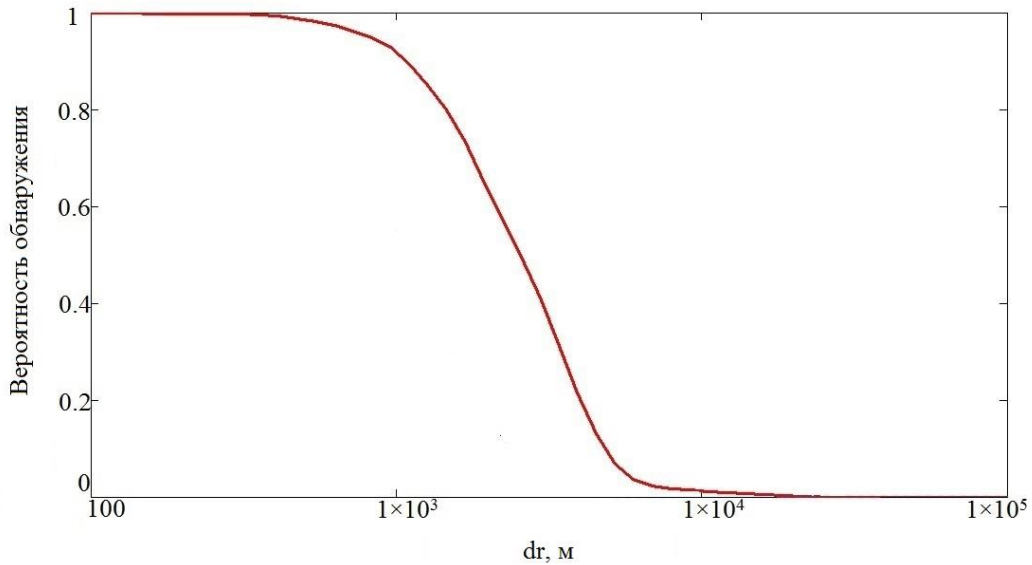


Рис. 4. Зависимость вероятности обнаружения от разрешения радара для модели рис. 1

Вероятность обнаружения цели для полученного порогового значения ЭПР σ_{th} определяется следующим образом

$$P = \int_{\sigma_{th}}^{\infty} F_{obj+bg}(u, s) du = 1 - \sum_{i=1}^N \int_0^{\sigma_{th}} F_{bg}(u - \sigma_i, s) du / N. \tag{7}$$

В случае, когда распределение плотности вероятности для подстилающей поверхности представляет собой распределение Рэлея (4) интегралы в (7) могут быть вычислены аналитически и выражены через функцию распределения Рэлея.

$$P = 1 - \sum_{i=1}^N 1 - \exp(-(\sigma_{th} - \sigma_i)^2 / 2s^2) / N. \tag{8}$$

Также отметим, что для расчетов необходима площадь засвеченной части подстилающей поверхности. Исследуемый объект отбрасывает тень на определенную часть подстилающей поверхности. Следовательно, в расчете вероятности обнаружения для некоего направления (с ЭПР σ_i) из освещенной части фоновой поверхности следует вычитать видимую площадь объекта для данного направления. В случае, когда видимая с определенного направления площадь объекта больше, чем освещенная часть фона, для расчета вероятности используется другая формула: для случаев $\sigma_i dr^2 / S_i > \sigma_{th}$ считаем вероятность обнаружения равной $1/N$.

С помощью описанной выше процедуры можно рассчитать зависимость вероятности обнаружения от корня из разрешения радара dr (площадь пятна засветки радара $S = dr^2$), подобная зависимость для модели КРАЗа представленной на рис. 1б изображена на рис. 4. При большом значении разрешения радара при этом вероятность обнаружения объекта оказывается малой или даже нулевой (объект неразличим на фоне подстилающей поверхности). При уменьшении разрешения радара вероятность обнаружения повышается и для разрешения меньшего некоторого значения становится почти неотличимой от единицы (объект хорошо различим на фоне подстилающей поверхности).

ДИАГРАММА ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ОБЪЕКТА, РАСПОЛОЖЕННОГО НА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

В случае если рассматривается рассеяние электромагнитной волны на объекте, расположенном на подстилающей поверхности (автомобиль на бетонном покрытии, корабль на морской поверхности, танк на песке) в общем отраженном от объекта сигнале существенную роль играет переотражение между исследуемым объектом и подстилающей поверхностью. При этом фактически боковая поверхность отражается в подстилающей поверхности как в зеркале – на подстилающей поверхности образуется «антипод» объекта [9].

В формализованном виде этот процесс можно рассматривать как рассеяние волны на угольном отражателе, одна из сторон которого представляет собой боковую поверхность исследуемого объекта, а другая – подстилающую поверхность.

При этом для многих радиолокационных объектов боковые стенки являются строго вертикальными и угол между сторонами такого «углового отражателя» (УО) будет равен 90° . Однако, хорошо известно, что в этом случае отражение от УО будет максимальным [1].

Известно, что отклонение угла между поверхностями образующими отражатель от прямого приводит к существенному понижению уровня отражения [1]. При этом даже изменение угла на 2 градуса приводит к уменьшению ЭПР на -10 дБ и к расщеплению главного лепестка ДОР, а изменение угла на 5 градусов – к уменьшению ЭПР на -24 дБ (см. рис. 5).

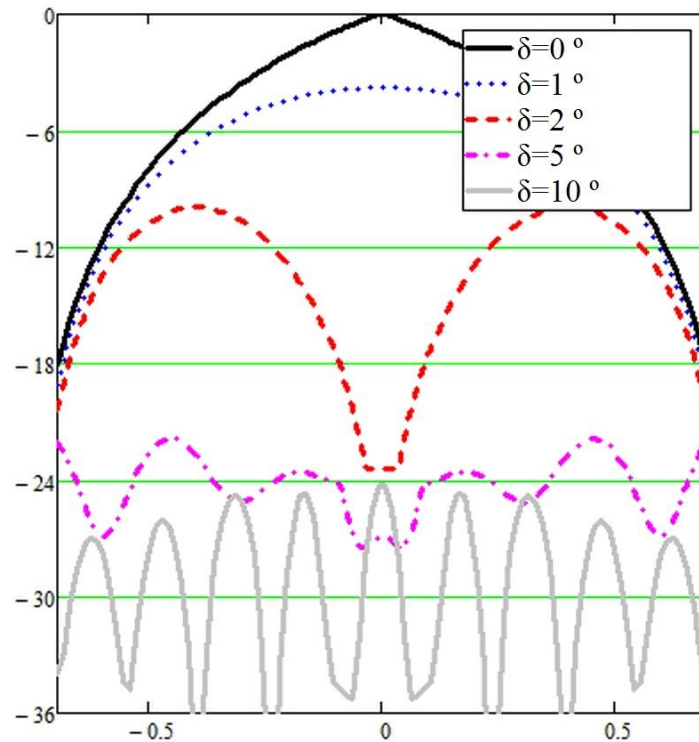


Рис. 5. Отражение от двугранного УО для разных углов между гранями (рассчитано по формуле представленной в [1])



Рис. 6. Расчетная модель грузовика с наклонными стенками

Подобный подход может быть использован и для уменьшения отражения от радиолокационного объекта расположенного на подстилающей поверхности. В случае если боковые стенки объекта сделать наклонными в сторону подстилающей поверхности, то угловой отражатель образованный ими и участком подстилающей поверхности будет давать относительно небольшой уровень отражения. Ниже

приведены результаты численных расчетов, иллюстрирующих влияние таких геометрических изменений на уровень обратного отражения от объекта.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Для исследования влияния геометрических изменений конструкции объекта и расчета вероятности его обнаружения была создана модель грузовика. Большая часть поверхности модели предполагается идеально металлической, стекла и шины (резина) моделируются с помощью задания соответствующего поверхностного импеданса, как было описано выше.

Для исследования рассеяния электромагнитных волн на объекте, стенки которого образуют с подстилающей поверхностью не прямые углы, были создана еще модель, у которой боковые и задняя стенки кунга образуют с подстилающей поверхностью угол 88 градусов (рис. 6).

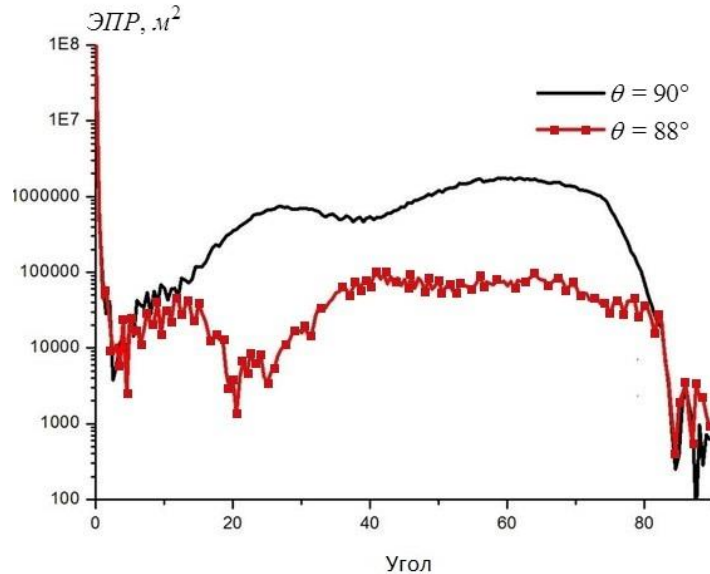


Рис. 7. ДОР для модели с прямыми стенками ($\theta=90^\circ$) и для модели с наклонными стенками ($\theta=88^\circ$)

На рис. 7 представлены диаграммы обратного рассеяния для модели с прямыми боковыми стенками и для модели с наклонными стенками. Результаты представлены для длины волны падающего излучения $\lambda=3\text{см}$, поляризация горизонтальная. Показаны результаты моделирования зависимости ЭПР от угла места, азимутальный угол равен 0° . Из рис. 7 видно, что даже наклон стенки кунга на 2° приводит к уменьшению значения ЭПР в 10 раз для большинства ракурсов, а для некоторого сектора углов – в 100 раз.

ВЫВОДЫ

Представлены методы для статистической обработки результатов моделирования рассеяния электромагнитных волн на объектах сложной формы, расположенных на подстилающей поверхности. Описана методика для расчета зависимости вероятности обнаружения объекта радаром от разрешения радара. С помощью таких зависимостей можно сравнивать заметности различных радиолокационных объектов.

Проведены исследования возможностей снижения радиолокационной заметности наземных объектов. Показано, что в этом случае существенную роль играет отражение между вертикальными боковыми стенками объекта и подстилающими поверхностями. Исследовано влияние изменения угла наклона боковых стенок на уровень отражения от объекта. Получены зависимости вероятностей обнаружения для исходного объекта (с вертикальными боковыми стенками) и для объекта с наклонными боковыми стенками. Показано, что второй объект за счет уменьшения влияния «углового отражателя», формируемого его стенками и подстилающей поверхностью, становится менее заметным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кобак В.О. «Радиолокационные отражатели», – "Советское радио" г. Москва, 1975.– 248 с.
2. Масловский А.А., Легенький М.Н., "Рассеивание плоских электромагнитных волн на объектах сложной формы, расположенных на подстилающей поверхности", 10-я Международная

- молодежная научно-техническая конференция РТ-2014 "Современные проблемы радиотехники и телекоммуникации", г. Севастополь, 2014.
3. Maslovskiy A., Legenkiy M., "Geometrical techniques for reducing radar targets detectability", XIV Kharkiv young scientists conference on radiophysics, electronics and biophysics, Kharkiv, 2014.
 4. Legenkiy M., Butrym A., Antyufeyeva M., Evaluation of On-Ground Object Radar Detectability Reduction, // Proceedings of the conference Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, 26-28 August. – Dnipropetrovsk. – 2014, P. 254-257.
 5. Chang S. and Senior T., Scattering by a spherical shell with a circular aperture, University of Michigan, 1969.
 6. Balanis C., Advanced engineering electromagnetics Vol. 20: Wiley New York, 1989
 7. Tao Y.B., Ling H. and Bao H.J., "KD-tree based fast ray tracing for RCS prediction," Progress In Electromagnetics Research, vol. 81, pp. 329-341, 2008
 8. Кулемин Г.П., Тарнавский Е.В., "Моделирование карты помех от наземной поверхности для РЛС ММД при малых углах скольжения" Радиоэлектронные и компьютерные системы №1, с. 5-12, 2004.
 9. Алексеев А.Г., Штагер Е.А., Козырев С.В., «Физические основы технологии STEALTH – СПб.: ВВМ, 2007.– 284 с.