

УДК 621.391:621.396:621.369

А. А. Ханкаев, В. А. Пахотин, К. В. Власова, А. Н. Алещенко**ОЦЕНКА УГЛОВ МЕСТА ЦЕЛИ
В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ
МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

102

Рассматривается проблема оценки углов места цели в радиолокаторах метрового диапазона волн, связанная с интерференцией прямой и отраженной от поверхности земли волнами. В области малых углов места диаграммы направленности для прямой и отраженной волны сливаются вместе и существенно искажают оценки углов места цели. Анализируется возможность решения задачи оценки углов места цели тремя методами: методом углового спектрального анализа, методом, основанном на уравнениях правдоподобия, и методом максимального правдоподобия с высоким разрешением, разработанным в БФУ им. И. Канта. На основе функционала правдоподобия выводятся выражения, определяющие диаграммы направленности антенной системы и поверхности функционала правдоподобия. Представляются результаты модельных исследований потенциальных возможностей оценок углов места тремя методами. Показывается, что метод максимального правдоподобия с высоким разрешением не имеет систематических интерференционных погрешностей оценок углов места – как в области малой корреляции, так и в области большой корреляции прямой и отраженной волн. Данный метод решает проблему оценки углов места в диапазоне $0,5 \div 85^\circ$ при отношении сигнал / шум ≈ 30 дБ.

The problem of estimating the angles of the target location in the radar meter wave range, associated with the interference of direct and reflected from the earth's surface waves. In the area of small site angles, the directional patterns for the forward and reflected waves merge together and significantly distort the estimates of the target site angles. The possibility of solving the problem of estimating the angles of the target site by three methods is analyzed: the method of angular spectral analysis, the method based on the likelihood equations, the method of maximum likelihood with high resolution, developed at the IKBFU. On the basis of the likelihood functional, expressions are derived that define the radiation patterns of the antenna system and the surface of the likelihood functional. Results of model researches of potential possibilities of estimates of angles of a place by three methods are presented. It is shown that the maximum likelihood method with a high resolution interference has no systematic errors in estimates of elevation angles, as the low correlation and the large correlation of direct and reflected waves. This method solves the problem of estimating the angles of the place in the range of $0,5 \div 85^\circ$ with a signal-to-noise ratio of ≈ 30 dB.



Ключевые слова: радиолокационные системы, оптимальный прием, метод максимального правдоподобия, оценка углов места, функционал правдоподобия, сверхразрешение.

Keywords: radar system, the optimum reception method of maximum likelihood, estimation of the elevation angles, the functional maximum likelihood estimation, superresolution.

Введение

Современные радиолокационные системы (РЛС) – сложные радиотехнические устройства, предназначенные для обнаружения и оценки координат воздушных целей. В современных РЛС оценки азимута и времени приема сигнала вполне удовлетворительные. Однако существует проблема оценки углов места цели. Она связана с наличием в принятом сообщении прямой волны и отраженной от поверхности земли. Для радиолокационных станций (начиная с метрового диапазона волн) технически сложно создать узкие диаграммы направленности в вертикальной плоскости в связи с ограниченностью длины вертикальной линейки элементарных вибраторов. В результате в области малых углов места диаграммы направленности прямой и отраженной волн частично или полностью перекрываются и критерий разрешения Рэля не выполняется. Это область высокой корреляции прямой и отраженной волн. Для метрового диапазона волн область высокой корреляции связана с угловым диапазоном $0 \div 7^\circ$. Для РЛС этот угловой диапазон особенно важен: он определяет дальности до цели от ≈ 100 км до расстояния прямой видимости. Однако в угловом диапазоне метод углового спектрального анализа, который используется в современных РЛС, является неудовлетворительным. Оценки углов места, полученные этим методом, имеют существенные систематические погрешности, обусловленные интерференцией прямой и отраженной волн. В связи с этим возникает задача оценки углов места в системах локации в области высокой корреляции прямой и отраженной волн. В настоящей работе рассмотрена возможность решения поставленной задачи с помощью метода, основанного на уравнениях правдоподобия (1), (2) и с помощью метода максимального правдоподобия с высоким разрешением (3), разработанного в БФУ им. И. Канта.

Основы теории

Для определения высоты цели используются оценки углов места и времени приема сигнала, получаемые в РЛС. Затем они пересчитываются в дальность до цели и высоту цели. Для оценки углов места используется антенная система, состоящая из одной или из совокупности вертикальных линеек элементарных вибраторов. Запишем принятую реализацию на одном вибраторе в виде следующего выражения:



$$\hat{Y}_{n,m,k} = \hat{U}_1 \exp(-i(\bar{k} \bar{R}_{n,m,k})) + \hat{U}_2 \exp(i(\bar{k} \bar{R}_{n,m,k})) + \hat{U}_{\text{шн},m,k}, \quad (1)$$

где индексы n, m, k определяют местоположение вибратора; \bar{k} – волновой вектор принимаемой волны; $\bar{R}_{n,m,k}$ – определяющий местоположение вибратора; \hat{U}_1 – комплексная амплитуда прямой волны в точке приема; $\hat{U}_2 = \hat{U}_1 \hat{F}_B$ – комплексная амплитуда отраженной от поверхности земли волны; \hat{F}_B – коэффициент отражения Френеля для вертикальной поляризации.

На основании (1) запишем функционал правдоподобия:

104

$$\Delta(\hat{U}'_1, \hat{U}'_2, \bar{k}') = \sum_{n,m,k}^{N,M,K} \left| \hat{Y}_{n,m,k} - \hat{U}'_1 \exp(-i(\bar{k}' \bar{R}_{n,m,k})) + \hat{U}'_2 \exp(i(\bar{k}' \bar{R}_{n,m,k})) \right|^2, \quad (2)$$

где штрихами обозначены оцениваемые неизвестные параметры.

Учитывая, что функционал правдоподобия является поверхностью в пространстве оцениваемых параметров, минимум которой определяет наиболее вероятные параметры сигнала, продифференцируем (2) по параметрам \hat{U}'_1, \hat{U}'_2 и приравняем дифференциалы нулю. В результате получим уравнения правдоподобия, которые могут быть решены относительно \hat{U}'_1 и \hat{U}'_2 :

$$\hat{U}'_1(\bar{k}') = \frac{1}{MNK} \frac{\sum_{n,m,k}^{N,M,K} \left(\hat{Y}_{n,m,k} (\exp(i(\bar{k}' \bar{R}_{n,m,k})) - \hat{R}(\bar{k}') \exp(-i(\bar{k}' \bar{R}_{n,m,k}))) \right)}{1 - |\hat{R}(\bar{k}')|^2},$$

$$\hat{U}'_2(\bar{k}') = \frac{1}{MNK} \frac{\sum_{n,m,k}^{N,M,K} \left(\hat{Y}_{n,m,k} (\exp(-i(\bar{k}' \bar{R}_{n,m,k})) - \hat{R}(\bar{k}') \exp(i(\bar{k}' \bar{R}_{n,m,k}))) \right)}{1 - |\hat{R}(\bar{k}')|^2}, \quad (3)$$

где $\hat{R}(\bar{k}') = \frac{1}{K} \sum_k^K \exp(i2(\bar{k}' \bar{R}_{n,m,k}))$, $\hat{R}(\bar{k}')$ – коэффициент корреляции между прямой и отраженной волнами.

Выражения (3) определяют отдельные диаграммы направленности прямой и, соответственно, отраженной волн. В области малой корреляции прямой и отраженной волн, когда критерий разрешения Рэля выполняется, выражения (3) могут быть использованы для оценки азимутов и углов места. Более того, они учитывают значение коэффициента корреляции между прямой и отраженной волнами и не приводят к систематическим интерференционным погрешностям оценок углов места. Однако в области высокой корреляции, когда критерий Рэля не выполняется, вместе с основными максимумами диаграмм направленности прямой и отраженной волн появляется максимум в области нуля углов места. Он обусловлен знаменателем в выражениях (3). Предел этих выражений при угле места $\beta \rightarrow 0$ стремится к бесконечности. Следовательно, в области высокой корреляции прямой и отраженной волн использовать выражения (3) для оценки углов места оказывается невозможным.



возможным. В этих условиях предлагается использование преобразованного функционала правдоподобия. Для этого функциональные зависимости (3) подставляются в функционал правдоподобия (2), который преобразуется к одному из двух видов:

$$\Delta 1(\bar{k}') = \sum_{n,m,k}^{N,M,K} |\hat{Y}_{n,m,k}|^2 - \sum_{n,m,k}^{N,M,K} (\hat{Y}_{n,m,k}^* (\hat{U}'_1(\bar{k}') \exp(-i(\bar{k}' \bar{R}_{n,m,k}))) + \hat{U}'_2(\bar{k}') \exp(i(\bar{k}' \bar{R}_{n,m,k}))))$$

или

$$\Delta 1(\bar{k}') = \sum_{n,m,k}^{N,M,K} |\hat{Y}_{n,m,k}|^2 - \sum_{n,m,k}^{N,M,K} \left| \hat{U}'_1(\bar{k}') \exp(-i(\bar{k}' \bar{R}_{n,m,k})) + \hat{U}'_2(\bar{k}') \exp(i(\bar{k}' \bar{R}_{n,m,k})) \right|^2 \quad (4)$$

В результате преобразованный функционал правдоподобия будет являться поверхностью в пространстве лишь двух параметров: азимута $\hat{\alpha}$ и угла места $\hat{\beta}$. Комплексные амплитуды прямой и отраженной волн определяются автоматически. Математическое ожидание от выражения (4) в точке минимума функционала при $\bar{k}' = \bar{k}$ определяет дисперсию шума в принятом сообщении:

$$M(\Delta 1(\bar{k}' = \bar{k})) = \sigma^2 N M K. \quad (5)$$

Второе выражение в (4) имеет ясный физический смысл. Преобразованный функционал правдоподобия определяет разность мощности принятой реализации и мощности копии сигнала (термин «энергия» заменен на термин «мощность» в связи с измерениями в единый момент времени).

В настоящее время в системах радиолокации для оценки азимута и угла места используют метод углового спектрального анализа (преобразование Фурье). Выражение для диаграммы направленности в этом случае можно получить на основании функционала правдоподобия (2), заменяя его правую часть плоской волной с комплексной амплитудой \hat{U}'_0 :

$$\Delta(\hat{U}'_0, \bar{k}') = \sum_{n,m,k}^{N,M,K} \left| \hat{Y}_{n,m,k} - \hat{U}'_0 \exp(-i(\bar{k}' \bar{R}_{n,m,k})) \right|^2. \quad (6)$$

Дифференцируя выражение (6) по \hat{U}'_0 и приравнявая дифференциал нулю, можно получить выражение для диаграммы направленности:

$$\hat{U}'_0(\bar{k}') = \frac{1}{N M K} \sum_{n,m,k}^{N,M,K} \hat{Y}_{n,m,k} \exp(i(\bar{k}' \bar{R}_{n,m,k})). \quad (7)$$

В связи с тем, что в функционале правдоподобия (6) правая и левая части не соответствуют друг другу, решение методом углового спектрального анализа при суперпозиции прямой и отраженной волн не является оптимальным и характеризуется наличием систематических



интерференционных погрешностей в оценке углов места и азимутов. В области высокой корреляции максимумы диаграмм направленности сливаются в один максимум.

Таким образом, в настоящей работе производится сравнение возможностей оценки углов места тремя методами: методом углового спектрального оценивания (7), методом максимального правдоподобия с высоким разрешением (4), методом уравнений правдоподобия (3).

Результаты модельных исследований

Для проведения модельных исследований особенностей решения задачи оценки углов места цели разработан алгоритм расчета. В качестве антенной системы принята конфигурация антенной системы РЛС «Резонанс» (4) с преобразованиями, усиливающими возможности оценки азимутов и углов места цели. Антенная система состоит из 64 вертикальных линеек элементарных вибраторов, равномерно расположенных по контуру квадрата. Сторона квадрата равна 40 м. Она содержит 16 вертикальных линеек вибраторов длиной 25 м. В каждой вертикальной линейке содержится 10 вибраторов. Зависимость модуля коэффициента корреляции между прямой и отраженной волнами (рис. 1) позволяет разделить угловой диапазон на область малой корреляции ($7 \div 85^\circ$) и область высокой корреляции ($0 \div 7^\circ$).

106

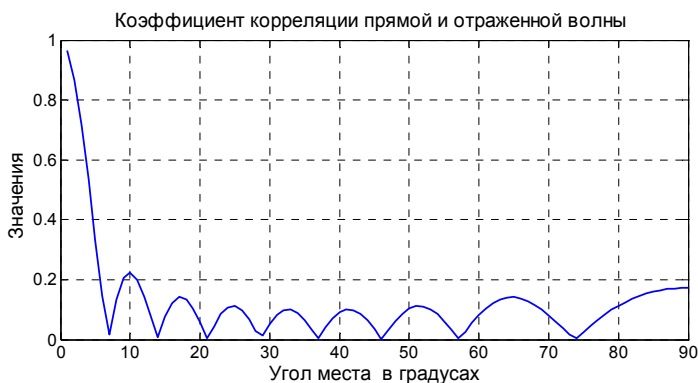
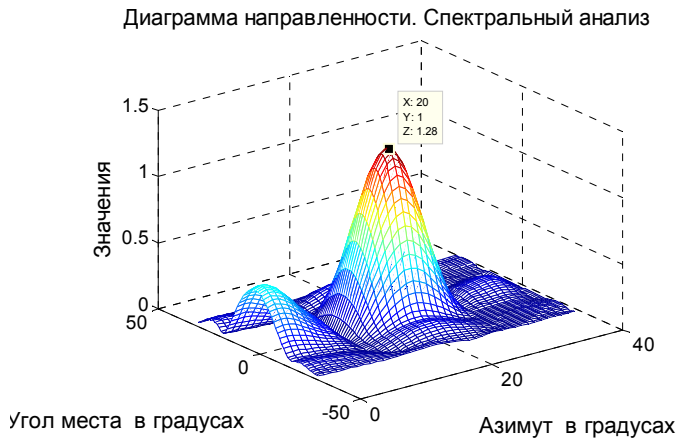


Рис. 1. Зависимость модуля коэффициента корреляции между прямой и отраженной волнами

Принятая антенная система в области малой корреляции обеспечивает однозначность оценки азимута и угла места прямой и отраженной от поверхности земли волн и позволяет увеличить амплитуду прямой волны за счет сложения амплитуд прямой и отраженной волн. Проблемой является получение оценок в области высокой корреляции.

В этой области метод углового спектрального анализа (7) оценивает угол места с большой систематической погрешностью за счет того, что диаграммы направленности прямой и отраженной волн сливаются вместе (рис. 2).



107

Рис. 2. Двумерная диаграмма направленности, полученная методом углового спектрального анализа: модельное значение азимута – 20°; угла места – 5°; диаграммы направленности прямого и отраженного луча сливаются в единый максимум; оценка угла места – 1°

Метод, основанный на уравнениях правдоподобия (3), также не дает оценок углов места (рис. 3). Диаграмма направленности имеет два максимума. Максимум при нуле угла места даже при модельном значении угла места превышает основной максимум диаграммы направленности. Критерий отбора решений максимума диаграммы направленности перестает работать.

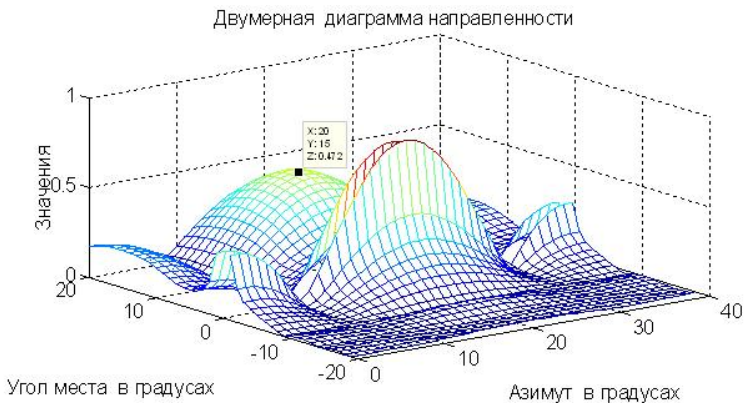


Рис. 3. Двумерная диаграмма направленности антенной системы для прямого луча: модельное значение азимута – 20°; угла места – 15°; критерий максимума поверхности функционала не может дать решение, однако решение существует – оно отмечено точкой

Метод максимального правдоподобия, основанный на функционале правдоподобия (4), в области высокой корреляции позволяет дать



оценку угла места для прямой и отраженной волн (рис. 4). Поверхность обратного функционала правдоподобия имеет два четких максимума, определяющих оценки азимутов, углов места, комплексных амплитуд прямой и отраженной волн.

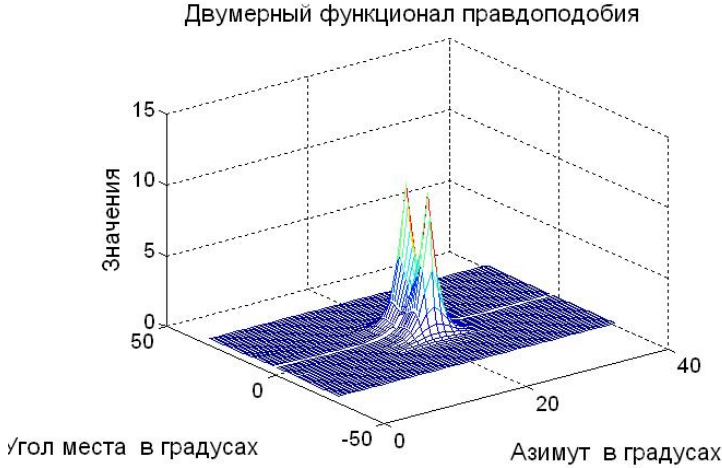


Рис. 4. Двумерный функционал правдоподобия:
модельное значение азимута — 20°; угла места — 5°;
решение вполне удовлетворительное

На рисунке 5 показаны погрешности углов места, полученные с помощью углового спектрального анализа (7) и методом максимального правдоподобия на основе функционала правдоподобия (4). Первый метод имеет существенные систематические погрешности. Второй метод имеет лишь случайные погрешности, определяемые отношением сигнал / шум.

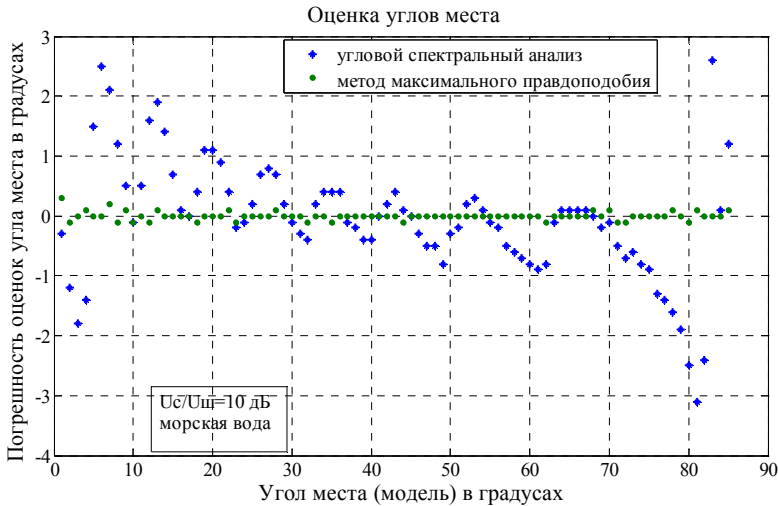


Рис. 5. Погрешности оценок углов места, полученные двумя методами при отношении сигнал / шум 10 дБ. Морская вода



На рисунке 6 показаны погрешности оценок углов места, полученных двумя методами в области высокой корреляции прямой и отраженной волн. Отмечается наличие систематических погрешностей оценки углов места, полученных методом углового спектрального анализа. Метод максимального правдоподобия позволяет получать оценки углов места в диапазоне углов $0,5 \div 10^\circ$.

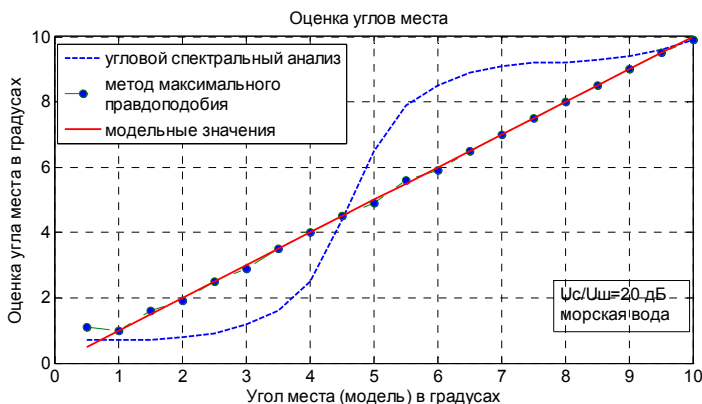


Рис. 6. Оценка углов места в области $0 - 10^\circ$; коэффициент корреляции меняется в пределах $0,99 - 0,22$; отношение сигнал / шум равно 20 дБ. Морская вода

Основные результаты

Проведен анализ возможности решения задачи оценки углов места цели по данным РЛС метрового диапазона:

- установлено, что метод углового спектрального анализа оценивает углы места цели с большими систематическими погрешностями и не может быть использован в РЛС метрового диапазона;

- показано, что метод, основанный на уравнениях правдоподобия в области высокой корреляции прямой и отраженной волн, не может быть использован РЛС метрового диапазона в связи с наличием дополнительного максимума диаграммы направленности при нулевых значениях углов места;

- установлено, что проблема оценки углов места в РЛС метрового диапазона решается в угловом диапазоне $0,5 \div 85^\circ$ методом максимального правдоподобия на основе функционала.

Список литературы

1. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем : учеб. пособие. М., 2003.
2. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М., 1983.
3. Пахотин В.А., Власова К.В. Решение задачи определения угловых координат объекта методом максимального правдоподобия // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2010. Вып. 4 : сер. физико-математические науки. С. 47 – 54.



4. Радиолокационная станция кругового обзора «Резонанс»: пат. Рос. Федерации № 2624736 ; заявл. 08.12.2015.

Об авторах

Артемий Александрович Ханкаев — студент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: VPakhotin@kantiana.ru

Валерий Анатольевич Пахотин — д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: VPakhotin@kantiana.ru

Ксения Валерьевна Власова — канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийская государственная академия рыбопромышленного флота, Россия.

E-mail: p_ksenia@mail.ru

Алексей Николаевич Алещенко — канд. техн. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: AAleshchenko@kantiana.ru

The authors

Artemiy A. Khankaev, Undergraduate Student, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: VPakhotin@kantiana.ru

Prof. Valery A. Pakhotin, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: VPakhotin@kantiana.ru

Dr Ksenia V. Vlasova, Associate Professor, Baltic Fishing Fleet State Academy, Russia.

E-mail: p_ksenia@mail.ru

Dr Alexey N. Aleschenko, Associate Professor, I. Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: AAleshchenko@kantiana.ru