

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА *MUSIC* ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛА МЕСТА МАЛОВЫСОТНЫХ ЦЕЛЕЙ НАД ВЗВОЛНОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ МОРЯ

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: pedenko@ire.kharkov.ua

Выполнено компьютерное моделирование измерения угла места маловысотной цели над взволнованной поверхностью моря с использованием метода *MUSIC* в условиях сильного диффузного отражения. Установлено, что наибольшее влияние на величину ошибок измерения оказывает часть диффузного отражения, приходящая из ближней к приемной системе зоны «блестящей» поверхности. С целью уменьшения величины ошибок предложено оси антенн, входящих в состав приемной антенной решетки, устанавливать под положительным углом к поверхности раздела. При этом диаграммы направленности антенн должны максимально подавлять сигналы диффузного отражения, приходящие из ближней зоны, обеспечивая достаточный уровень приема сигнала, поступающего от цели. Проанализированы характеристики ошибок измерения угла места в разных фазах интерференции прямого и зеркального сигналов в центре приемной антенной решетки и при различных углах места осей приемных антенн. Ил. 4. Табл. 2. Библиогр.: 5 назв.

Ключевые слова: *MUSIC*, маловысотная цель, измерение угла места, многолучевое распространение, моделирование.

Радиолокационное сопровождение маловысотных целей происходит в условиях многолучевого распространения, связанного с отражением радиоволн от поверхности суши или моря. Многолучевые сигналы, поступая на вход приемного устройства радиолокационной станции (РЛС) наряду с прямыми сигналами от цели, приводят к ошибкам измерения координат цели, в частности, угла места. Предложен ряд решений, позволяющих уменьшить эти ошибки [1]. Однако поиск новых методов, обеспечивающих более высокие точности измерения в различных условиях либо реализуемых более простыми техническими решениями, продолжается.

Так, на протяжении последних десятилетий опубликован ряд работ, касающихся измерения углов прихода с использованием методов высокого спектрального разрешения, их обзор выполнен в работе [2]. Рядом достоинств, в том числе относительно высоким быстродействием и меньшей чувствительностью к неидентичности измерительных каналов, обладает метод классификации множественных сигналов *MUSIC* [3]. Несмотря на то что теория спектрального анализа с использованием этого метода разработана достаточно глубоко, публикаций, посвященных его использованию для измерения углов места маловысотных целей, представлено крайне мало. Исследования, выполненные в этих работах, в большинстве случаев базируются на модели зеркального отражения от поверхности раздела. Сигналы диффузного отражения в них представлены белым шумом в соответствии с идеей, положенной в основу *MUSIC*.

Однако такой подход не соответствует реальным условиям формирования сигналов над неровной поверхностью моря или суши. Как из-

вестно [1, 4], диффузное отражение распределено крайне неравномерно по углам прихода, что не отвечает характеристикам белого пространственного шума. Именно это несоответствие и вызывает сомнения относительно эффективности метода в условиях сильного диффузного отражения.

Настоящая работа ставит своей задачей дать оценку ошибкам измерений углов места маловысотных целей в условиях сильного диффузного отражения и, по возможности, наметить пути их уменьшения.

1. Методика исследований. Исследования проводились путем численного статистического моделирования на ЭВМ с использованием модели поля, разработанной нами [5] на основе теории «блестящей поверхности» [1, 4]. Условные обозначения, используемые ниже, совпадают с обозначениями [5].

В связи с невозможностью охвата в одной работе всего многообразия условий была выбрана типичная геометрия трассы, вертикальный размер приемной антенной системы и рабочая длина волны, соответствующие реальным условиям работы РЛС. Волнение моря было выбрано таким, чтобы обеспечить условия сильного диффузного отражения. При этом параметры трассы и волнения, использованные при моделировании, были следующими: длина трассы $D = 2000$ м; высота центра приемной антенны над поверхностью $h_R = 12$ м, высота точечного источника излучателя $h_T = 10,6$ м, среднеквадратичная высота неровностей поверхности $\sigma_h = 0,266$ м (волнение моря 3 балла), максимальный наклон неровностей морской поверхности $\beta_{\max} = 0,05$, рабочая длина волны $\lambda = 3,2$ см, вертикальный размер антенной решетки $L = 2,5$ м, расстояние между соседними

элементами решетки $d = \lambda/2$, а их количество $N = 153$. Поле при моделировании создавалось изотропным точечным источником излучения, что обеспечивало равномерную подсветку всей «блестящей поверхности», участвовавшей в формировании диффузного отражения.

При дальнейшем изложении большинство угловых параметров будем выражать в долях $\Theta_{0,5}$, где $\Theta_{0,5} = 1^\circ$ – ширина по уровню половинной мощности суммарной диаграммы направленности виртуальной моноимпульсной антенны, имеющей размер L . Это облегчает сравнение эффективности исследуемого метода с другими методами.

При указанных выше параметрах угловая высота цели над поверхностью $\varepsilon_T = 0,3 \Theta_{0,5}$, коэффициент зеркального отражения $\rho_s = 0,5$, коэффициент диффузного отражения $\rho_d = 0,35$.

На первом этапе для выбранной геометрии трассы и параметров морской поверхности вычислялся в соответствии с [5] набор независимых реализаций поля \dot{A}_n в раскрыве вертикальной эквидистантной линейной решетки, где $n = 1 \dots N$ – номер элемента решетки.

С целью исследования зависимостей ошибок измерения от разности фаз прямого и зеркального сигналов, фаза отражения от поверхности искусственно задавалась таким образом, чтобы в центре решетки на центральной частоте обеспечить набор разностей между прямым и зеркальным сигналом $\Delta\varphi_0 = 0, 20, 40 \dots 180^\circ$. Такой набор при строгом подходе можно было бы получить путем небольших изменений геометрии трассы, например, за счет смещения центра решетки по высоте, однако это затруднило бы интерпретацию результатов. Следует также учесть, что статистики ошибок измерения угла места, полученные при некоторой разности фаз $\Delta\varphi_0$, действительны и при разностях $\pm\Delta\varphi_0 + 2\pi i$, где i – любое целое число.

Количество реализаций поля для обеспечения достоверности оценок было выбрано достаточно большим: равным 10 000 для каждого набора исходных данных.

На втором этапе выполнялось вычисление углов места с использованием варианта исследуемого метода, известного под названием *ROOT-MUSIC* [2]. При измерении углов места такой вариант представляется более удобной альтернативой поиску максимумов углового спектра благодаря сокращению количества вычислений.

При использовании метода *MUSIC* существует проблема выбора исходных параметров, влияющих в конечном итоге на точность измерений. Это относится к выбору количества про-

странственных выборок принимаемого сигнала K , количества целей, участвующих в формировании этого сигнала, порядка и типа ковариационной матрицы, составленной на основе полученных выборок сигнала. К сожалению, применительно к задаче измерения углов места над шероховатой поверхностью методика выбора этих параметров не отражена в опубликованной литературе. Так как в данной работе изучалось влияние на ошибки измерения лишь диффузного отражения, то было решено использовать параметры, которые по результатам выполненных нами предварительных испытаний привели к удовлетворительным результатам: $K = 9$, количество целей – 2 (прямой и зеркальный сигналы), порядок ковариационной матрицы – 2, тип матрицы – модифицированная [3]. Разумеется, поиск и обоснование оптимальных исходных параметров требует дополнительных исследований.

Следующая проблема, требующая специальных исследований, – это проблема выбора из нескольких решений (в нашем случае двух) именно того, которое соответствует прямому сигналу, т. е. цели. Нами были предложены и опробованы следующие варианты выбора:

- цели соответствует угол места, который имеет наибольшее значение из найденных;

- цели соответствует угол места, который наименее отличается от одноцелевого решения (под одноцелевым решением понимаем значение угла места, полученное с учетом гипотезы о наличии только одной цели; здесь проблемы выбора нет, так как существует только одно решение);

- цели соответствует угол места, который наименее отличается от значения $0,5 \Theta_{0,5}$ (этот вариант обусловлен тем, что цель, являясь мало-высотной, по определению находится в интервале угловых высот $[0; \Theta_{0,5}]$).

Из этого числа для дальнейшего использования был выбран третий вариант, так как он давал количество ложных решений меньше, чем второй, и значительно меньше, чем первый. Использование значений мощности сигналов (метод *MUSIC* позволяет выполнять оценку мощности каждого из полезных сигналов) в качестве возможного критерия выбора правильного решения в данной работе не рассматривался.

Как оказалось, еще одним важным этапом методики измерений с использованием исследуемого метода является выбор параметров приемных антенн, реализующих пространственные выборки сигналов. В настоящей работе приемные антенны реализовывались следующим образом. Большая решетка, состоявшая из 153 элементов, разбивалась на 9 подрешеток, примыкавших друг к другу и состоявших из

$I = 17$ элементов каждая. Исследования проводились с двумя апертурными сильно отличающимися функциями: прямоугольной и *hamming*-функцией. В первом случае диаграммы направленности виртуальных антенн, сформированных на базе подрешеток, имели узкую ширину – 0,10 рад, но высокий уровень боковых лепестков (1-й лепесток: –13 дБ). Во втором – ширина диаграммы возросла до 0,16 рад, но уровень боковых лепестков не превышал –40 дБ. Пространственная выборка, формируемая виртуальной антенной на базе k -й подрешетки, вычислялась следующим образом:

$$\dot{U}_k = \sum_{i=1}^I \dot{a}_{ki} G_i \exp(j\chi_i \sin \Theta_a),$$

где $\chi_i = \frac{\pi d}{\lambda} (2i - I - 1)$ – набег фазы от центра подрешетки до ее i -го элемента; I – количество элементов в подрешетке; $\dot{a}_{ki} = \dot{A}_{i+I(k-1)}$ – сигнал на i -м элементе k -й подрешетки; G_i – значение апертурной функции на i -м элементе подрешетки; Θ_a – угол места осей виртуальных антенн.

На третьем этапе выполнялась статистическая обработка полученных результатов. Были получены средние значения ошибок измерения угла места, а также среднеквадратичные отклонения ошибок в зависимости от разности фаз между прямым и зеркальным сигналом в центре антенной системы при различных углах места виртуальных приемных антенн. Также детально были исследованы распределения ошибок измерения угла места.

Наиболее общее представление об эффективности исследуемого метода можно получить, используя для анализа зависимости среднеквадратичных ошибок, полученных путем усреднения на интервале разностей фаз между прямым и зеркальным сигналом $0 \dots 2\pi$:

$$\varepsilon_{rms} = \sqrt{\frac{2 \sum_{m=0}^M \varepsilon_m^2 - \varepsilon_0^2 - \varepsilon_M^2}{2M}},$$

где $\varepsilon_m^2 = \langle \Delta \varepsilon_m \rangle^2 + \sigma_{\varepsilon_m}^2$; $m = 0, 1, 2 \dots M$ – номер фазового сдвига, при котором получены m -е значения средней ошибки и среднеквадратичного отклонения ошибки; $\Delta \varphi_{0m} = m\pi/M$.

2. Зависимости ошибок от угла места приемных антенн. На рис. 1, а представлены зависимости этих ошибок от угла места осей подрешеток при использовании прямоугольной апертурной функции. Видно, что с подъемом осей ошибки измерения уменьшаются, достигая минимума при угле подъема около 0,055 рад. Затем

наблюдается рост ошибок. Попытки объяснить такое поведение кривой ошибок, используя отношение принимаемой мощности диффузной компоненты к мощности прямого сигнала (кривая 1), ответа не дают. Действительно, мы видим, что на участке более 0,06 рад ошибки начинают увеличиваться, несмотря на то что отношение мощностей продолжает меняться в пользу прямого сигнала.

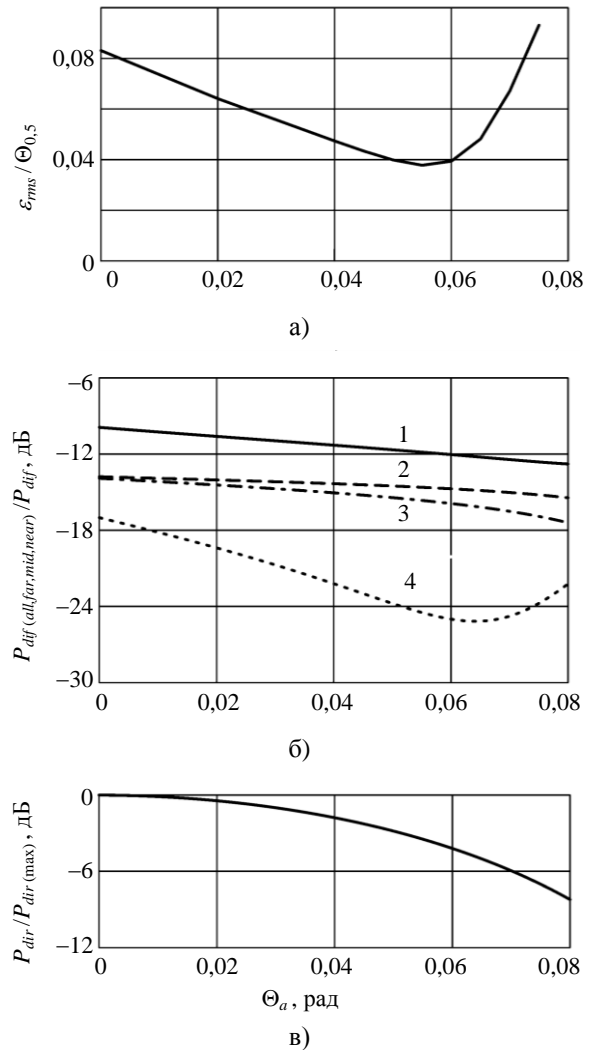


Рис. 1. Зависимости исследуемых величин от угла подъема осей приемных антенн при использовании прямоугольной апертурной функции: а) – среднеквадратичных ошибок измерения места; б) – отношения мощности диффузной компоненты и ее составляющих к мощности прямого сигнала; в) – относительной мощности прямого сигнала

Следовательно, можно предположить, что участки «блестящей поверхности» вносят разный вклад в итоговую ошибку. Для проверки этой гипотезы мы условно разбили «блестящую поверхность» на три зоны, дающие одинаковый вклад в общую мощность диффузного отражения: дальнюю, среднюю и ближнюю (по отношению к

приемной системе). Зависимости отношений этих мощностей к мощности прямого сигнала в приемной антенне представлены на рис. 1, б кривыми 2, 3 и 4 соответственно. Видно, что на участке более 0,06 рад диффузные отражения из дальней и средней зон «блестящей поверхности» продолжают уменьшаться по отношению к прямому сигналу, а из ближней – начинают расти. Этот относительный рост объясняется тем, что с подъемом оси антенны прямой сигнал продолжает падать, а диффузные отражения из ближней зоны начинают возрастать вследствие «наезда» на эту зону первого лепестка приемной антенны, имеющего, как говорилось ранее, высокий уровень. Таким образом, несмотря на то что уровень диффузного сигнала из ближней зоны в приемной антенне значительно уступает мощности из остальной области, именно с ним связан рост ошибок на участке выше 0,06 рад.

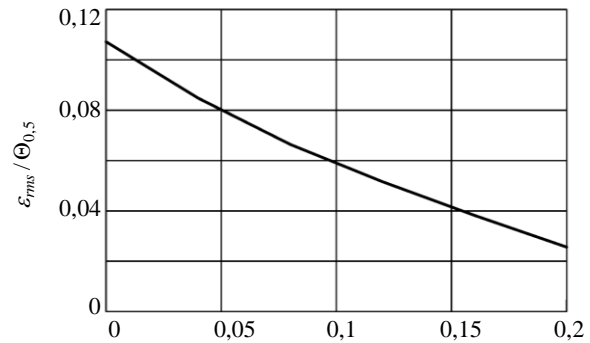
На рис. 1, в приведен относительный уровень принимаемой мощности прямого сигнала. Видно, что на участке наименьших ошибок падение прямого сигнала незначительно и составляет величину порядка -3 дБ, что приемлемо в большинстве случаев, имеющих на место при реальной работе РЛС.

Такой же анализ был выполнен при использовании апертурной *hamming*-функции. Зависимости, аналогичные описанным выше, приведены на рис. 2. Видно, что при нулевом угле места антенн ошибки измерения больше, чем в случае прямоугольной апертурной функции. Это легко понять, учитывая, что в данном случае формируется более широкая диаграмма направленности приемной антенны и в связи с этим возрастает уровень приема диффузного сигнала из ближней зоны.

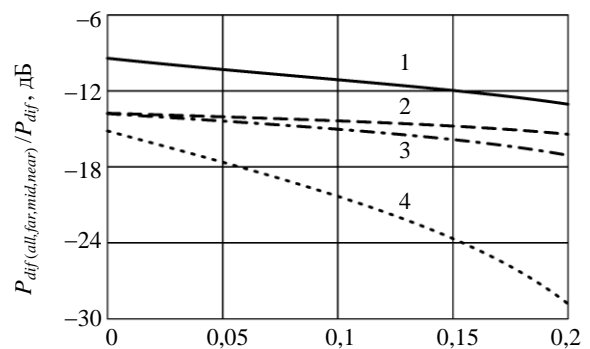
При увеличении угла места приемных антенн наблюдается монотонное падение относительного уровня диффузного отражения не только из дальней и средней, но и из ближней зоны. В данном случае это происходит благодаря очень низкому уровню боковых лепестков приемной антенны. Вследствие этого ошибки измерения монотонно падают во всем рассматриваемом диапазоне углов, а также видна тенденция их дальнейшего уменьшения.

Ясно, что рассмотренная выше ситуация, дающая более значительное уменьшение ошибок, чем в случае прямоугольной апертурной функции, не имеет практического применения из-за недопустимо сильного падения уровня прямого сигнала. Однако ее анализ дает право считать, что значительное повышение точности может быть реализовано путем использования антенн, обладающих более узкими диаграммами, чем рассмотренные нами, при небольшом уровне боко-

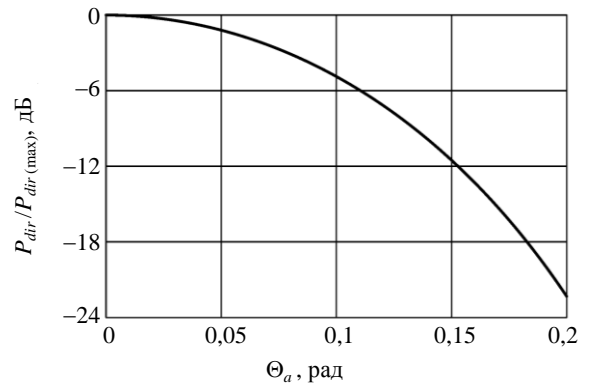
вых лепестков. При этом получение ошибок, не превышающих $0,03 \Theta_{0,5}$, вполне реально.



а)



б)



в)

Рис. 2. Зависимости, аналогичные приведенным на рис. 1 при использовании апертурной *hamming*-функции

3. Влияние разности фаз между прямым и зеркальным сигналом на ошибки измерения угла места. На рис. 3, а приведены средние значения ошибок в зависимости от разности фаз между прямым и зеркальным сигналом в центре решетки при использовании прямоугольной апертурной функции. На рис. 3, б показаны соответствующие им среднеквадратичные отклонения ошибок.

Видно, что влияние диффузного отражения проявляется в отрицательном смещении средних ошибок по всему диапазону разности

фаз. При этом наибольшее смещение наблюдается в максимуме поля ($\Delta\varphi_0 = 0^\circ$), уменьшаясь монотонно к минимуму поля ($\Delta\varphi_0 = 180^\circ$). Подъем оси приемных антенн до $\Theta_a = 0,05$ рад приводит к значительному (не менее чем 2,5 раза) уменьшению средних ошибок по сравнению с ориентацией на горизонт.

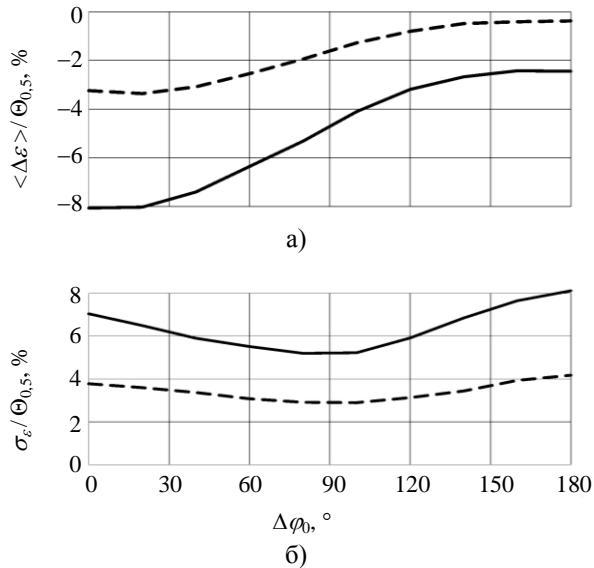


Рис. 3. Зависимость ошибок измерения угла места от разности фаз между прямым и зеркальным сигналам: а) – средние значения ошибок; б) – среднеквадратичные отклонения ошибок; сплошная линия – $\Theta_a = 0$; штриховая – $\Theta_a = 0,05$ рад

Если говорить о среднеквадратичных отклонениях ошибок, то с подъемом осей приемных антенн также наблюдается их уменьшение, до двух раз. В экстремумах поля проявляется небольшое, до полутора раз увеличение флуктуаций ошибок. При подъеме осей антенн эта неравномерность уменьшается.

4. Распределение ошибок измерения угла места. На рис. 4 приведены гистограммы распределения ошибок, полученные в максимуме и минимуме поля, а также в промежуточном случае, относящемся к разности фаз $\Delta\varphi_0 = 80^\circ$. В промежуточном случае наблюдаются более симметричные распределения ошибок. Однако в экстремумах поля эта симметричность нарушается: в максимуме поля склон становится более пологим в области положительных значений ошибок, а в минимуме – в области отрицательных.

К сожалению, в области максимума и минимума поля, кроме отклонения формы распределений от симметричной, появляются аномально большие значения ошибок измерения углов места. В подавляющем большинстве случаев они расположены со стороны более пологих склонов распределений. Масштаб рис. 4 не поз-

воляет увидеть эти выбросы ошибок, но некоторые их характеристики можно получить из табл. 1, в которой приведены вероятности превышения ошибками условных границ, составляющих $\pm 20\%$ от $\Theta_{0,5}$, и табл. 2, в которой приведены крайние значения ошибок в отрицательной и положительной области их значений. Из двух значений первое относится к $\Theta_a = 0$ рад, второе – к $\Theta_a = 0,05$ рад.

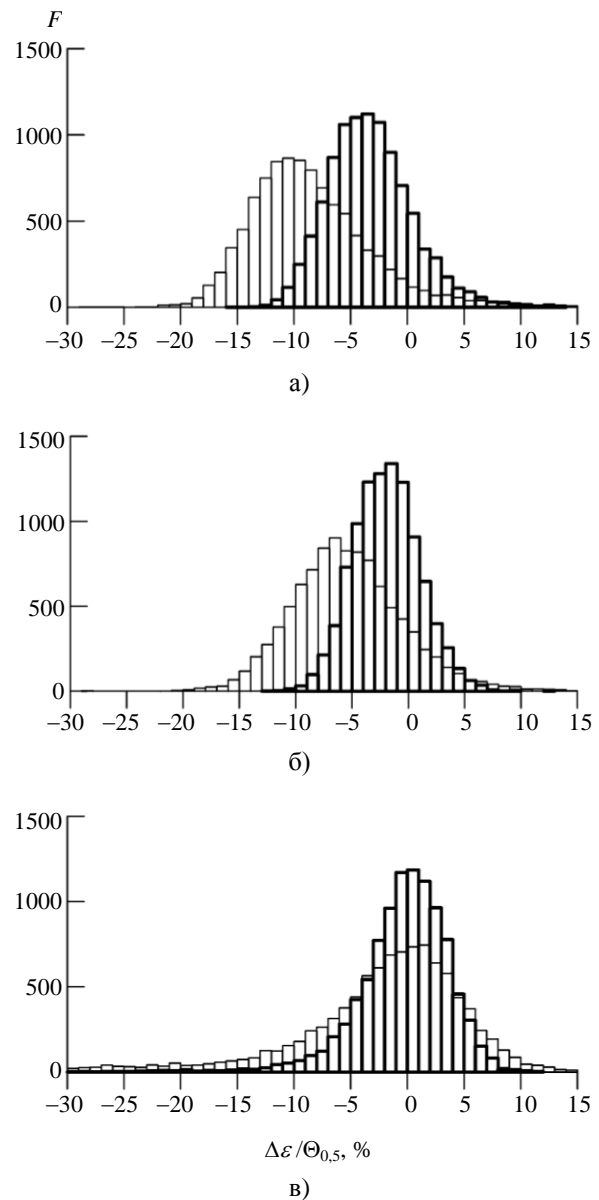


Рис. 4. Распределения ошибок измерения угла места: а) – $\Delta\varphi_0 = 0^\circ$; б) – 80° ; в) – 180° ; тонкая линия – $\Theta_a = 0$ рад; жирная линия – $\Theta_a = 0,05$ рад

Как видно из приведенных таблиц, подъем оси приемных антенн приводит не только к уменьшению вероятности появления больших

выбросов ошибок, но и к уменьшению величины их абсолютного значения.

Таблица 1

Вероятность выхода ошибки измерения за границы $\pm 0,2\Theta_{0,5}$, %

$\Delta\varphi_0, ^\circ$	$P(\Delta\varepsilon < -0,2\Theta_{0,5})$	$P(\Delta\varepsilon > 0,2\Theta_{0,5})$
0	0,35/0,00	0,81/0,05
80	0,16/0,00	0,15/0,00
180	4,72/0,48	0,05/0,00

Таблица 2

Крайние значения ошибок измерения угла места, % от $\Theta_{0,5}$

$\Delta\varphi_0, ^\circ$	min ($\Delta\varepsilon$)	max ($\Delta\varepsilon$)
0	-28,0/-15,1	61,6/29,8
80	-31,7/-12,4	48,6/12,2
180	-51,5/-29,15	30,35/11,6

Выводы. При использовании метода *MUSIC* наибольшее влияние на величину ошибок измерения угла места оказывает диффузное отражение от ближней к приемной антенне зоны «блестящей поверхности».

Действие диффузного отражения проявляется в смещении средних ошибок измерения угла места в сторону поверхности раздела, увеличении флуктуационной составляющей ошибок и в появлении больших выбросов ошибок.

Среднеквадратичные отклонения ошибок в экстремумах поля максимальны и соизмеримы по величине. В промежуточных фазах интерференции прямого и зеркального сигналов эти ошибки незначительно, до полутора раз, уменьшаются.

В антенной решетке, предназначенной для получения пространственных выборок сигнала, необходимо использовать антенны, обладающие удовлетворительными направленными свойствами. При этом их оси следует отклонить от поверхности вверх на такой угол, чтобы получить максимальное превышение прямого сигнала от цели над диффузным отражением от ближней к приемным антеннам зоны. Такой способ приводит к уменьшению ошибок измерения до двух и более раз по сравнению с ориентацией осей на горизонт.

1. Бартон Д. Радиолокационное сопровождение целей при малых углах места / Д. Бартон // Тр. Ин-та инж. по электротехнике и электрон. – 1974. – 62, № 6. – С. 37-61.
2. Алгоритмы оценивания угловых координат источников излучений, основанные на методах спектрального анализа / В. В. Дрогаллин, В. И. Меркулов, В. А. Родзивилов и др. // Зарубеж. радиоэлектрон. Успехи соврем. радиоэлектрон. 1998. № 2. – С. 3-17.
3. Марпл.-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл.-мл.; пер. с англ. под ред. И. С. Рыжака. – М.: Мир, 1990. – 584 с.

4. Beckman P. The scattering of electromagnetic wave from rough surface / P. Beckman, A. Spizzichino. – London: Pergamon press, 1963. – 303 p.

5. Разказовский В. Б. Модель поля миллиметровых и сантиметровых волн над морем для исследования методов измерения углов места низколетящих целей / В. Б. Разказовский, Ю. А. Педенко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2003. – 8, № 1. – С. 22-23.

Yu. A. Pedenko

THE FEATURES OF USAGE THE *MUSIC* ALGORITHM FOR AN ELEVATION ANGLE MEASUREMENT OF LOW-LEVEL TARGETS OVER ROUGH SEA SURFACE

The performance of the *MUSIC* algorithm for measuring elevation angle of the low-level target over rough sea surface in environment describable with the strong diffuse reflections was executed by computer simulation. It is established that the greatest action on errors value produce a part of diffuse reflections coming from closely approximating to radar zone of «glistening surface». For the purpose of reduction of errors value it is offered to antennas axis which are a part of a array, to establish under a positive angle to an interfacial area. Thus radiation pattern of antennas should suppress as much as possible diffuse signals coming from a near zone, providing sufficient receive level for the signal arriving from the target. Characteristics of measurement errors of elevation angle in various phase difference between direct and specular signal in the centre of a reception antenna array and at various axis angles above the horizon are analysed.

Key words: *MUSIC*, low-altitude target, measuring of elevation angle, multipath, simulation.

Ю. О. Педенко

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ *MUSIC* ДЛЯ ВИМІРУ КУТА МІСЦЯ МАЛОВИСОТНИХ ЦІЛЕЙ НАД СХВИЛЬОВАНОЮ ПОВЕРХНЕЮ МОРЯ

Виконано комп'ютерне моделювання виміру кута місця маловисотної цілі над схвильованою поверхнею моря з використанням методу *MUSIC* в умовах сильного дифузного відбиття. Встановлено, що найбільший вплив на величину помилки виміру надає частина дифузного відбиття, що приходить із ближньої до приймальної системи зони «блискучої поверхні». Для зменшення величини похибок запропоновано вісі антен, що входять до складу приймальної антенної ґратки, встановлювати під позитивним кутом до поверхні розділу. При цьому діаграми спрямованості антен повинні максимально заглушати сигнали дифузного відбиття, які приходять із ближньої зони, забезпечуючи достатній рівень прийому сигналу, що надходить від цілі. Виконано аналіз характеристик похибок виміру кута місця при різних фазах інтерференції прямого і дзеркального сигналів у центрі приймальної антенної ґратки і при різних кутах місця вісей приймальних антен.

Ключові слова: *MUSIC*, маловисотна ціль, вимірювання кута місця, багатопроменеве поширення, моделювання.

Рукопись поступила 26.03.10 г.