

О влиянии неортогональности граней углового отражателя на его отражательные свойства

А.И. Захаров, Л.Н. Захарова

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, 141190, пл. Введенского, 1, Фрязино, Московская область, aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru

Рассмотрены особенности взаимодействия падающего сигнала радара на угловой отражатель с неортогональными гранями. Показано, что отраженный сигнал есть сумма отраженных под углом к строго обратному направлению сигналов различной интенсивности. Вывод применен для объяснения особенностей отражения сигнала уголком с водой в раскрыве. Показано, что при типовых условиях применения уголков наличие воды в раскрыве препятствует отражению в строго обратном направлении.

The specificity of the interaction of the incoming radar signal with triangular corner reflector having non-orthogonal plates is discussed. It is shown that scattered signal is a sum of signals having various intensity and propagating at some angle with respect to the backward direction. The conclusion made was used to explain signals backscatter by corner reflectors filled in with water. It is shown that there is no backscatter from corner with water inside in strictly backward direction.

Известно, что эффективная площадь рассеяния (ЭПР) отражателя σ при нормальном падении сигнала на поверхность связана с площадью его апертуры S [1]:

$$\sigma = \frac{4\pi S^2}{\lambda^2}. \tag{1}$$

Площадь S зависит от размеров отражателя и его конструкции. Наиболее широкое распространение в задачах радиометрической калибровки и исследованиях динамики подстилающих покровов получили угловые отражатели, из них наиболее популярны отражатели с треугольными гранями. На рисунке 1а приведена оптическая модель углового отражателя, составленного из трех взаимно перпендикулярных граней АОС, АОВ и СОВ. Эквивалентная апертура уголка в направлении максимума диаграммы обратного рассеяния имеет форму шестиугольника и определяется пересечением раскрыва АСВ углового отражателя и этого же раскрыва, повернутого на 180° (показано пунктиром) относительно точки О [1]. Характерной особенностью углового отражателя с взаимно перпендикулярными гранями является последовательное отражение падающего луча от всех трех граней, в результате чего сигнал отражается назад точно в направлении излучателя. Площадь апертуры уголка с длиной ребра a (рёбра АО, ВО, СО) и его ЭПР приведены в таблице 1. Электрическая ось уголка совпадает с осью симметрии, она проходит через вершину О и составляет угол $\arcsin\left(\frac{\sqrt{3}}{3}\right)=35.2^\circ$ с нижней гранью. Проекция оси симметрии на нижнюю грань составляет угол 45° с осью Х. Фазовый центр отражения уголка находится в его вершине О, поскольку длина пути сигнала при падении на любую точку любой грани и последующего тройного переотражения совпадает с длиной пути до вершины уголка.

Таблица 1. Параметры угловых отражателей с ребром 1 м, X-диапазон

Площадь апертуры	Максимальная ЭПР	ЭПР (дБм ²)
$S_{ir} = \frac{a^2}{\sqrt{3}}$	$\sigma_{ir} = \frac{4\pi a^4}{3\lambda^2}$	36.4

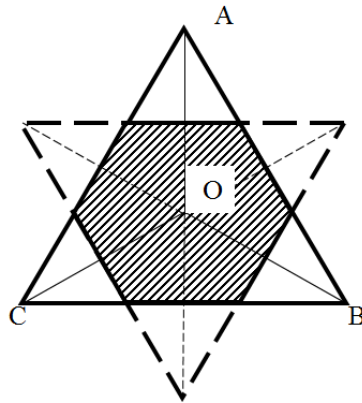


Рис. 1. Оптическая модель апертуры уголкового отражателя.

Введём прямоугольную систему координат с вершиной уголкового отражателя в центре (см. рис. 1б) и пронумеруем плоскости XOY, YOZ и ZOX цифрами 1, 2 и 3.

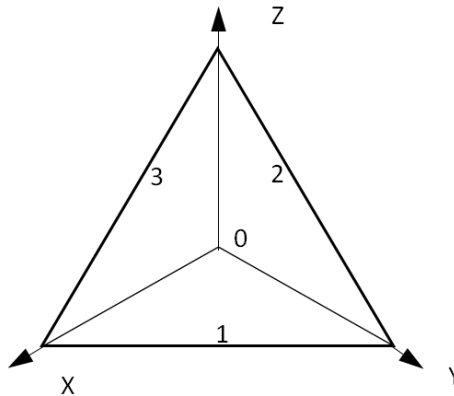


Рис. 2. Система координат уголкового отражателя в вычислениях характеристик отражения.

Матрицы, описывающие отражение луча, падающего на плоскости 1, 2 и 3 таковы:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad R_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Падающий на раскрыт уголка луч S , задаваемый вектором-столбцом $\langle -X, -Y, -Z \rangle^T$, после преотражения тремя гранями уголкового отражателя в любом порядке описывается вектором $\langle X, Y, Z \rangle^T$, следовательно, отраженный уголком луч распространяется точно в обратном направлении. Необходимо отметить, что существует 6 вариантов преотражения луча гранями уголка (123, 132, 213, 231, 312, 321). Соответственно, результирующее отражение — результат объединения парциальных отражений шести субапертур, составляющих апертуру уголка на рис. 1, при этом площадь каждой из субапертур равна одной шестой от S_{tr} из таблицы 1:

$$S_{tr6} = \frac{a^2}{6\sqrt{3}}. \quad (3)$$

Рассмотрим представляющий практический интерес случай, когда неперпендикулярной является нижняя грань уголка. Пусть нижняя грань отклонена на угол α относительно горизонтали, причем ребро нижней грани BC остается

ориентированным горизонтально. Этот вариант является аппроксимацией случая, когда нижняя грань уголкового отражателя, нацеленного на углы места более 35.2° , залита водой, отражение от которой экранирует отражение от нижней грани, как это изображено на рис. 4. Можно показать, что для плоскости 1, наклоненной к горизонту на угол α , матрица отражения выглядит так:

$$R_{1\alpha} = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & -\sin^2 \alpha & -\sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha \\ -\sin^2 \alpha & \cos^2 \alpha & -\sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha \\ -\sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha & -\sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha & -\cos 2\alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

Рассмотрим последовательное отражение луча от граней уголкового отражателя в различных вариантах отражения. Существует 6 вариантов трехкратного переотражения луча гранями трехгранного уголкового отражателя, в соответствии с порядком взаимодействия луча с гранями 1, 2 и 3. При идеальном изготовлении уголка для каждого из 6 вариантов тройного переотражения отраженный луч уходит в направлении пришедшего. При отклонении одной из граней картина усложняется. Для последовательностей переотражений $1_\alpha, 2, 3$ и $1_\alpha, 3, 2$ (индекс α означает отражение от наклоненной нижней грани) матрица преобразования выглядит одинаково (вариант 1):

$$M_1 = \begin{bmatrix} -\cos^2 \alpha & \sin^2 \alpha & \sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin^2 \alpha & -\cos^2 \alpha & \sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha \\ -\sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha & -\sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha & -\cos 2\alpha \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Для последовательностей отражений $2, 3, 1_\alpha$ и $3, 2, 1_\alpha$ матрица также выглядит одинаково (вариант 2):

$$M_2 = \begin{bmatrix} -\cos^2 \alpha & \sin^2 \alpha & -\sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin^2 \alpha & -\cos^2 \alpha & -\sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha \\ \sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha & \sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha & -\cos 2\alpha \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Для последовательности отражений $3, 1_\alpha, 2$ матрица выглядит так (вариант 3):

$$M_3 = \begin{bmatrix} -\cos^2 \alpha & -\sin^2 \alpha & \sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha \\ -\sin^2 \alpha & -\cos^2 \alpha & -\sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha \\ -\sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha & \sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha & -\cos 2\alpha \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Для последовательности отражений $2, 1_\alpha, 3$ матрица выглядит так (вариант 4):

$$M_4 = \begin{bmatrix} -\cos^2 \alpha & -\sin^2 \alpha & -\sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha \\ -\sin^2 \alpha & -\cos^2 \alpha & \sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha \\ \sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha & -\sqrt{2} \sin \alpha \cos \alpha & -\cos 2\alpha \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Видно, что отраженный луч расщепляется на 4 неравных составляющих.

Для получения количественных оценок зададим угол отклонения нижней грани $\alpha=10^\circ$. Пусть падающий луч задан вектором $\langle -1, -1, -1 \rangle^T$. Результатом перемножения матриц (5-8) на вектор будут 4 вектора: $\langle 0.7, 0.7, 1.42 \rangle^T$, $\langle 1.18, 1.18, 0.46 \rangle^T$, $\langle 0.76, 1.24, 0.94 \rangle^T$ и $\langle 1.24, 0.76, 0.94 \rangle^T$. На рис. 3 ниже для падающего вдоль оси симметрии луча графически показано положение 4 парциальных отражений (красные линии) с длиной, пропорциональной площади апертур, и отражение от идеального уголка (зеленая линия). Лучи 1 и 2 лежат вместе с осью симметрии в вертикальной плоскости и отклонены на 20° (2α) вверх и вниз. Лучи 3 и 4 отклонены примерно на 10° вправо и

влево от оси симметрии. Площади апертур лучей 1 и 2 вдвое больше, чем лучей 3 и 4. Заметим, что уклон нижней грани (негоризонтальность ребра ВС приведет к расщеплению и каждого из лучей 1 и 2 на две составляющие.

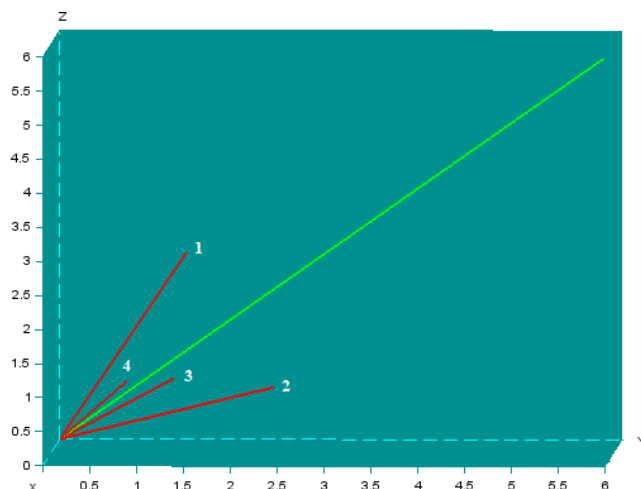


Рис. 3. Расщепление отраженного луча на парциальные лучи.

ЭПР 1/6 полной апертуры (субапертуры) уголка из таблицы 1, формирующей лучи 2 и 3, равна $\sigma_6=20.8$ дБм², что на ~16 дБ меньше случая идеального уголка. Для 1/3 апертуры (лучи 1 и 4) $\sigma_3=26.9$ дБм², что на ~10 дБ меньше случая идеального уголка. При оценке ширины главного лепестка отражений примем, что электрическая длина субапертуры, как корень из площади (3), равна

$$l_6 = \frac{a}{\sqrt{6\sqrt{3}}}, \quad (9)$$

следовательно, при длине ребра уголка 1 м $l_6=0.31$ м.

Согласно [3], эффективная апертура уголка с рис. 1 может рассматриваться как плоская пластина. Тогда для субапертуры эффективной длиной l_6 угловая зависимость ЭПР в районе максимума для вертикального сечения равна

$$\sigma_6(\theta) = \sigma_{6\max} \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} l_6 \sin \theta\right).$$

Ширина главного лепестка по уровню -3 дБ, в градусах, равна

$$\Delta\theta \approx 25.2 \frac{\lambda}{l_6}.$$

При длине волны $\lambda = 3.1$ см и с учетом конкретного для данного уголка значения $l_6 = 0.31$ м ширина лепестка равна 2.5^0 . Заметим, что для лучей 1 и 2 ширина главного лепестка в горизонтальной плоскости будет в 2 раза уже. На рис. 4 из [2] изображен уголковый отражатель АОС (вид сбоку), нижняя грань которого залита водой. Вся конструкция отклонена на α угол, а нижняя грань от вершины О уголка до точки С на ребре ОС залита водой.

Луч S падает на водную поверхность, после отражения падает последовательно на боковые грани уголка и уходит в направлении, отличном от исходного (на рисунке для наглядности изображен случай, когда луч S падает на уголковый отражатель в плоскости, проходящей через электрическую ось уголка и ребро АО). В отсутствии воды в этом направлении должен был уйти луч, пришедший с направления S' и попавший в точку Е нижней грани.

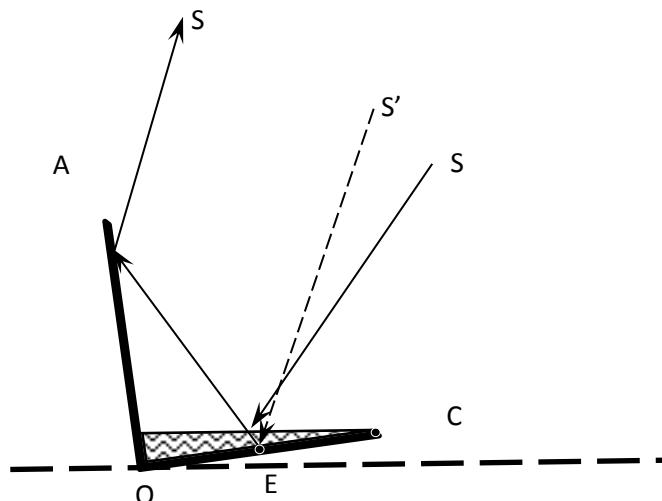


Рис. 4. Отражение сигнала уголком с водой в раскрыве.

При типовых углах обзора уголкового отражателя спутниковым радаром 25° - 50° электрическая ось уголка должна составить с горизонтальной земной поверхностью угол 40° - 65° , следовательно, нижняя грань должна быть наклонена примерно на 5° - 30° к горизонту. Соответственно, для отраженных лучей 1-4 с рис. 3 направление обратного рассеяния будет гарантированно вне их главных лепестков. Вместе с тем, возможен и промежуточный случай, когда вода покрывает только часть нижней грани, и радиометрическая калибровка, конкретнее, фазовая калибровка остается возможной. Такой случай рассмотрен для различных конструкций уголковых отражателей в [2].

Выводы

При взаимодействии падающего сигнала радара на уголкового отражатель с неортогональной нижней гранью происходит расщепление отражения на 4 составляющие, ЭПР которых существенно меньше ЭПР при отражении от идеального уголка. Наличие воды в раскрыве уголка, экранирующей нижнюю грань, эквивалентно неортогональности нижней грани, а потому характер отражения сигнала таким уголком может быть описан с помощью описанного в статье подхода. При типовых условиях нацеливания уголка на радар из-за малой ширины лепестка отражений не существует отражения в строго обратном направлении, а потому необходимо защищать конструкцию уголка от заполнения атмосферными осадками.

Литература

1. В.О.Кобак, Радиолокационные отражатели/ М.: Сов.Радио, 1975, 248 с.
2. А.И.Захаров, Л.Н.Захарова, М.Г.Красногорский, Мониторинг оползневой активности методами радарной интерферометрии с помощью трехгранных УО//Исследование Земли из космоса, 2018, №3, в печати