

**Ю. А. Педенко***Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины**12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина*E-mail: [pedenko@ire.kharkov.ua](mailto:pedenko@ire.kharkov.ua)**ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВ МЕСТА НАД МОРЕМ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА *ROOT-MUSIC*. ВЫБОР РЕШЕНИЯ**

Работа посвящена проблеме повышения точности радиолокационного измерения углов места маловысотных целей над морем при использовании метода *root-MUSIC*, который рассматривается специалистами как одно из средств решения данной проблемы. Одной из задач, без решения которой невозможно эффективное использование рассматриваемого метода, является практически не исследованная задача выбора решения, относящегося к цели, из совокупности нескольких полученных решений, количество которых определяется размерностью подпространства сигналов. Путем компьютерного моделирования получены и проанализированы распределения совокупности измеренных углов места для различных степеней волнения моря, при различном количестве пространственных выборок сигнала на заданном раскрытии антенной решетки, различной размерности подпространства сигналов. Рассчитаны угломестные зависимости среднеквадратических ошибок измерения угла места при использовании нескольких предложенных в работе правил выбора решения. Разработаны требования к антенным решеткам, используемых в устройствах измерения угла места, выполнение которых позволяет уменьшить ошибки выбора. Предложены правила, которые эффективно решают задачу правильного выбора. Результаты исследования расширяют представления о путях совершенствования методов и устройств измерения углов места маловысотных целей над морем. Ил. 5. Библиогр.: 11 назв.

**Ключевые слова:** *root-MUSIC*, маловысотная цель, измерение угла места, компьютерное моделирование.

Среди методов, позволяющих повысить точность определения углов места маловысотных целей, исследователями рассматривается и метод высокого спектрального разрешения *MUSIC* [1, 2], в частности его алгебраический вариант *root-MUSIC* [2, 3]. Однако по данным некоторых публикаций [4, 5] его эффективность уступает эффективности ряда других специальных методов при сравнительных испытаниях в одинаковых условиях. В связи с этим предпринимаются попытки совершенствования метода *MUSIC*, например [5]. Однако, как показывают наши исследования [6, 7], метод содержит возможности значительного увеличения его эффективности при использовании в стандартной форме [1]. Для этого необходимо обоснованно выбирать его априорные параметры: количество пространственных выборок принимаемых сигналов  $K$ , размерность подпространства сигналов  $M$ , порядок корреляционной матрицы сигналов  $p$  [7]. Повысить точность измерений позволяет и частичное подавление диффузных отражений, приходящих от ближнего к радиолокационной станции (РЛС) участка поверхности, участвующей в формировании диффузного отражения [6].

Одной из задач, касающихся практического использования метода *root-MUSIC*, является задача выбора из нескольких полученных решений того, которое соответствует измеряемой цели. Рассмотрим эту задачу подробнее.

Как известно [3], для реализации метода *root-MUSIC* используют многоэлементную эквидистантную вертикальную приемную антенную решетку. Принятая пространственная выборка сигналов после соответствующих преобразований поступает на устройство, выполняющее вычисления с использованием данного метода. Для каж-

дой пространственной выборки сигналов вычисляют  $M$  значений величины  $\Delta\varphi_m$ , которая связана с углом прихода  $m$ -й волны и равна разнице фаз сигналов соответствующей  $m$ -й волны в соседних пространственных выборках ( $m = 1 \dots M$ ). Угол прихода  $m$ -го сигнала по отношению к нормали антенной решетки вычисляют с помощью выражения

$$\varepsilon_m = \arcsin\left(\Delta\varphi_m / \frac{2\pi d}{\lambda}\right) \approx \Delta\varphi_m / \frac{2\pi d}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $d$  – расстояние между соседними пространственными выборками сигнала;  $\lambda$  – длина радиоволны.

Вычисленные  $M$  значений  $\varepsilon_m$  и составляют совокупность решений, из которых выбирают решение, относящееся к цели. На практике операция выбора осуществляется автоматически из совокупности, полученной, как правило, по единственной пространственной выборке принимаемых сигналов – именно такая ситуация рассматривается в данной работе. В качестве дополнительных данных при выборе можно использовать мощности каждой из волн  $P_m$ , вычислив их, с использованием алгоритма работы [2], а также априорные данные о распределении принимаемых сигналов по углу места, например, то, что сигнал от цели расположен выше линии горизонта, а отражения от моря – ниже этой линии.

Как показано нами [7], для достижения высокой точности измерения угла места цели следует использовать размерность подпространства сигналов  $M = 5 - 7$ . Очевидно, что увеличение размерности подпространства усложняет задачу выбора. Но даже и в простейшем случае, когда используют  $M = 2$ , что обусловлено учетом двух

детерминированных сигналов, принимаемых от цели (прямого и зеркально отраженного от поверхности раздела), задача не имеет простого решения.

Очевидно, вследствие случайной природы отражений от поверхности раздела не удастся избежать ошибок выбора правильного решения. Но несмотря на важность решаемой задачи, в известных публикациях она не затронута.

**1. Методика исследований.** Исследования проводились путем компьютерного моделирования с использованием модели поля, разработанной нами [8] на основе теории «блестящей

поверхности» [9, 10]. Геометрия трассы, соответствующая задаче исследования, представлена на рис. 1:  $A$  – центр антенной решетки;  $T$  – точечный всенаправленный источник излучения (имитатор цели);  $S$  – точка зеркального отражения от поверхности моря;  $D_n$ ,  $D_f$  – соответственно ближняя и дальняя границы «блестящей поверхности»;  $AN$  – нормаль к плоскости антенной решетки;  $\varepsilon$  – угловая высота цели над поверхностью моря;  $\varepsilon_n$  – угол места цели относительно нормали к решетке.

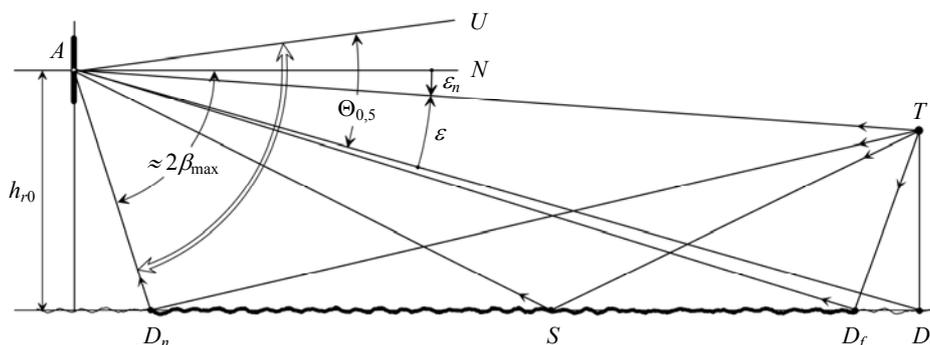


Рис. 1. Геометрия трассы

Для исследований были выбраны типичные характеристики трассы, вертикальный размер приемной антенной решетки и рабочая длина волны: длина трассы – 2 000 м; радиус кривизны земной поверхности – 8 500 км; высота приемной антенной решетки над поверхностью моря – 12 м; максимальный наклон неровностей поверхности моря –  $\beta_{\max} = 0,05$  рад (использовалось равномерное распределение наклонов); длина радиоволны –  $\lambda = 3,2$  см; вертикальный размер антенной решетки – 2,5 м, расстояние между элементами решетки  $\lambda/2$ ; количество элементов  $N = 156$ . Угловые высоты цели над поверхностью  $\varepsilon = 0,2; 0,3; 0,4$  и  $0,5 \Theta_{0,5}$  ( $\Theta_{0,5} = 1^\circ$  – ширина по уровню половинной мощности суммарной диаграммы направленности моноимпульсной антенны, имеющей раскрыт, равный размеру используемой решетки).

Исследование проводилось как для условий высокого уровня зеркального, так и высокого уровня диффузного отражения. В первом случае коэффициенты зеркального и диффузного отражения составляли соответственно  $\rho_s = 0,92$  и  $\rho_d = 0,10$ , во втором –  $\rho_s = 0,50$  и  $\rho_d = 0,35$  для всех угловых высот цели.

Исследование проводилось в три этапа. На первом этапе для выбранной геометрии трассы и параметров морской поверхности выполнялось вычисление достаточно большого коли-

чества независимых реализаций поля сигналов  $\dot{A}_n$  в раскрыте вертикальной эквидистантной линейной решетки, где  $n = 1 \dots N$  – номер элемента решетки. Реализации поля рассчитывались для заданного ряда разностей фаз между прямым и зеркально отраженным сигналом в центре приемной решетки  $\Delta\varphi_0 = 0, 20, 40 \dots 340^\circ$ . Такой ряд  $\Delta\varphi_0$  при неизменной геометрии трассы достигался путем соответствующего подбора фазы отражения от морской поверхности в точке зеркального отражения. При строгом подходе его можно получить, например, путем соответствующих смещений приемной решетки по высоте в пределах интерференционного лепестка поля принимаемых сигналов, либо некоторого изменения рабочей частоты. Однако это неоправданно усложнило бы выполнение исследований. Для каждого значения  $\Delta\varphi_0$  рассчитывалось по 2 000 реализаций поля сигналов. Использование этих реализаций позволило получить исследуемые характеристики как для каждой отдельной из используемых  $\Delta\varphi_0$ , так и усредненные по всей по всей их совокупности при равномерном их распределении. Далее, кроме оговоренных случаев, используются именно последние характеристики.

На втором этапе выполнялись расчеты углов прихода и мощности компонент для каждой из случайных реализаций поля сигналов. Расчеты проводились при различных допустимых коли-

чества пространственных выборок сигнала, размерностях подпространства сигналов и размерностях корреляционной матрицы.

Чтобы получить заданное количество пространственных выборок  $K$ , основная решетка, состоящая из  $N = 156$  элементов, разбивалась на  $K$  примыкающих друг к другу подрешеток. Значения  $K$  принимались равными 6, 9, 12, 17 и 26. Количество элементов в каждой решетке  $I$  соответственно равнялось 26, 17, 12, 9 и 6. При таком подходе выборки равномерно занимали весь раскрыв антенной решетки независимо от их количества.

Весовые коэффициенты для элементов каждой из подрешеток рассчитывались с использованием функции Хэмминга, что обеспечивало уровень боковых лепестков элементарных антенн не более  $-40$  дБ. Пространственная выборка, которая формировалась элементарной антенной, синтезированной на базе  $k$ -й подрешетки, вычислялась в виде

$$\dot{U}_k = \sum_{i=1}^I \dot{a}_{ki} G_i,$$

где  $\dot{a}_{ki} = \dot{A}_{i+I(k-1)}$  – сигнал на  $i$ -м элементе  $k$ -й подрешетки;  $G_i$  – значение весового коэффициента на  $i$ -м элементе подрешетки.

На третьем этапе выполнялась статистическая обработка полученных результатов и оценка эффективности использования того или иного способа выбора решения. Для количественной оценки эффективности правил выбора использовались среднеквадратические ошибки измерения угла места, полученные путем усреднения на интервале разностей фаз между прямым и зеркальным сигналом  $0 \dots 360^\circ$ . Для качественной оценки эффективности того или иного правила выбора решения использовались распределения всей совокупности вычисленных углов места либо отобранных из нее по какому-то признаку, например, по признаку максимальной мощности сигнала.

**2. Распределение совокупности измеренных углов места.** Оценим диапазон углов места, в котором сосредоточены принимаемые многолучевые сигналы от цели ( $\angle D_n AU$  на рис. 1, обозначенный широкой дугой).

Он состоит из двух практически примыкающих друг к другу участков. Первый из них охватывает зеркальное и диффузные отражения от поверхности моря ( $\angle D_n AD_f$ ). Его протяженность согласно теории «блестящей поверхности» определяется величиной наклонов морских волн [10]. При наиболее вероятных значениях наклонов  $\beta_{\max} = 0,05 \dots 0,25$  рад [10] она составляет приблизительно  $2\beta_{\max}$ , т. е.  $0,1 \dots 0,5$  рад.

Второй участок ( $\angle DAU$ ) охватывает сектор углов, в котором потенциально может находиться цель. Протяженность этого участка обусловлена определением маловысотной цели, как цели, угол места которой не превышает ширины диаграммы направленности приемной антенной решетки, поэтому можно принять  $\angle DAU = \Theta_{0,5}$ .

На практике для сопровождения целей по углу используют антенны с шириной диаграммы направленности близкой к  $1^\circ$  ( $0,0175$  рад), что значительно меньше протяженности участка с отражениями от моря. Учитывая  $\angle D_n AD_f > \angle DAU > \angle D_f AD$ , и то, что  $\angle DAU$  частично или полностью перекрывает угол  $\angle DAN$ , можно считать, что диапазон углов места, в котором сосредоточены принимаемые многолучевые сигналы от цели

$$\angle D_n AU \approx \angle D_n AN \approx 2\beta_{\max}. \quad (3)$$

Теперь перейдем к оценке области углов, в которой реализуется однозначное измерение углов места с использованием метода *root-MUSIC*. Размер области значений  $\Delta\varphi_m$  в выражении (1) составляет  $2\pi$  (обычно значения  $\Delta\varphi_m$  вычисляются на интервале  $(-\pi; \pi]$ ). Поэтому для обеспечения однозначных измерений  $\varepsilon_m$ , как следует из (1), отношение  $\lambda/d$  должно превышать диапазон углов места, в котором сосредоточены принимаемые сигналы. Для этого необходимо выполнить условие:

$$\lambda/d > 2\beta_{\max}. \quad (4)$$

Обсудим несколько ситуаций, связанных с выполнением условия (4). Прежде всего рассмотрим примеры распределений совокупности измеренных углов места, рассчитанных для простейшего случая, когда  $M = 2$ . Они получены при угле места цели над поверхностью моря  $\varepsilon = 0,3\Theta_{0,5}$  (относительно нормали к решетке –  $\varepsilon_n = -0,05\Theta_{0,5}$ ) и представлены на рис. 2, а (зеркальное отражение), на рис. 2, б (диффузное отражение). На каждом из них приведено по три кривых, каждая из которых относится к одному из значений количества выборок сигнала:  $K = 6, 12$  и  $26$  (соответствующие им размерности корреляционной матрицы  $p = 2, 4$  и  $8$ ). Отношения  $\lambda/d$ , которые определяют область однозначных измерений, составляют при этом соответственно  $0,077; 0,154$  и  $0,333$  рад ( $4,43; 8,83$  и  $19,09\Theta_{0,5}$ ). Эти области для  $K = 6$  и  $K = 12$  обозначены штриховкой, приподнятой над осью абсцисс. Для  $K = 26$  эта область выходит за пределы графика и на рисунке не обозначена.

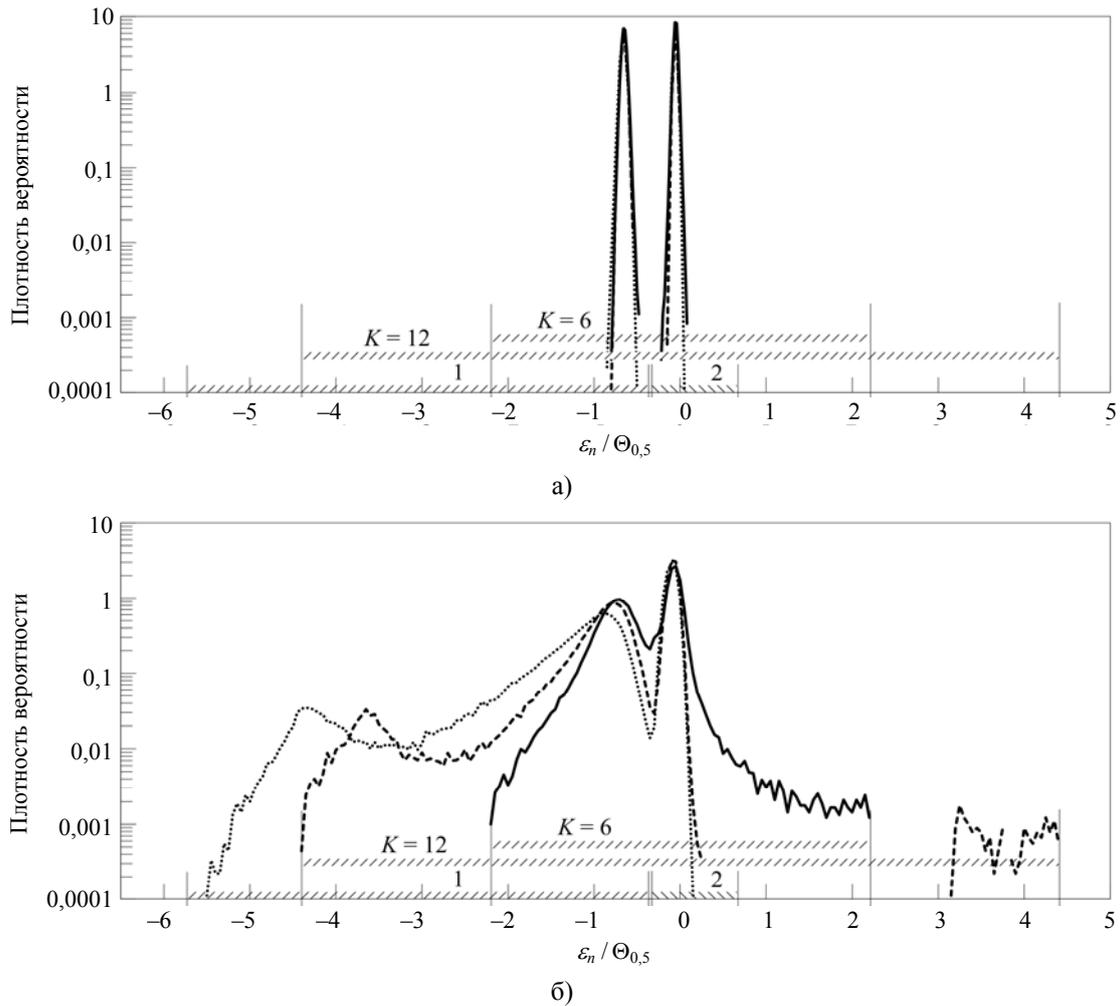


Рис. 2. Распределение совокупности углов прихода сигналов при  $M = 2$ : а) – высокий уровень зеркального отражения; б) – высокий уровень диффузного отражения; сплошная кривая линия –  $K = 6$ ,  $p = 2$ ; штриховая –  $K = 12$ ,  $p = 4$ ; пунктирная –  $K = 26$ ,  $p = 8$ ; 1 – отражения от моря ( $\angle D_n AD_f$  на рис. 1); 2 – отражения от маловысотных целей ( $\angle DAU$ )

Диапазон углов места, в котором сосредоточены принимаемые многолучевые сигналы от цели, для  $\beta_{\max} = 0,05$  рад равен около  $0,1$  рад ( $5,74 \Theta_{0,5}$ ). Этот диапазон отмечен на оси абсцисс двумя заштрихованными участками: 1 – отражения от моря, 2 – отражение от маловысотной цели. Сравнивая отношение  $\lambda/d$  с размером диапазона, видим, что при  $K = 6$  условие (4) не выполняется, при  $K = 12$  – выполняется с приблизительно с полуторакратным, а при  $K = 26$  – с трехкратным превышением.

Из рис. 2, а видно, что при высоком уровне зеркального отражения вид распределений при всех  $K$  достаточно прост – измеренные углы места группируются вблизи двух направлений, разнесенных на удвоенную угловую высоту цели. Правый пик соответствует направлению на цель, а левый – на ее зеркальное отражение. Проблемы выбора решения в данном случае нет – цели соответствует более высокое значение угла из двух решений.

Однако ситуация значительно усложняется при диффузном отражении (рис. 2, б). Во-первых, ширина максимумов распределения увеличивается, а плотность распределения вблизи направлений на цель и зеркальное отражение существенно уменьшается (в нашем случае – около трех раз). Это является причиной увеличения дисперсии ошибок при увеличении коэффициента диффузного отражения. Во-вторых, появляются решения, расположенные вдали от направлений на цель и зеркальное отражение, что затрудняет выбор решения, относящегося к цели.

Рассмотрим более детально особенности распределения совокупности измеренных углов при различном количестве выборок  $K$ . При  $K = 26$ , когда условие (4) выполняется с большим превышением, вычисленные углы не выходят за границы области, в которой сосредоточены принимаемые многолучевые сигналы от цели.

При  $K = 12$ , когда условие (4) также выполняется с запасом, можно сделать аналогичный

вывод, но с учетом следующих пояснений. Действительно, обособленная часть кривой распределения для этого случая, лежащая по углу места выше  $3\Theta_{0,5}$ , фактически является частью левой ветви распределения, смещенной на угол  $\lambda/d_s = 8,83\Theta_{0,5}$ . Это смещение произошло вследствие использования условия  $\Delta\varphi_m \in (-\pi; \pi]$ . Смещения можно избежать, вычисляя значение фазового опережения на интервале  $(\Delta\varphi_{\max} - 2\pi; \Delta\varphi_{\max}]$ , где  $\Delta\varphi_{\max}$  соответствует  $\angle UAN$  на рис. 1, определяющему верхнюю границу диапазона принимаемых сигналов.

При  $K = 6$  ширина зоны однозначного измерения оказывается более узкой, чем область углов прихода, поэтому смещенный участок распределения совокупности измеренных углов места накладывается на направление цели, чего не наблюдалось в предыдущем случае при  $K = 12$ . Очевидно, что описываемая ситуация значительно усложняет выбор правильного решения, ее

следует избегать, выбирая достаточно большое отношение  $\lambda/d$  в соответствии с (4).

Перейдем к ситуации, при которой размерность подпространства сигналов и корреляционной матрицы при заданном количестве пространственных выборок выбираются таким образом, чтобы получить наиболее высокую или близкую к ней точность измерений угла места в соответствии с выводами нашей работы [7]. Расчеты выполнялись при следующих сочетаниях входных параметров:

1.  $K = 6, M = 2, p = 3;$
2.  $K = 12, M = 4, p = 5;$
3.  $K = 26, M = 6, p = 6.$

При вычислении углов места использовались значения разности фаз  $\Delta\varphi_m \in (\Delta\varphi_{\max} - 2\pi; \Delta\varphi_{\max}]$ . Распределения совокупности измеренных углов места, относящихся к подпространству сигналов для данной ситуации, представлены на рис. 3.

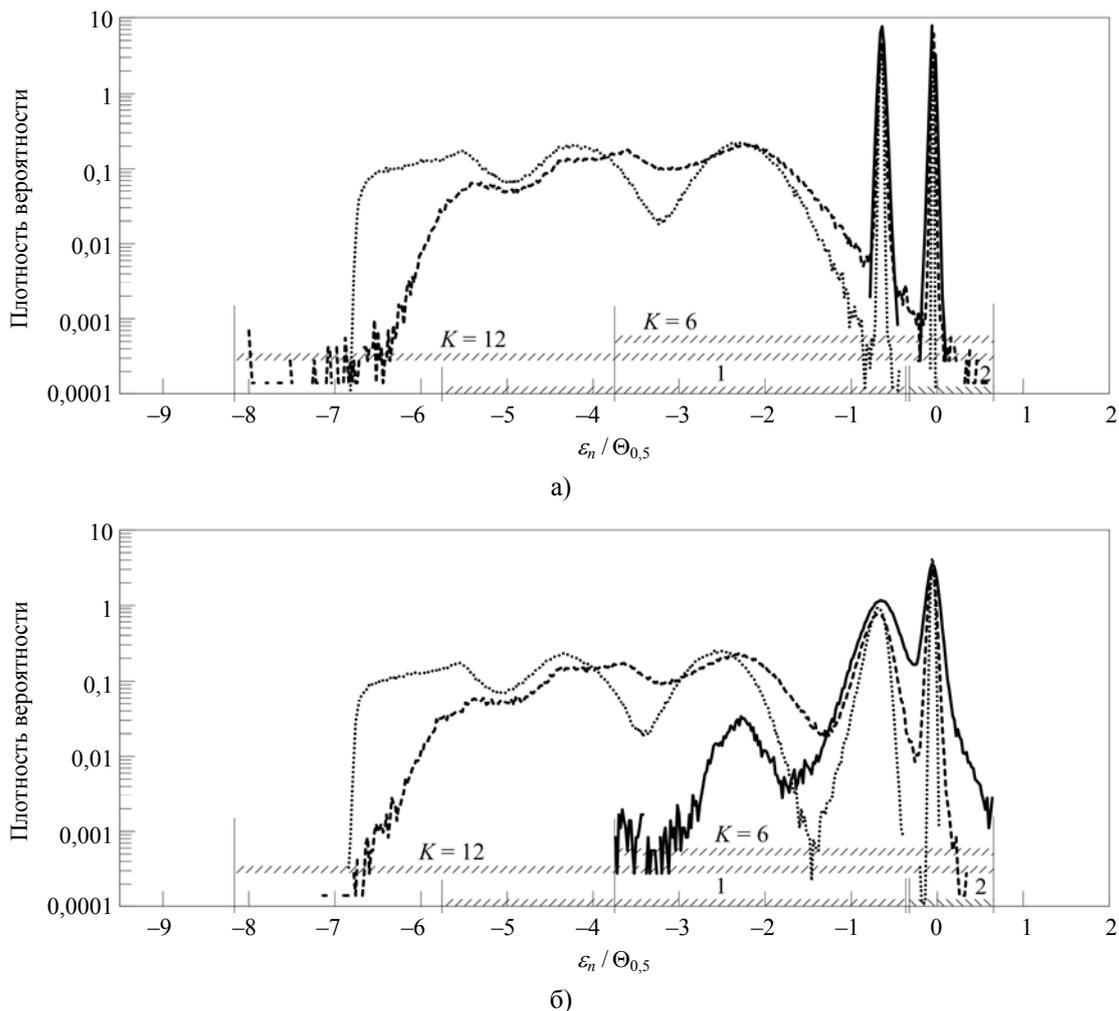


Рис. 3. Распределение совокупности углов прихода сигналов при использовании параметров  $M$  и  $p$ , обеспечивающих максимальную точность измерений при заданном  $K$ : а) – высокий уровень зеркального отражения; б) – высокий уровень диффузного отражения; сплошная кривая линия –  $K = 6, M = 2, p = 3$ ; штриховая –  $K = 12, M = 4, p = 5$ ; пунктирная –  $K = 26, M = 6, p = 6$

По сравнению с распределениями рис. 2, наблюдается ряд отличий. Во-первых, в условиях сильного зеркального отражения при  $M > 2$  появляются решения, лежащие вдали от направлений на цель и ее зеркальное отражение, чего не наблюдалось при  $M = 2$  (рис. 2, а).

Во-вторых, размер области, в которой сосредоточены вычисленные углы места, на 20–30 % превышает размер области, занимаемой многолучевыми сигналами от цели. Этот факт следует учитывать при выборе расстояния между соседними пространственными выборками путем соответствующего усиления неравенства в условии (4).

В-третьих, с увеличением размерности подпространства сигналов наблюдается обострение максимумов распределения вблизи цели и ее зеркального отражения. Важно при этом, что между максимумами, где согласно теории «блестящей поверхности» заключено около половины всей мощности диффузных отражений [10], не наблюдается повышенной вероятности измеренных углов места. Более того, с ростом количества выборок  $K$  и связанной с ним размерности подпространства сигналов эта вероятность уменьшается, а при  $K = 26$  решения в этой области вообще практически отсутствуют. Указанные обстоятельства облегчают правильный выбор решения.

**3. Ошибки измерения углов места цели при различных способах выбора решения.** Нами поочередно исследовались следующие правила выбора решения из совокупности измеренных углов места. Цели присваивалось решение, которому соответствует:

1. Наибольшая мощность;
2. Наибольший угол места;
3. Угол места, ближайший к некоторому контрольному значению.

Рассмотрим первое правило выбора. На рис. 4, а представлено распределение угла места сигнала, имеющего максимальную мощность внутри совокупности всех  $M$  решений. Данное распределение получено для условий зеркального отражения при использовании параметров:  $K = 26$ ,  $M = 5$ ,  $p = 5$ . Видим, что распределение состоит из двух пиков, один из которых (левый) ориентирован на зеркальное отражение, а правый – на цель. Аналогичная бимодальная форма распределения наблюдается и при диффузном отражении, что видно на рис. 4, б.

Исследования показали, что и при других входных параметрах полученные распределения подобны приведенным на рис. 4. Следует отметить, что вероятность появления наиболее мощных сигналов вблизи направления зеркального отражения возрастает с увеличением коэффициента зеркального отражения, при этом в миниму-

мах интерференционного поля она выше, чем в направлении цели.

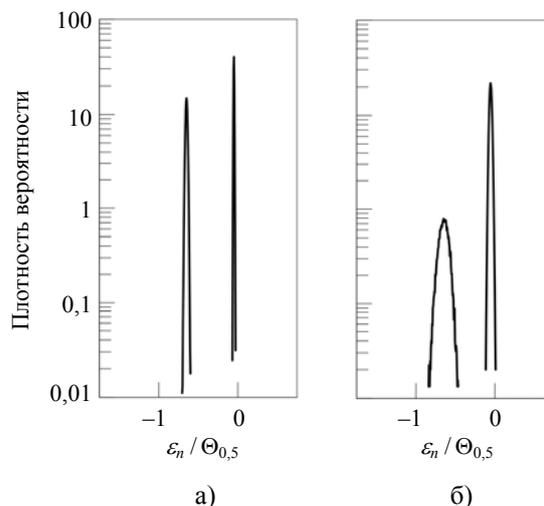


Рис. 4. Распределение углов места наиболее мощных сигналов из подпространства сигналов при  $K = 26$ ,  $M = 5$ ,  $p = 5$ : а) – высокий уровень зеркального отражения, б) – высокий уровень диффузного отражения

Понятно, что правило выбора решения, относящегося к цели, по признаку максимальной мощности в случае поиска по полной вычисленной совокупности неприемлемо. Это обусловлено высокой вероятностью ошибочного выбора решения, относящегося в действительности к зеркальному отражению от цели.

Указанную проблему можно обойти, исключив из анализа те решения, расположенные в зоне отражений от поверхности моря. Однако, как показывают наши исследования, в ряде ситуаций существует вероятность (хотя и пренебрежимо малая) того, что усеченная таким образом совокупность может оказаться пустой. В таком случае углу места цели можно присвоить некоторое обоснованное значение, в данной работе использовалось значение  $0,5\Theta_{0,5}$ , соответствующее середине области маловысотных целей.

При использовании второго правила выбора следует учитывать ряд факторов. Прежде всего необходимо обеспечить выполнение условия (4), в противном случае, как видно из рис. 2, б и 3, б при  $K = 6$ , при котором это условие не выполняется, в области сигналов от цели появляются ложные решения, связанные с неоднозначными вычислениями. Заметим, что даже при выполнении условия (4) при диффузном отражении все же существует небольшая вероятность решений, лежащих выше цели, что также приведет к ошибкам выбора при использовании третьего правила. Это видно из тех же рисунков при  $K = 12$ .

В соответствии с третьим предложенным правилом цели присваивается угол места, вы-

бранный из совокупности решений, который меньше других отличается от некоторого заданного контрольного значения. В этом качестве нами выбран угол, соответствующий середине диапазона низколетящих целей, т. е.  $\varepsilon = 0,5\Theta_{0,5}$ .

Список правил, исследованных в работе, можно существенно расширить за счет более сложных и, возможно, более эффективных. Например, можно усовершенствовать последнее из упомянутых выше, употребив в качестве контрольного не фиксированный угол, а предварительно оцененный, например, с помощью внеосевого метода [11]. Однако задача их поиска выходит за рамки данной работы.

Перейдем к анализу данных, полученных с помощью описанных выше правил. Среднеквадратические ошибки измерения угла места цели в зависимости от угла места цели над поверхностью, полученные с их помощью, представлены на рис. 5.

На нем сплошной линией обозначены ошибки, полученные при использовании первого правила (поиск самого мощного сигнала осуществляется в области углов выше линии условного горизонта), штриховой – второго, пунктирной – третьего; приведены данные, полученные как для условий зеркального отражения (группы 1), так и диффузного отражения (группы 2). Параметры  $M$  и  $p$ , использованные при моделировании измерений, выбраны в соответствии с результатами работы [7] так, чтобы при заданном количестве выборок сигнала  $K$  получить точности измерений угла места, близкие к максимальным. С целью охвата различных степеней выполнения неравенства (4) использовались значения  $K$ , равные 9, 12 и 27. Если второе и третье из них обеспечивают соответственно полуторакратное и трехкратное превышение левого члена над правым в неравенстве (4), то первое – лишь их приблизительное равенство.

Заметим, что на рис. 5, в кривые ошибок для разных правил, относящихся к одной группе, практически совпадают.

Приведенные на рис. 5, б, в данные показывают, что при соблюдении условия (4) все исследованные правила выбора решения, относящегося к цели, практически одинаково эффективны. Следует подчеркнуть, что это качество сохраняется во всем диапазоне исследованных углов места ( $\varepsilon = 0,2...0,5\Theta_{0,5}$ ). Приблизительно одинаковая эффективность наблюдается и при различных типах отражения радиоволн от моря, как при диффузном, так и при зеркальном.

Однако при ослаблении выполнения условия (4) эффективность второго правила, при котором цели присваивается наибольший угол из совокупности, существенно ухудшается по срав-

нению с остальными двумя правилами. Это видно из рис. 5, а. При его использовании ошибки измерения существенно возрастают, особенно в условиях зеркального отражения, среднеквадратические ошибки измерения угла места возрастают до двух раз по сравнению с другими правилами.

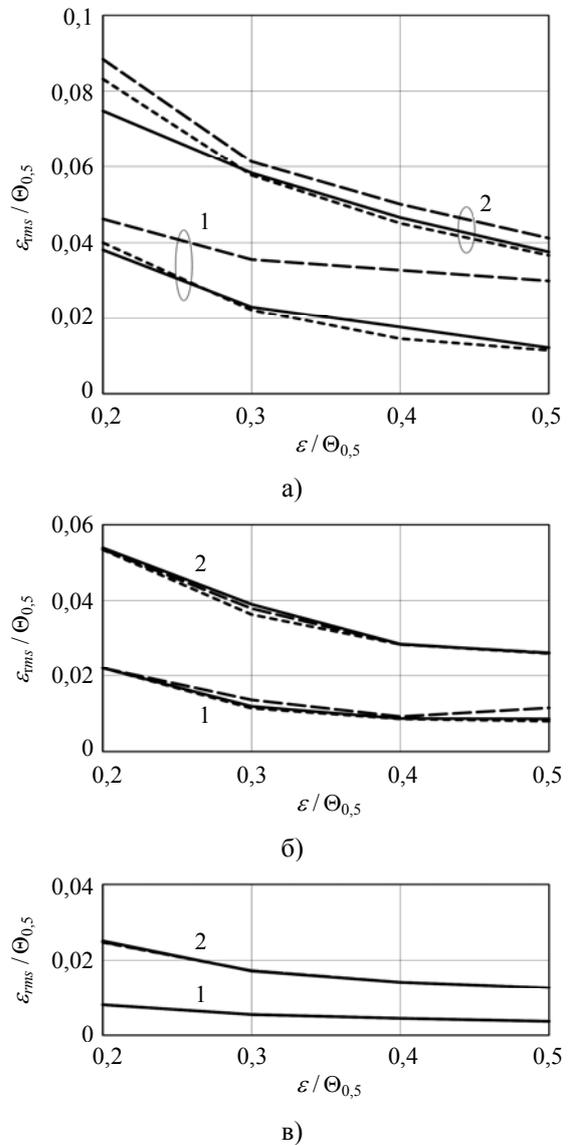


Рис. 5. Зависимости ошибок измерения угла места при использовании различных правил выбора решения: а) –  $K = 9$ ,  $M = 3$ ,  $p = 4$ ; б) –  $K = 12$ ,  $M = 4$ ,  $p = 5$ ; в) –  $K = 26$ ,  $M = 5$ ,  $p = 5$ ; 1 – высокий уровень зеркального отражения; 2 – высокий уровень диффузного отражения

**Выводы.** Выполнено компьютерное моделирование радиолокационного измерения углов места маловысотных целей над морем с использованием метода *root-MUSIC* при учете помех исключительно в виде отражений, поступающих от его взволнованной поверхности. Основное внимание уделено проблеме выбора угла места,

относящегося к цели, из совокупности решений, число которых определяется размерностью подпространства сигналов.

Для решения данной проблемы были изучены распределения совокупности измеренных углов места при различных степенях волнения моря и априорных параметрах метода. Это позволило предложить и испытать несколько простых правил выбора, а также выработать требования к параметрам приемной антенной решетки, выполнение которых понижает вероятность ложного выбора решения. В частности, отношение длины радиоволны к шагу решетки должно не менее чем в 1,2...1,3 раза превышать угловой размер области, занимаемой многолучевыми сигналами от цели.

При использовании предложенных правил выбора вычислены ошибки измерения угла места для различных исходных условий при угловых высотах цели над поверхностью моря от 0,2 до 0,5 ширины диаграммы направленности антенной решетки. Минимальные ошибки измерения получены при использовании двух практически одинаково эффективных правил.

Первое из них, более простое в реализации, приписывает цели угол места, который наименее отличается от некоторого контрольного значения, в качестве которого в работе используется значение, равное половине ширины диаграммы направленности антенной решетки.

В соответствии со вторыми правилом цели присваивается угол места сигнала, имеющего максимальную мощность, при этом поиск этого сигнала производится в той части совокупности решений, которая соответствует положительным углам места относительно поверхности моря. Второе правило сопряжено с повышенными вычислительными затратами, так как требует дополнительного вычисления мощности сигналов. Однако можно предположить (это предположение нуждается в дополнительных исследованиях), что оно обладает преимуществом над первым при работе в условиях дополнительных помех, например, в условиях воздействия внутренних шумов измерителя угла места.

#### Библиографический список

1. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл; пер. с англ. под ред. И. С. Рыжака. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
2. Шахтарин Б. И. Методы спектрального оценивания случайных процессов: учеб. пособие / Б. И. Шахтарин, В. А. Ковригин. – М.: Гелиос АРВ, 2005. – 248 с.
3. Direction of arrival estimation using a root-MUSIC algorithm / H. K. Hwang, Z. Aliyazicioglu, M. Grice, A. Yakovlev // Proc. of the Intern. MultiConference of Engineers and Computer Scientists. – Hong Kong, 2008. – Vol. 2. – P. 1507–1510.
4. Stoica P. MUSIC, maximum likelihood, and Cramer-Rao bound: Further results and comparisons / P. Stoica, A. Nehorai // IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Proc. – 1990. – 38, N 2. – P. 2140–2150.
5. Howell R. K. *d-MUSIC*, a real time algorithm for estimating the DOA of coherent sources using a single array snapshot / R. K. Howell // IEEE Intern. Conf. on Acoustics Speech and Signal Proc. – 1999. – Vol. 5. – P. 2881–2884.
6. Педенко Ю. А. особенности использования метода MUSIC для измерения угла места маловысотных целей над взволнованной поверхностью моря / Ю. А. Педенко // Радиофизика и электрон. – 2010. – 1(15), № 3. – С. 65–70.
7. Педенко Ю. А. Выбор параметров метода *root-MUSIC* при радиолокационном измерении углов места целей вблизи поверхности моря / Ю. А. Педенко // Радиофизика и электрон. – 2013. – 4(18), № 1. – С. 53–58.
8. Разсказовский В. Б. Модель поля миллиметровых и сантиметровых волн над морем для исследования методов измерения углов места низколетящих целей / В. Б. Разсказовский, Ю. А. Педенко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2003. – 8, № 1. – С. 22–33.
9. Векман P. The scattering of electromagnetic wave from rough surface / P. Векман, A. Spizzichino. – L.: Pergamon press, 1963. – 303 p.
10. Barton D. K. Low-Angle Tracking / D. K. Barton // Proc. of the IEEE. – 1974. – 62, N 6. – P. 687–704.
11. Dax P. R. Keep track of than low-flying attack / P. R Dax // Microwaves. – 1976. – 15. – P. 36–53.

Рукопись поступила 01.08.2014.

Y. A. Pedenko

#### MEASURING PLACES ANGLES OVER THE SEA USING *ROOT-MUSIC* METHOD. CHOICE OF SOLUTIONS

This paper presents results on the problem of increasing the accuracy of radar elevation angle measurements of the low-altitude targets above the sea using the root-MUSIC algorithm, which is considered by experts as a one of the means of addressing this problem. One of the tasks, without which it can not be an effective use of this algorithm, is virtually unexplored task of choosing a solution that meets the target, from an aggregate of several solutions the number of which is defined by the dimension of the signal subspace. In this paper, the distribution of the aggregate of measured elevation angles are obtained and analyzed by computer simulations for different degrees of the sea state, with varying number of spatial samples at a given aperture of the antenna array and the dimension of signal subspace. Standard errors of measurement elevation angle as a function on target elevation angle are calculated using different rules of choice the solution. The requirements for the antenna arrays used in the elevation angle measuring devices were developed. The rules which effectively solve the problem of the correct choice were proposed. The results of the study extend the knowledge of how to improve the methods and devices destined for measuring the target elevation angle above the sea.

**Key words:** *root-MUSIC*, low altitude target, elevation angle measurement, computer simulation.

Ю. О. Педенко

#### ВИМІР КУТІВ МІСЦЯ ЦІЛЕЙ НАД МОРЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ *ROOT-MUSIC*. ВИБІР РІШЕННЯ

Роботу присвячено проблемі підвищення точності радіолокаційного вимірювання кутів місця маловисотних цілей над морем при використанні методу *root-MUSIC*, який

розглядається фахівцями як один із засобів вирішення даної проблеми. Одним із завдань, без вирішення якого неможливо ефективно використання розглянутого методу, є практично не досліджена задача вибору рішення, що відноситься до цілі, із сукупності декількох отриманих рішень, кількість яких визначається розмірністю підпростору сигналів. Використовуючи комп'ютерне моделювання, отримано й проаналізовано розподіл сукупності вимірних кутів місця для різних ступенів хвилювання моря, при різній кількості просторових вибірок сигналу на заданому розкриві антенної решітки, різної розмірності підпростору сигналів. Розраховано кутomisцеву залеж-

ність середньоквадратичних похибок вимірювання кута місця при використанні декількох запропонованих правил вибору рішення. Розроблено вимоги до антенних решіток, що використовуються в пристроях вимірювання кута місця, виконання яких дозволяє зменшити похибки вибору. Запропоновано правила, які ефективно вирішують задачу правильного вибору. Результати дослідження розширюють уявлення про шляхи вдосконалення методів і пристроїв вимірювання кутів місця маловисотних цілей над морем.

**Ключові слова:** *root-MUSIC*, маловисотна ціль, вимірювання кута місця, комп'ютерне моделювання.