

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ И РАЗМЕРА РАССЕЙВАТЕЛЯ МЕТОДОМ МНОГОЧАСТОТНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

<sup>1</sup>Резник Е. В., <sup>1</sup>Сухаревский О. И., <sup>2</sup>Тыжненко А. Г.

<sup>1</sup>Институт радиофизики и электроники НАН Украины, Харьков-61085, ул. Проскуры, 12

<sup>2</sup>Харьковский национальный экономический университет, Харьков-61001, пр. Ленина 9А

e-mail: a. tyzhnenko@gmail.com

Поступила в редакцию 24 ноября 2008 г.

Рассмотрен метод идентификации радиолокационной цели, основанный на сравнении поперечников обратного рассеяния, определенных экспериментально и рассчитанных теоретически, на нескольких частотах. В отличие от существующих методов идентификации предлагаемый метод позволяет оценить не только форму цели, но и ее размер в продольном направлении. Принципиальным моментом предлагаемого метода является использование уникальности зависимости поперечника обратного рассеяния от частоты для определенного размера и формы рассеивателя. Новой является методика одновременного определения формы и размера рассеивателя в продольном направлении сравнением эмпирической зависимости поперечника рассеяния от длины волны и аналогичной теоретической зависимости от электрического размера. Использование оценки поперечника обратного рассеяния трехмерной задачи по величине поперечника обратного рассеяния двумерной задачи позволяет существенно упростить задачу идентификации реальной цели. Для демонстрации возможностей предлагаемого метода рассмотрена задача определения продольного размера айсберга в модельном приближении.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** айсберг, идентификация формы и размера

Идентификация цели с помощью анализа регистрируемых отраженных радиолокационных сигналов представляет собой достаточно сложную задачу, так как отраженный сигнал существенно зависит от различных факторов, таких как форма цели, частота локации, угол локации и т.д. Существует несколько подходов к решению данной задачи, таких как: (а) решение обратной задачи рассеяния, (б) регистрация SAR и ISAR изображений, (в) решение задачи на основе методов классификации при помощи сравнения зарегистрированных экспериментальных данных с данными, рассчитанными теоретически.

Для решения обратной задачи рассеяния требуется провести локацию цели при различных углах, что на практике трудно осуществимо. Кроме того, данный подход требует больших вычислительных затрат и обладает малой точностью.

Подходы, основанные на регистрации SAR и ISAR изображений, требуют длительного периода наблюдения отраженных сигналов при движении радара вокруг цели. Использование этих методов дает хороший результат, если цель неподвижна. Существуют методики учета погрешностей, вызываемых движением цели, но они требуют применения специальных методов обработки сигналов, что, в свою очередь, увеличивает временные затраты на получение изображения.

Решение задачи классификации является наиболее подходящим методом идентификации цели за короткий промежуток времени. Основной задачей при этом является экспериментальное определение набора характерных признаков рассеивателя, который сравнивается одним из методов классификации с множеством теоретических наборов (паттернов) тех же признаков для заданного априори множества целей, к которому может принадлежать наблюдаемый объект. На данный момент существуют несколько методов идентификации целей на основе задач классификации [1-3].

В работе [1] представлен метод идентификации, основанный на анализе отраженных сигналов во временной области. Ввиду интегрального характера поперечника рассеяния, метод обладает плохой разрешающей способностью в угловой области. Кроме того, метод требует использования очень коротких импульсов и позволяет получить информацию о форме цели только в освещенной области.

Метод, представленный в работе [2], заключается в сравнении экспериментальных и теоретических поперечников рассеяния при различных углах наблюдения. Численный эксперимент, описанный в работе, демонстрирует достаточно высокую степень идентификации цели, однако, по мнению самих же авторов, высказанному в [3], метод не применим на практике по очевидным соображениям.

В работе [3] предлагается идентифицировать цель, сравнивая экспериментальные и теоретические поперечники обратного рассеяния при различных частотах и одном и том же угле локации. В работе в качестве экспериментального набора поперечников обратного рассеяния используется один из теоретических паттернов. Для сравнения паттернов используется метод главных компонент (МПК), который не во всех случаях позволяет получить достаточную точность идентификации. В той же работе для улучшения степени идентификации вместе с МПК применяется аппарат линейного

дискриминантного анализа (ЛДА). В работе показано, что применение ЛДА позволяет повысить уровень идентификации после использования МГК.

Общим для методов идентификации, основанных на классификации, является сравнение экспериментальных данных с данными, рассчитанными теоретически, для получения которых требуется решать трехмерную задачу рассеяния, строгое решение которой получено не для всех конфигураций рассеивателя.

Принципиальным моментом является то, что существующие методы идентификации ориентированы только на определение формы цели, хотя задача определения размеров цели является актуальной практически во всех радиофизических исследованиях и практических приложениях техники радиолокационных измерений. Этот вопрос интенсивно изучается, в частности, касательно идентификации типа кораблей береговой службой наблюдения [4, 5, 6]. Оценку размера рассеивателя предлагается производить, при этом, по величине интегрального поперечника рассеяния во избежание резких изменений обратного поперечника рассеяния в зависимости от угла локации. Такой метод требует практически неосуществимого расчета интегрального поперечника рассеяния и, кроме того, дает малое разрешение по размерам. Приведенные в [6] расчеты показывают, что метод позволяет, теоретически, дискриминировать только малые, средние и большие суда.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА РАССЕЙВАТЕЛЯ И ЕГО ФОРМЫ

Феноменологически методика идентификации, развиваемая в работе [3] является наиболее близкой к той, что представлена в настоящей работе, за исключением того, что нами предлагается метод, позволяющий определить не только форму, но и размер цели в направлении локации (в плоскости падения). Метод базируется на следующих принципиальных положениях:

- зависимость поперечника обратного рассеяния от частоты уникальна для рассеивателя фиксированного размера и формы [7, 8], что используется также и в [3]; степень различия зависит от формы и тем выше, чем сложнее форма рассеивателя;
- существует возможность определения размеров рассеивателя при сравнении экспериментальной зависимости поперечника обратного рассеяния от частоты и аналогичной теоретической зависимости от электрического размера рассеивателя;
- существует возможность оценки теоретических значений поперечников обратного рассеяния трехмерной задачи, которые предлагается использовать в качестве паттернов, с помощью теоретически рассчитанного поперечника обратного рассеяния двумерной задачи [9, 10].

Первое положение хорошо известно и активно используется в задачах идентификации рассеивателей. Второе положение предложено в настоящей работе и позволяет одновременно определять форму и размер цели. Что касается третьего положения, то оно позволяет существенно упростить составление семейства теоретических зависимостей поперечника обратного рассеяния от электрического размера (паттернов) для множества канонических форм возможных рассеивателей. Кроме того, строгие решения трехмерной задачи рассеяния известны далеко не для всех конфигураций. Важно отметить, что соответствие между трехмерным и двумерным поперечниками рассеяния [9, 10] выполняется при тех же условиях, при которых применимо приближение физической оптики. Эти условия заключаются в том, что размеры рассеивателя в плоскости падения плоской волны ( $L$ ) и в поперечном направлении ( $W$ ) должны быть существенно больше длины волны:

$$W \gg \lambda; L \gg \lambda. \quad (1)$$

В этом случае имеет место формула [9, 10]:

$$\sigma_{3D} \approx \frac{2W^2}{\lambda} \sigma_{2D}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{3D}$  и  $\sigma_{2D}$  – трехмерный и двумерный поперечники обратного рассеяния. В работах [9, 10] условия (1) проверялись экспериментально для рассеяния от открытого конца прямоугольного волновода. При этом длина узкой и широкой стенок волновода изменялась от 5 до 10 длин волн в свободном пространстве. Результаты эксперимента, представленные в работах [9, 10], показали, что точность аппроксимации трехмерного поперечника рассеяния по формуле (2), достаточно высока уже в том случае, когда размеры рассеивателя превышают хотя бы 5 длин волн. Учитывая то, что такая ситуация часто реализуется в радарных измерениях, результаты работ [9, 10] позволяют во многих случаях моделировать трехмерный поперечник рассеяния, опираясь на строгое решение соответствующей двумерной дифракционной задачи. Это особенно касается вопросов рассеяния радиоволн от локальных выемок на морской поверхности, рассеяние от которых аналогично исследованному в [9, 10] случаю рассеяния от открытого конца волновода. Реально такие ситуации возникают при исследовании рассеяния от гравитационных морских волн и айсбергов, а также, например, от полых частей реактивных двигателей самолетов.

Необходимое для реализации предлагаемого метода строгое решение двумерной задачи в случае Е- и Н-поляризации получено в работах [11, 12], с помощью метода Галеркина, где доказана сходимость метода, что гарантирует корректность модельных расчетов и их адекватность в реальных исследованиях.

Отметим, что для пересчета поперечника обратного рассеяния в трехмерном случае по формуле (2), необходимо учитывать поперечный размер ( $W$ ), который в двумерных задачах не фигурирует и его необходимо задавать априори. Этого можно избежать, если вместо рассмотрения частотных зависимостей поперечников обратного рассеяния в случае Е- или Н-поляризации по отдельности рассматривать отношение частотных зависимостей, полученных в каждом из этих случаев. Тогда, согласно формуле (2), будет иметь место соотношение:

$$\sigma_{E,3D} / \sigma_{H,3D} \approx \sigma_{E,2D} / \sigma_{H,2D}. \quad (3)$$

В этом случае нет необходимости учитывать поперечный размер  $W$ , что повышает точность моделирования. Отметим, что это возможно только в том случае, когда зависимости  $\sigma_{E,2D}$  и  $\sigma_{H,2D}$  от частоты существенно отличаются друг от друга, что и имеет место при рассеянии от морских целей.

Предлагаемый метод идентификации предполагает сравнение по некоторому критерию набора отношений поперечников обратного рассеяния  $\sigma_{E,3D} / \sigma_{H,3D}$ , определенных экспериментально на некотором множестве частот при фиксированном угле локации, с семейством теоретических зависимостей поперечников обратного рассеяния  $\sigma_{E,2D}^{(meop)} / \sigma_{H,2D}^{(meop)}$  от электрического размера, рассчитанных для канонических конфигураций рассеивателей при том же угле локации. При этом экспериментальная зависимость  $\sigma_{E,3D} / \sigma_{H,3D}$  от частоты преобразуется в зависимость  $\sigma_{E,2D} / \sigma_{H,2D}$  от волнового вектора, учитывая (3). Теоретическая зависимость отношения  $\sigma_{E,2D}^{(meop)} / \sigma_{H,2D}^{(meop)}$  от электрического размера ( $ka$ ) не предполагает задание размера ( $a$ ) и волнового числа ( $k$ ) в отдельности. Именно этот факт предлагается использовать для определения размера рассеивателя. Действительно, предположим, что форма рассеивателя совпадает с одной из канонических форм, а ее размер в плоскости падения ( $a$ ) не известен. Известно, однако, наименьшее ( $k_{\min}$ ) и наибольшее ( $k_{\max}$ ) значение волнового вектора, соответствующие минимальной и максимальной частоте зондирования. Если  $a = 1$  м, например, то экспериментальная зависимость  $\sigma_{E,2D} / \sigma_{H,2D}$  от  $k$  в точности совпадет с теоретической зависимостью  $\sigma_{E,2D}^{(meop)} / \sigma_{H,2D}^{(meop)}$  от  $ka$  на интервале  $[k_{\min}, k_{\max}]$ . Если же рассеиватель имеет размер  $a = a_s$ , то экспериментальная зависимость  $\sigma_{E,2D} / \sigma_{H,2D}$  от  $k$ , пересчитанная в зависимость от  $a_s k$ , совпадет с теоретической зависимостью  $\sigma_{E,2D}^{(meop)} / \sigma_{H,2D}^{(meop)}$  от  $ka$  на интервале  $[a_s k_{\min}, a_s k_{\max}]$ . Поскольку, однако, размер  $a_s$  нам не известен, то мы не можем пересчитать зависимость  $\sigma_{E,2D} / \sigma_{H,2D}$  от  $k$  в зависимость от  $a_s k$ . Необходимо, поэтому, априори задать множество размеров  $\{a_r\}$  с определенной дискретизацией, перекрывающее интервал возможных изменений размера цели определенной формы,  $[a_{\min}, a_{\max}]$ . Выбирая последовательно из этого множества значения  $a_r$ , пересчитываем экспериментальную зависимость  $\sigma_{E,2D} / \sigma_{H,2D}$  от  $k$  в зависимость от  $a_r k$  и сравниваем с теоретической зависимостью  $\sigma_{E,2D}^{(meop)} / \sigma_{H,2D}^{(meop)}$  от  $ka$  на интервале  $[a_r k_{\min}, a_r k_{\max}]$ . В силу уникальности частотной зависимости поперечника рассеяния от частоты, эти зависимости совпадут в том случае, когда  $a_r = a_s$ , что и позволит определить размер  $a_s$  при известной форме рассеивателя. Поскольку форма рассеивателя априори не известна и ее тоже необходимо определять, то описанная процедура проводится на множестве канонических форм, с одной из которых предположительно совпадает форма рассеивателя. Более сложный случай несовпадения формы и размера цели с каноническими формами и дискретизацией размера  $\{a_r\}$  требует применения статистических методов сравнительного анализа, также как и учет влияния шумов на экспериментальные зависимости поперечников рассеяния от частоты.

Для описания процесса классификации на математическом уровне в простейшем случае будем считать, что цель облучается биполярным локатором, работающим на  $p$  дискретных равноотстоящих частотах в диапазоне  $[f_1; f_p]$ . В результате измерения отраженного сигнала получаем два  $p$ -мерных вектора значений поперечников обратного рассеяния:  $\sigma_E = \{\sigma_{E,i}\}_{i=1}^p$  (в случае Е-поляризации) и  $\sigma_H = \{\sigma_{H,i}\}_{i=1}^p$  (в случае Н-поляризации). Интервалу частот  $[f_1; f_p]$  соответствует интервал значений

волновых чисел  $[k_1; k_p]$ . При этом интервал  $[k_1; k_p]$  также содержит  $p$  равноотстоящих точек. Таким образом, можно говорить об эмпирическом наборе значений поперечников обратного рассеяния при равноотстоящих значениях волнового числа:  $\sigma_E = \{\sigma_E(k_i)\}_{i=1}^p$  (в случае Е-поляризации) и  $\sigma_H = \{\sigma_H(k_i)\}_{i=1}^p$  (в случае Н-поляризации),  $k_i \in [k_1; k_p], i = \overline{1, p}$ .

Предположим, что форма рассеивателя, для которого определяется экспериментальная зависимость поперечника рассеяния от длины волны, нам известна, а размер, который подлежит определению, обозначен  $\tilde{a}$ . Будем считать также, что этот размер совпадает с одним из размеров априорного множества размеров  $\{a_r\}$ , т.е.  $\tilde{a} = a_r$ . Пусть экспериментально полученные значения поперечника обратного рассеяния от волнового вектора имеют вид, показанный на рис. 1а).

Точно такой же будет и теоретическая зависимость от  $ka$ , если  $a_r = 1$  м. Если же  $a_r > 1$  м., то преобразованная исходная зависимость, изображенная на рис. 1а), растянется и будет иметь вид, представленный на рис. 1б).

Поскольку размер  $\tilde{a}$  нам не известен, мы строим такие зависимости для каждого  $a_i \in \{a_r\}$ . При этом каждая зависимость строится на своем интервале, именно,  $[k_{\min} a_i, k_{\max} a_i]$  и сравнивается с теоретической зависимостью поперечника рассеяния от  $ka$ , на таком же интервале. Эти зависимости полностью совпадут для случая  $a_i = \tilde{a}$  в данном абстрактном случае, что и определит размер рассеивателя данной формы.

Полагая, что форма рассеивателя, для которого определены экспериментальные значения поперечника обратного рассеяния, принадлежит набору канонических форм, мы рассчитываем теоретические зависимости поперечников обратного рассеяния от электрического размера  $ka$  в интервале  $[k_{\min} a_{\min}, k_{\max} a_{\max}]$  для каждой из канонических форм рассеивателя, размеры которого находятся в интервале  $[a_{\min}, a_{\max}]$ :  $\sigma_E^{(теор)} = \sigma_E^{(теор)}(ka)$  и  $\sigma_H^{(теор)} = \sigma_H^{(теор)}(ka)$ . Задавая предполагаемое множество значений размера рассеивателя,  $a_r \in [a_{\min}; a_{\max}], r = \overline{1, m}$ , рассчитываем  $2m$   $p$ -мерных векторов теоретических значений поперечников обратного рассеяния для случаев Е- и Н-поляризации:  $m$  векторов для случая Е-поляризации,  $\sigma_{E,r}^{(теор)} = \{\sigma_E^{(теор)}(k_i a_r)\}_{i=1}^p$ , и  $m$  векторов для случая Н-поляризации,  $\sigma_{H,r}^{(теор)} = \{\sigma_H^{(теор)}(k_i a_r)\}_{i=1}^p$ ,  $k_i a_r \in \Delta_r$ , где  $\Delta_r = [k_{\min} a_r; k_{\max} a_r], r = \overline{1, m}$ . Согласно (3), рассчитываем вектор  $v_r = \sigma_E / \sigma_H$  по экспериментальным значениям поперечника обратного рассеяния на множестве волновых чисел  $k_i \in [k_1; k_p], i = \overline{1, p}$  и пересчитываем этот вектор на интервалы  $[k_{\min} a_r; k_{\max} a_r]$  для всех  $a_r \in [a_{\min}; a_{\max}], r = \overline{1, m}$ . Для набора канонических форм рассчитываем множество теоретических зависимостей  $v_r^{(теор)} = \sigma_{E,r}^{(теор)} / \sigma_{H,r}^{(теор)}$  от  $ka$  в интервале  $[k_{\min} a_{\min}; k_{\max} a_{\max}]$ . Для каждого  $a_r \in [a_{\min}; a_{\max}]$  из множества возможных размеров  $\{a_r\}$  сравниваем экспериментальную зависимость  $v_r = \sigma_E / \sigma_H$ , пересчитанную на интервал  $\Delta_r$ , с теоретической зависимостью  $v_r^{(теор)} = \sigma_{E,r}^{(теор)} / \sigma_{H,r}^{(теор)}$  на том же интервале на множестве  $p$  равноотстоящих точек для каждой канонической формы. Степень подобия экспериментальной и теоретической зависимости определяем по коэффициенту подобия  $C_r(v_r, v_r^{(теор)})$  для  $r$ -го интервала по формуле

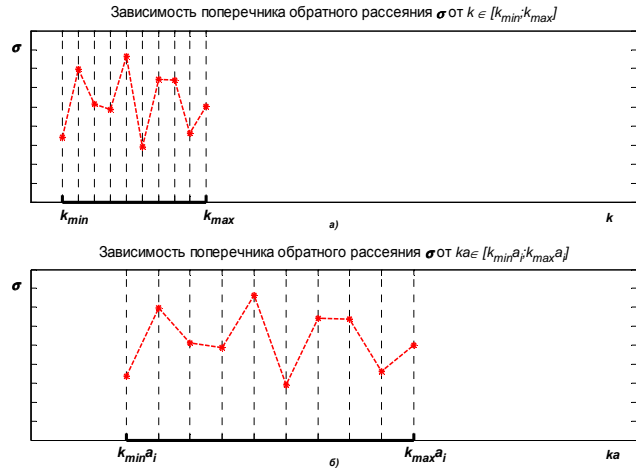


Рис. 1. а) Экспериментальная зависимость поперечника обратного рассеяния от  $k$ ; б) Теоретическая зависимость поперечника обратного рассеяния от  $ka$  при некотором размере  $a_i > 1$ .

$$C_r(v_r, v_r^{(meop)}) = 1 - \frac{\|v_r - \tilde{v}_r^{(meop)}\|}{\|v_r\| + \|\tilde{v}_r^{(meop)}\|}, \quad (4)$$

где  $\tilde{v}_r^{(meop)}$  – это вектор  $v_r^{(meop)}$ , нормированный таким образом, что первые значения векторов  $v_r$  и  $\tilde{v}_r^{(meop)}$  совпадают. Чем ближе коэффициент подобия (4) к 1, тем ближе экспериментальные значения  $v_r$  к теоретическим значениям  $v_r^{(meop)}$ . При некотором значении  $r = r^* (1 \leq r^* \leq m)$  коэффициент подобия  $C_r^i(v_r, v_r^{(meop)})$  для  $i$ -той канонической формы, будет равен или достаточно близок 1, что означает, что размер рассеивателя можно положить равным  $a_{r^*}$  с определенной степенью достоверности. При этом его конфигурация имеет  $i$ -тую каноническую форму.

### ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для демонстрации предлагаемого метода рассмотрим задачу определения размера айсберга, погруженного в идеально проводящее полупространство  $y \leq 0$ . Надводная часть айсберга представляет собой полушарие радиуса  $a$  с центром в начале координат. Подводная часть представлена частью сферы с центром в точке  $(0; -y_0; 0)$ , ограниченной полуплоскостью  $y = 0$ . Тело айсберга аппроксимируется диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 3.2 - j0.023$  [13]. Для идентификации используются строгие решения соответствующих двумерных задач рассеяния в случае E- и H-поляризации, полученные в работе [14]. Отношение объема подводной части к объему надводной части выбрано равным 4, что примерно соответствует наблюдаемым случаям. На рис. 2 представлено сечение трехмерной модели айсберга плоскостью  $xOy$ , задающее геометрию соответствующей двумерной задачи.

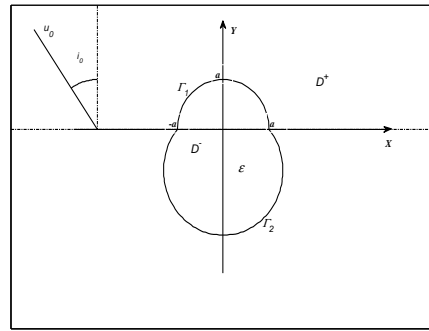


Рис. 2. Сечение трехмерной модели плоскостью  $xOy$ .  $u^0$  – падающее поле,  $i^0$  – угол падения, отсчитывается против часовой стрелки от положительного направления оси  $Y$ .

Набор теоретических векторов  $v_r^{(meop)}$  рассчитан при угле наблюдения  $i_0$ , равным 80 градусам, в диапазоне частот  $f \in 6 : 0.2 : 8$  (МГц). Данному диапазону частот соответствует изменение длины волны  $\lambda$  от 38 до 50 м. В качестве массива предполагаемых размеров выбран массив  $a \in 125 : 5 : 250$  м. Размер  $a$  определяет высоту надводной части айсберга. Максимальные продольный ( $L$ ) и поперечный ( $W$ ) размеры для рассматриваемой модели считаются одинаковыми и изменяющимися в пределах:  $2a \in 250 : 5 : 500$  м, что больше  $5\lambda$ , и, в свою очередь, обеспечивает выполнение условий (1). В рассматриваемом диапазоне частот возможность аппроксимации морской воды идеально проводящим металлом доказана в работе [15].

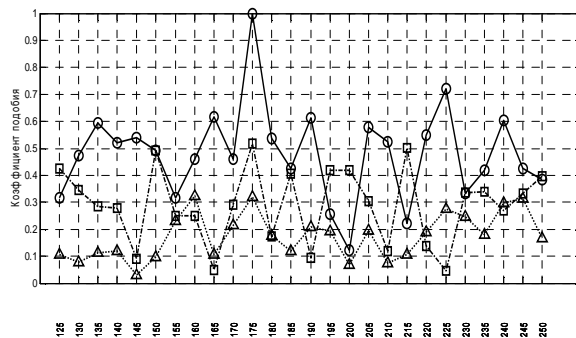


Рис. 3. Зависимость коэффициентов подобия от предполагаемых размеров для айсберга размера 175 м. Окружности – полукруглая вершина; квадраты – трапециевидная; треугольники – треугольная.

В предположении, что реальная цель имеет полукруглую форму и размер  $a = 175$  м, проведено сравнение экспериментального вектора  $v_r$ , соответствующего данному размеру, с каждым теоретическим вектором из имеющегося набора. В качестве экспериментального вектора, как и в [3], бралась часть теоретической зависимости  $v_r^{(meop)}$ , соответствующей размеру  $a = 175$  м. На рис. 3. представлены значения коэффициентов подобия (4) в зависимости от предполагаемых размеров для трех канонических форм верхней части айсберга:

полукруглой – круглые маркеры, трапецевидной – квадратные и треугольной – треугольные маркеры. Как следует из рис. 3, проведенная классификация с использованием коэффициента подобия (4), достоверно идентифицирует «наблюдаемый» айсберг как айсберг с полукруглой вершиной и продольным размером 175 м.

### ВЫВОДЫ

В работе предложен метод идентификации, позволяющий определить форму и размер цели. В основу метода положено сравнение поперечников обратного рассеяния, определенных экспериментально и рассчитанных теоретически. Принципиальным моментом предлагаемого метода является использование уникальности зависимости поперечника обратного рассеяния от частоты для определенного размера и формы рассеивателя. Новой является методика одновременного определения формы и размера рассеивателя сравнением эмпирической зависимости поперечника рассеяния от длины волны и аналогичной теоретической зависимости от электрического размера. Использование оценки поперечника обратного рассеяния трехмерной задачи по величине поперечника обратного рассеяния двумерной задачи позволяет существенно упростить задачу идентификации реальной цели при определенных условиях, но не меняет сути метода. В общем случае, предложенный метод идентификации цели применим для объектов любой формы, как неподвижных, так и движущихся с большой скоростью, при условии составления паттернов на основе решения трехмерных и двумерных задач рассеяния. Основанием для этого является тот факт, что метод идентификации не требует сложной математической обработки данных радарных измерений. Учитывая, что основная часть вычислений связана с составлением паттернов для набора канонических форм и проводится предварительно, процесс классификации занимает практически нулевое время. Время обработки, безусловно, увеличится при учете шумов и несовпадения формы рассеивателя ни с одной из канонических форм, но это касается любого метода идентификации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seo D.-K., Kim K. T., Choi I.-S., Kim H.-T. Wide-Angle Radar Target Recognition With Subclass Concept // Progress In Electromagnetic Research, PIER. – 2004. – Vol. 44. - P. 231-248.
2. Lee. K.-C., Ou J.-S., Huang C.-W. Angular-Diversity Radar Recognition Of Ships By Transformation Based Approaches – Including Noise // Progress In Electromagnetic Research, PIER. – 2007. - Vol 72. – P. 145-158.
3. Lee K.-C., Huang C.-W., Fang M.-C. Radar Target Recognition By Projected Features Of Frequency-Diversity RCS // Progress In Electromagnetic Research, PIER. – 2008. – Vol. 81. – P. 121-133, 2008.
4. Sevgi A., Ponsfort A., and Chan H. C. An Integrated Maritime Surveillance System Based on High-Frequency Surface-Wave Radars, Part 1: Theoretical Background and Numerical Simulations // IEEE Antennas and Propagation Magazine. - 2001. - Vol. 43, No. 4. – P. 28-43.
5. Sevgi A., Ponsfort A., and Chan H. C. An Integrated Maritime Surveillance System Based on High-Frequency Surface-Wave Radars, Part 2: Operational Status and System Performance // IEEE Antennas and Propagation Magazine. - 2001. - Vol. 43, No. 4. – P. 52-63.
6. Leong H. and Wilson H. An Estimation and Verification of Vessel Radar Cross Sections for High-Frequency Surface-Wave Radar // IEEE Antennas and Propagation Magazine. - 2006. - Vol. 48, No. 2. – P. 11-16.
7. Trizna D. B. Xu L. Multi-frequency HF radar for mapping current shear and vector winds // OCEANS 2003. Proceedings. 22-26 Sept. 2003. - Vol. 4. - P. 2332 – 2334.
8. Dennis B. Trizna, Lillian Xu, “Microwave and HF Multi Frequency Radars For Dual-Use Coastal Remote Sensing Applications”. Imaging Science Research, Inc. Report. [http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/F05.1\(0448\).pdf](http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA05/pdf/F05.1(0448).pdf)
9. Ling Hao. RCS of Waveguide Cavities: A Hybrid Boundary-Integral Approach // IEEE Trans. On Antennas and Propagation. – 1990. – Vol. 38, No. 9. – P. 1413-1420.
10. Reuster D. D., Thiele G. A. A Field Iterative Method for Computing the Scattered Electric Fields at the Apertures of Large Perfectly Conducting Cavities // IEEE Trans. On Antennas and Propagation. – 1995. – Vol. 43, No. 3. – P. 286-290.
11. Tyzhnenko A. G. Convergent Galerkin MoM Solver for the EFIE In Two Dimensions // Electromagnetics, - 2005. - Vol. 25, No. 3. - P. 121-130.
12. Tyzhnenko A G., Ryznyk Y. V. Convergent Galerkin MoM solution for 2-D H-scattering from screens // Electromagnetics. - 2005. - Vol. 25, No. 4. - P. 321-332.
13. Albert M. D., Tan T. E. Ewe H. T, and Chuah H. T. A Theoretical and Measurement Study of Sea Ice and Ice Shelf in Antarctica as Electrically Dense Media // PIER Symposium, Hangzhou, China – 2005 Aug. 22-26. – P. 20-24.
14. Тыжненко А. Г., Резник Е. В. Особенности рассеяния электромагнитных волн на морской поверхности, приводящие к аномальному рассеянию // Радиотехника, Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. - 2007. -Вып. 149. - С. 27-31.
15. Barrick D. E. Grazing behavior of scatter and propagation above any rough surface // IEEE Trans. On Antennas and Propagation. – 1998. – Vol. 46, No. 1. – P. 73-92.