

**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)

## РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВ МЕСТА МАЛОВЫСОТНЫХ ЦЕЛЕЙ НАД МОРЕМ МЕТОДОМ *ROOT-MUSIC* В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ ОТ СИГНАЛОВ МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ТЕПЛОВЫХ ШУМОВ ПЕЛЕНГАТОРА

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. В отличие от предшествующих работ, в которых учитывалось влияние помех, создаваемых многолучевым распространением радиоволн, в данном исследовании помехи усложняются за счет добавления тепловых шумов пеленгатора. Это позволяет оценить возможности метода и дать рекомендации по его применению в условиях, близких к реальным. Исследование проводилось путем компьютерного моделирования. Оно охватило различные степени волнения моря, при которых выполнялись условия от зеркального до сильного диффузного отражения. При моделировании использовался широкий диапазон отношений сигнал/шум. Основное внимание уделялось исследованию влияния на ошибки измерений априорных параметров метода: размерности подпространства сигналов и порядка автокорреляционной матрицы сигналов, принимаемых многоэлементной антенной решеткой. Разработаны рекомендации по выбору этих параметров, позволяющие минимизировать ошибки измерения углов места в различных условиях. Результаты исследования расширяют представления о путях совершенствования методов измерения углов места маловысотных целей над морем. Ил. 6. Библиогр.: 9 назв.

**Ключевые слова:** *root-MUSIC*, маловысотная цель, измерение угла места, диффузное отражение, зеркальное отражение, тепловые шумы, компьютерное моделирование.

В цикле наших работ [1–4] были опубликованы результаты исследований метода *MUSIC* [5] для измерения углов места маловысотных целей над взволнованной поверхностью моря. Эти исследования проводились путем компьютерного моделирования с использованием алгебраической формы данного метода [6], известной под названием *root-MUSIC*. Их особенностью было то, что в качестве помех учитывались исключительно многолучевые сигналы, поступающие на антенны пеленгатора от поверхности моря. Сигналы были представлены зеркальным и диффузным отражениями, рассчитанными на основе модели «блестящей поверхности» [7].

Результаты работ [1–4] показали, что использование метода *root-MUSIC* позволяет существенно повысить точность измерений по сравнению с традиционными методами, например, с широко используемым амплитудным суммарно-разностным методом. В упомянутых работах были предложены рекомендации, позволяющие получить высокую точность измерений в условиях, когда влиянием собственных тепловых шумов углового измерителя (пеленгатора) на точность измерений можно пренебречь.

Однако на практике использовать такое допущение возможно не всегда. Это в первую очередь касается измерений углов места целей с низкой эффективной поверхностью рассеяния (ЭПР). В связи с этим необходимо дополнить ранее выполненные исследования с учетом тепловых шумов пеленгатора.

**1. Методика исследований.** Исследования проводились путем компьютерного моделирования с использованием модели поля [8], разработанной на основе теории «блестящей поверхности» [7, 9]. 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.

Для исследований использовались те же характеристики трассы, вертикальный размер приемной антенной решетки и рабочая длина волны, что и в работах [1–4]: длина трассы – 2 000 м; эквивалентный радиус кривизны земной поверхности – 8 500 км; высота центра 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; 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.

Исследования были проведены при нескольких значениях коэффициентов диффузного отражения и соответствующих им коэффициен-

тах зеркального отражения (в скобках):  $\rho_d(\rho_s) = 0,1(0,93); 0,2(0,81); 0,3(0,65); 0,36(0,5)$ . Это позволило охватить условия от преимущественно зеркального отражения до сильного диффузного отражения.

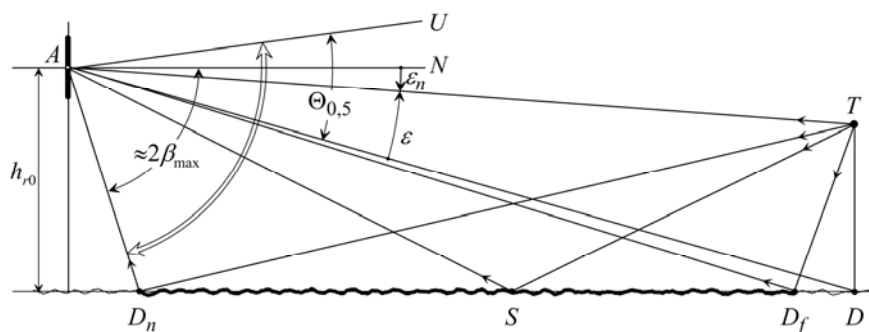


Рис. 1. Геометрия трассы

Исследование проводилось в три этапа. На первом этапе для выбранной геометрии трассы и параметров морской поверхности выполнялось вычисление достаточно большого количества независимых реализаций поля сигналов  $A_n$  в раскрыве 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 каждого из используемых значений  $\Delta\varphi_0$ , так и усредненные на интервале  $0 \dots 360^\circ$ . В данной работе использовались именно последние характеристики.

На втором этапе выполнялись расчеты углов прихода и мощности компонент для каждой из случайных реализаций поля сигналов.

Данное исследование является логическим продолжением работы [3], в которой изуча-

лось влияние априорных параметров метода *root-MUSIC* на точность измерений при учете только помех, создаваемых многолучевыми сигналами, т. е. при  $S/N = \infty$ . Основные рекомендации этой работы, направленные на достижение высокой точности измерений, состояли в следующем:

- следует увеличить размерность подпространства до значений  $M = 5 \dots 7$ , отказавшись от традиционно используемой размерности подпространства сигналов  $M = 2$ ;
- использовать количество пространственных выборок сигнала, равное утроенному (учетверенному) значению размерности подпространства сигналов;
- при соблюдении предыдущих условий максимальной точности измерений можно реализовать путем приравнивания порядка автокорреляционной матрицы сигналов размерности подпространства сигналов.

На основании этих выводов для настоящего исследования использовано количество выборок  $K = 26$  ряда значений  $K = 9; 12; 17; 26$ , испытанных в работе [3]. Такое количество выборок отвечает и рекомендации работы [4], чтобы отношение длины радиоволны к шагу пространственных выборок сигналов не менее чем в  $1,2 \dots 1,3$  раза превышало угловой размер области, занимаемой многолучевыми сигналами от цели. Выполнение этой рекомендации уменьшает вероятность неправильного выбора решения, относящегося к цели, из  $M$  получаемых решений.

Чтобы исследовать зависимость ошибок измерения от априорных параметров метода, использовался широкий диапазон их значений: раз-

мерность подпространства сигналов  $M = 2 \dots 6$ , порядок автокорреляционной матрицы принимаемых сигналов  $p = M \dots K/2$ .

Выбор решения, соответствующего измеряемой цели, выполнялся также в соответствии с рекомендациями [4]:

- из совокупности  $M$  решений, получающихся в результате использования метода *root-MUSIC*, отбрасывались решения, которые находились вне диапазона угловых высот от  $\varepsilon = 0$  до  $\varepsilon = \Theta_{0,5}$  ( $\angle UED$  на рис. 1);

- из оставшихся решений выбиралось то, которому соответствовала максимальная мощность.

Чтобы получить заданное количество пространственных выборок  $K = 26$ , основная решетка, состоящая из  $N = 156$  элементов, разбивалась на 26 смежных подрешеток, состоящих из  $I = 6$  элементов каждая. На базе каждой из подрешеток синтезировалась приемная антенна и рассчитывался принимаемый ею сигнал.

Весовые коэффициенты для элементов каждой из подрешеток рассчитывались с использованием функции Хэмминга, что обеспечивало уровень боковых лепестков синтезированных антенн не более  $-40$  дБ. Пространственная выборка принимаемых сигналов, которая формировалась приемной антенной, синтезированной на базе  $k$ -й подрешетки, вычислялась по формуле:

$$\dot{U}_k = \sum_{i=1}^I \dot{a}_{ki} G_i + \dot{w}_k, \quad (1)$$

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;  $\dot{w}_k$  – тепловой шум в  $k$ -м приемном канале, причем

$$\dot{w}_k = 10^{-\log((S/N)/20)} a_{dir} (x_k + jy_k) \sum_{i=1}^I G_i, \quad (2)$$

где  $a_{dir}$  – амплитуда прямой волны на каждом из 156 элементов антенной решетки,  $S/N$  – отношение сигнал/шум в децибелах, представляющее собой отношение амплитуды прямого сигнала, принятого элементарной антенной, к среднеквадратической амплитуде тепловых шумов в приемном канале пеленгатора;  $x_k, y_k$  – независимые случайные числа с нулевыми средним и дисперсией 0,5, распределенные по нормальному закону.

На третьем этапе выполнялась статистическая обработка полученных результатов и оценка эффективности использования того или иного сочетания априорных параметров метода *root-MUSIC* в различных условиях. Для количест-

венной оценки эффективности использовались среднеквадратические ошибки измерения угла места (СКО), полученные путем усреднения на интервале разностей фаз между прямым и зеркальным сигналами  $0 \dots 360^\circ$ .

**2. Зависимость ошибок измерения угла места от априорных параметров метода.** В этом разделе будут рассмотрены результаты, полученные при угловой высоте источника излучения  $\varepsilon = 0,3\Theta_{0,5}$ , что соответствует углу места относительно нормали к решетке  $\varepsilon_n \approx 0,05\Theta_{0,5}$ .

Рассмотрим влияние шумов на величину ошибок измерения при размерностях подпространства сигналов  $M = 2, 3, 4, 5$  и 6. Из них два последних значения, в соответствии с [3], обеспечивают наименьшие ошибки при учете помех, создаваемых только многолучевыми сигналами.

На рис. 2 представлены зависимости ошибок от величины параметра  $p$  при отношениях  $S/N = 20, 30, 40, 50$  дБ, а также при отсутствии шумов, т. е. при  $S/N = \infty$ . Левая колонка графиков относится к условиям слабого ( $\rho_d = 0,10$ ), а правая – сильного диффузного отражения ( $\rho_d = 0,35$ ).

Из рисунка видно, что наименьшие ошибки во всех случаях достигаются при отсутствии тепловых шумов. При этом их минимальные значения реализуются при условиях, сформулированных в [3] и описанных выше в разд. 1. Этим условиям на рис. 2 отвечают зависимости, полученные при  $M = 5, \rho_d = 0,10$ , а также при  $M = 6, \rho_d = 0,35$ .

Общей особенностью зависимостей является то, что при максимальном уровне шумов ( $S/N = 20$  дБ) увеличение параметра  $p$  приводит к монотонному падению ошибок при всех использованных в работе уровнях диффузного отражения и размерностях подпространства сигналов. Исследованием охватывался диапазон значений  $p$  от минимально возможных  $p_{\min} = M$  до  $p_{\max} = 12 (\approx K/2)$ . Использовать более высокую границу для  $p$  нецелесообразно, так как скорость падения ошибок уменьшается с увеличением  $p$ , а ошибки достигают минимальных или близких к ним значений уже при  $p = 9 \dots 12 (\approx K/3 \dots K/2)$ .

При отсутствии тепловых шумов аналогичное (т. е. с ростом  $p$ ) уменьшение ошибок происходит лишь при  $M \leq 3$ . При  $M \geq 4$  ошибки измерения остаются практически неизменными, либо увеличиваются с ростом  $p$ , оставаясь однако на более низком уровне по сравнению со случаем наличия шумов.

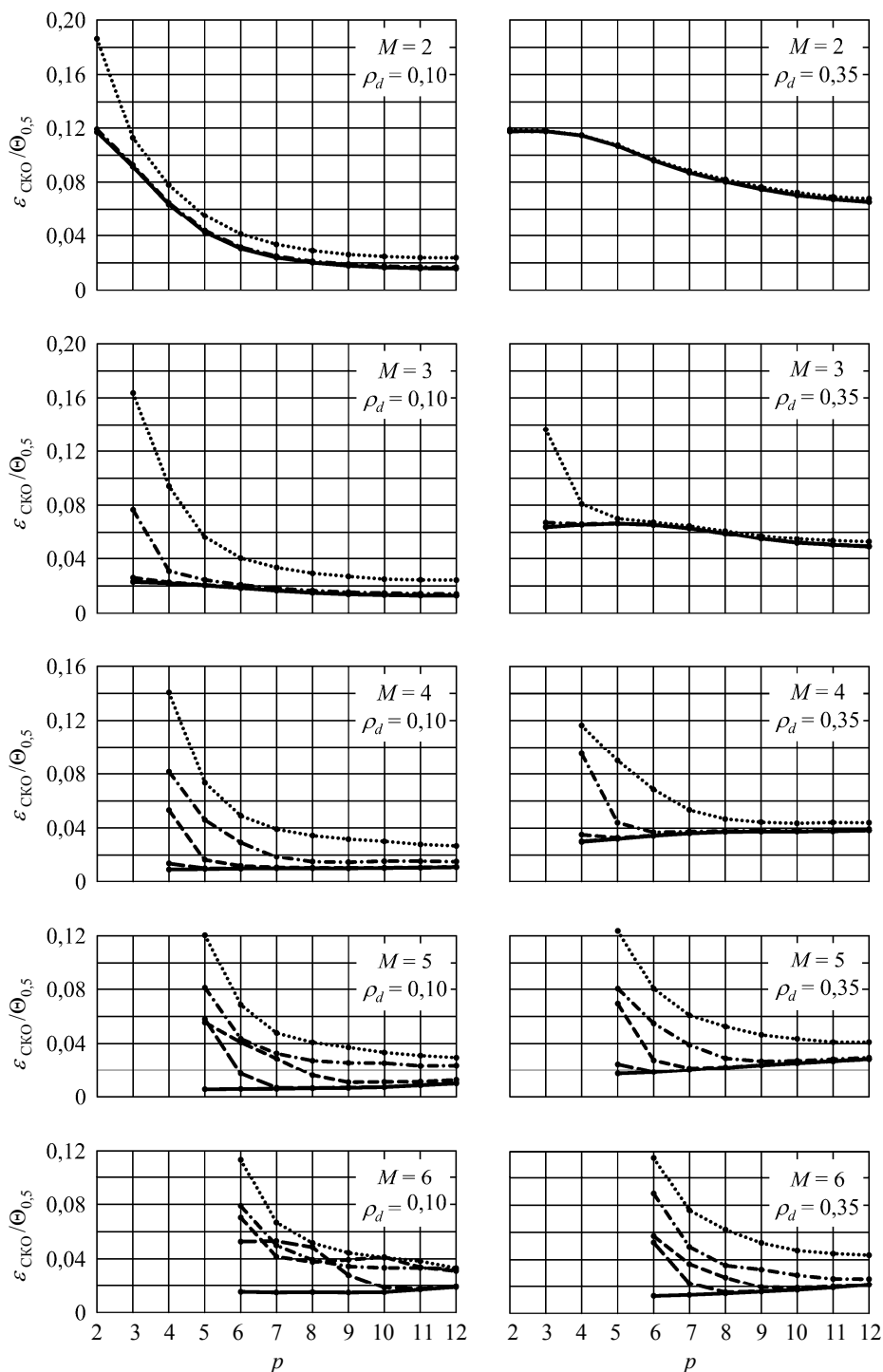


Рис. 2. Зависимости среднеквадратических ошибок измерения угла места от порядка автокорреляционной матрицы: ..... –  $S/N = 20$  дБ; -.-.-.- – 30 дБ; - - - - - – 40 дБ; - - - - - – 50 дБ; ——— –  $\infty$

Зависимости, полученные при отношениях  $S/N$  от 30 до 50 дБ, занимают промежуточное положение. Обращают на себя внимание две особенности этих зависимостей.

Во-первых, происходит существенный рост ошибок при добавлении тепловых шумов в условиях низкого уровня диффузного отражения.

Он особенно сильно проявляется при больших значениях  $M$  и малых  $p$ . Как видно из графиков, при  $M = 5, \rho_d = 0,10, p = 2$  ошибки возрастают до десяти раз при добавлении шумов с уровнем лишь  $-50$  дБ относительно прямого сигнала. Дальнейшее их увеличение на 30 дБ приводит к возрастанию ошибок только примерно вдвое.

Во-вторых, на двух графиках (при  $M = 5$ ,  $\rho_d = 0,10$ , в еще большей степени – при  $M = 6$ ,  $\rho_d = 0,10$ ) наблюдается на первый взгляд неожиданная ситуация. Она заключается в том, что ряде случаев ошибки измерений, полученные при малом уровне шумов, оказываются выше полученных при более высоком уровне. Более наглядно это представлено на рис. 3, на котором приведены зависимости ошибок измерения от отношения сигнал/шум с параметрами  $p = 5, 6, 9, 12$ , полученные при  $M = 5$ ,  $\rho_d = 0,10$ . Кривая с параметром  $p = 5$  демонстрирует рост ошибок измерения при увеличении отношения сигнал/шум от 40 до 45 дБ.

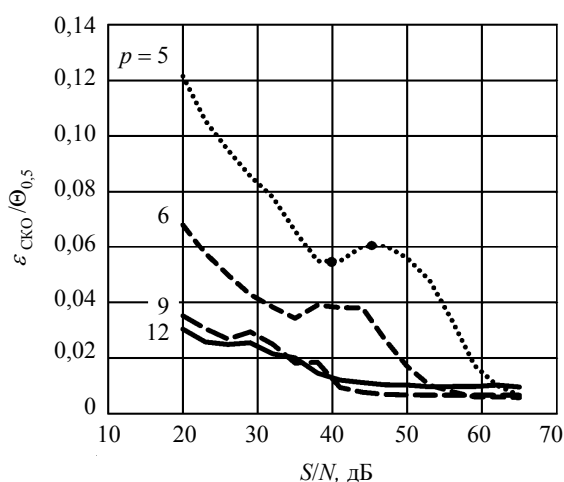


Рис. 3. Зависимости ошибок измерения угла места от отношения сигнал/шум при различных значениях порядка матрицы сигналов ( $M = 5$ ;  $\rho_d = 0,10$ )

Чтобы объяснить это явление, были исследованы распределения измеренных углов места вблизи направления на цель. Несколько таких распределений, полученных при различных отношениях сигнал/шум, представлены на рис. 4, а. Они рассчитаны для тех же условий, что и на рис. 3, при  $p = 5$ . Видно, что максимум распределения при больших отношениях сигнал/шум практически совпадает с направлением на цель ( $\varepsilon = 0,3\Theta_{0,5}$ ). С падением отношения максимум монотонно уменьшается и смещается по направлению к поверхности моря. Ширина распределений измеренных углов места при этом растет. Таким образом, если бы СКО измерения угла места определялась только измеренными значениями вблизи направления на цель, то зависимости на рис. 3 также монотонно спадали бы с ростом отношения сигнал/шум. Так как это не происходит, можно предположить, что монотонность зависимостей, приведенных на рис. 3, нарушается бла-

годаря особенностям «хвостов» распределений при различных отношениях сигнал/шум.

Действительно, на рис. 4, б показано продолжение распределений, приведенных на рис. 4, а, для двух значений  $S/N$ , соответствующих экстремумам, обозначенным на рис. 3 жирными точками. Из него видно, что уровень «хвостов» при более высоком  $S/N = 45$  дБ превышает уровень при  $S/N = 40$  дБ до двух раз на участке, удаленном от максимума распределения. Это и приводит к некоторому увеличению ошибок с ростом  $S/N$ .

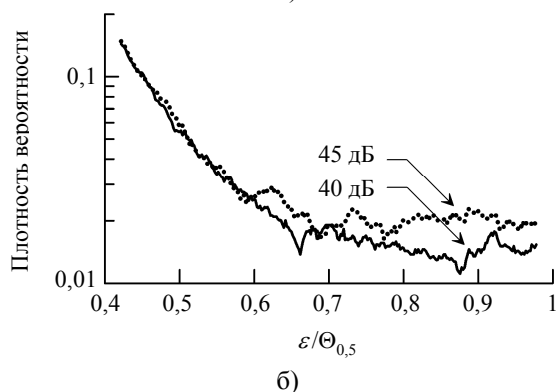
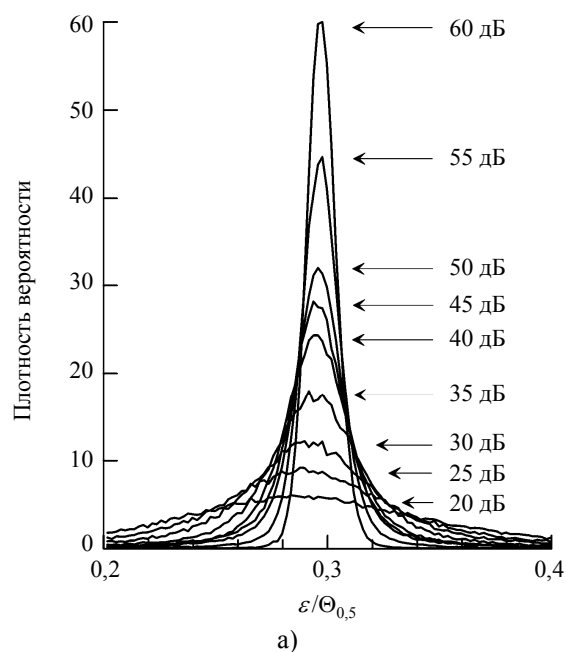


Рис. 4. Распределения измеренных углов места при различных отношениях сигнал/шум ( $M = 5$ ;  $\rho_d = 0,10$ ;  $p = 5$ ): а) распределения вблизи направления на цель; б) «хвосты» распределений для  $S/N = 40$  и 45 дБ

Объяснить неравномерную зависимость уровня «хвостов» от отношения сигнал/шум могут помочь распределения совокупности углов места, относящихся ко всем решениям из подпространства сигналов (рис. 5).

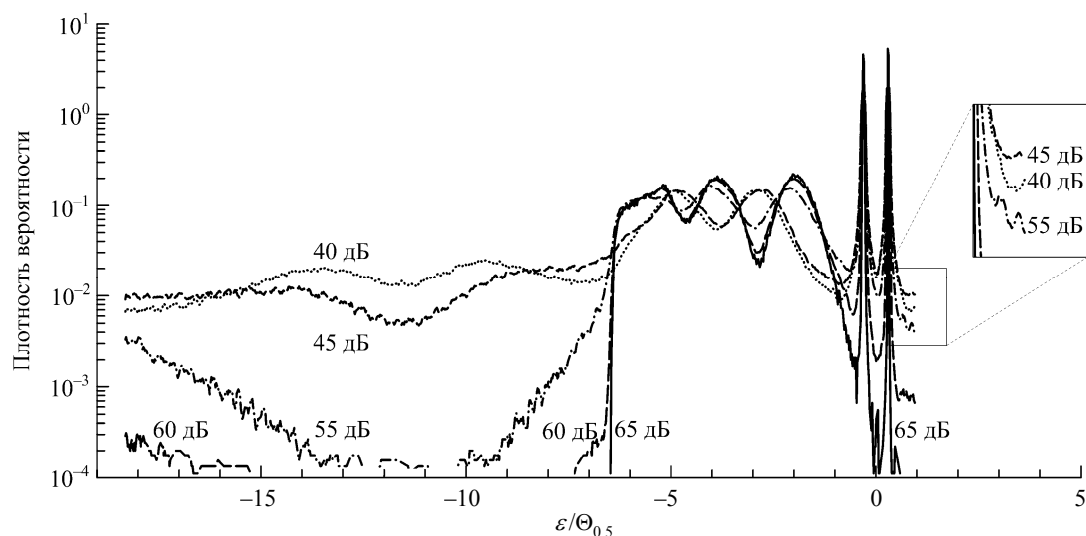


Рис. 5. Распределение совокупности углов места, соответствующих решениям подпространства сигналов, при различных отношениях сигнал/шум ( $M = 5$ ;  $\rho_d = 0,10$ ;  $p = 5$ )

Условия для их расчета совпадают с теми, что и на рис. 4. Каждое из распределений получено по  $ML$  значениям углов места ( $M = 5$ ;  $L$  – количество случайных реализаций поля принимаемых сигналов на приемной решетке, в данном случае  $L = 36\,000$ ). На рисунке отметим характерные участки:

- два острых максимума в правой части соответствуют прямому сигналу от цели ( $\varepsilon = 0,3\Theta_{0,5}$ ) и его зеркальному отражению ( $\varepsilon = -0,3\Theta_{0,5}$ );
- сектор углов от  $\varepsilon = -6,5\Theta_{0,5}$  до  $\varepsilon = \Theta_{0,5}$  (сигнальная зона) охватывает «блестящую» поверхность, из которой приходят диффузные и зеркальное отражения, а также область мало-высотных целей от  $\varepsilon = 0$  до  $\varepsilon = \Theta_{0,5}$ ;
- сектор углов от  $\varepsilon = -18,1\Theta_{0,5}$  до  $\varepsilon = \Theta_{0,5}$  – область однозначных измерений, определяется отношением рабочей длины волны к расстоянию между пространственными выборками принимаемых сигналов.

Заметим, что при высоких отношениях сигнал/шум распределение совокупности не выходит за пределы сигнальной зоны. Это видно, например, при  $S/N = 65$  дБ (сплошная линия). Но с уменьшением  $S/N$ , начиная с  $S/N = 60$  дБ, решения выходят за ее пределы и все более «расползаются» по всей области однозначных измерений. При этом плотность вероятности на краях сигнальной зоны, как справа, так и слева, изменяется немонотонно, что видно из сравнения кривых при  $S/N = 45$  дБ и  $S/N = 40$  дБ. В правой части рис. 5 на выноске видно, что «хвост» распределения при  $S/N = 45$  дБ расположен выше,

чем при  $S/N = 40$  дБ, что и явилось причиной «аномальных» зависимостей ошибок измерения от отношения сигнал/шум. Следует сказать, что такие зависимости присущи большим значениям  $M$  и возникают при малых значениях  $p$ . Они в большей степени выражены при низких уровнях диффузного отражения.

Выясним, как влияет размерность подпространства сигналов на величину ошибок. Для этого воспользуемся графиками на рис. 2. Учтем, что измерения проводятся с использованием  $p = 9 \dots 12$ , при которых ошибки близки к минимальным.

Сначала рассмотрим зависимости ошибок при низком уровне диффузного отражения (левая колонка графиков). Видим, что малых отношений сигнал/шум наименьшие ошибки обеспечиваются при  $M = 2 \dots 3$ , а при больших –  $M = 3 \dots 5$ . Такая зависимость ошибок от параметра  $M$  объясняется тем, что в первом случае модель помех близка к той, которая положена в основу метода *MUSIC* [5], а во втором – помехи определяются в основном диффузным отражением, при котором в соответствии выводами работы [3] следует выбирать  $M = 5 \dots 6$ .

При большом уровне диффузных отражений (правая колонка графиков) и низком отношении сигнал/шум наименьшие ошибки получаются при  $M = 4 \dots 6$ . При уменьшении шумов лучшие результаты получаются при  $M = 5 \dots 6$ .

Таким образом, дополнительный учет тепловых шумов в приемных каналах пеленгатора приводит к тому, что значения  $M$ , при которых получаются наименьшие ошибки, следует уменьшать до  $M = 3 \dots 6$  по сравнению со случаем

помех, создаваемых только многолучевыми сигналами, где лучшие результаты, как следует из [3], получаются при  $M = 5 \dots 7$ . Из предыдущего анализа ясно, что меньшие значения из этого диапазона следует выбирать при больших уровнях тепловых шумов и низком уровне диффузного отражения, а большие – при высоком уровне диффузного отражения.

**3. Моделирование измерений углов места.** На основании результатов, описанных в предыдущем разделе, для моделирования измерений в широком диапазоне углов от  $0,2\Theta_{0,5}$  до  $0,5\Theta_{0,5}$  были выбраны следующие параметры:  $M = 5$  и  $p = 9$ .

Для сравнения было выполнено моделирование при  $M = 2$  и  $p = 9$ . Значение  $M = 2$  было выбрано в соответствии с моделью зеркального отражения, когда размерности подпространства сигналов присваивают значение количества детерминированных сигналов.

Результаты моделирования, представленные в виде зависимости ошибок измерения от угловой высоты цели, приведены на рис. 6. Они получены для отношений сигнал/шум 20, 30 и 40 дБ. Также выполнено моделирование для случая отсутствия шумов ( $S/N = \infty$ ), которое показывает предельно достижимые точности измерений.

Сначала рассмотрим зависимости СКО измерения от истинного угла места при  $M = 5$  (левая колонка графиков на рис. 6). Здесь стоит отметить, что зависимости, полученные при большом уровне шумов ( $S/N = 20$  дБ), в своей левой части во многом повторяют друг друга независимо от уровня диффузного отражения. Так, при  $\varepsilon = 0,2\Theta_{0,5}$  значение ошибки не выходит за пределы  $0,060\Theta_{0,5} \dots 0,063\Theta_{0,5}$  при всех уровнях диффузного отражения. С ростом угла места расхождение кривых увеличивается. При малом уровне диффузного отражения падение происходит быстрее и достигает значения  $0,02\Theta_{0,5}$ , в то время как при большом уровне оно снижается лишь до значения  $0,03\Theta_{0,5}$ . В целом можно сказать, что ошибки измерения в данном случае определяются в большой степени тепловыми шумами.

С другой стороны, при отсутствии шумов ( $S/N = \infty$ ) при всех углах места наблюдается устойчивое увеличение ошибок с ростом уровня диффузного отражения. Однако ошибки при этом остаются значительно меньшими (в несколько раз), чем при наличии шумов. Особенно сильно

шумы влияют на точность измерений при слабом диффузном отражении.

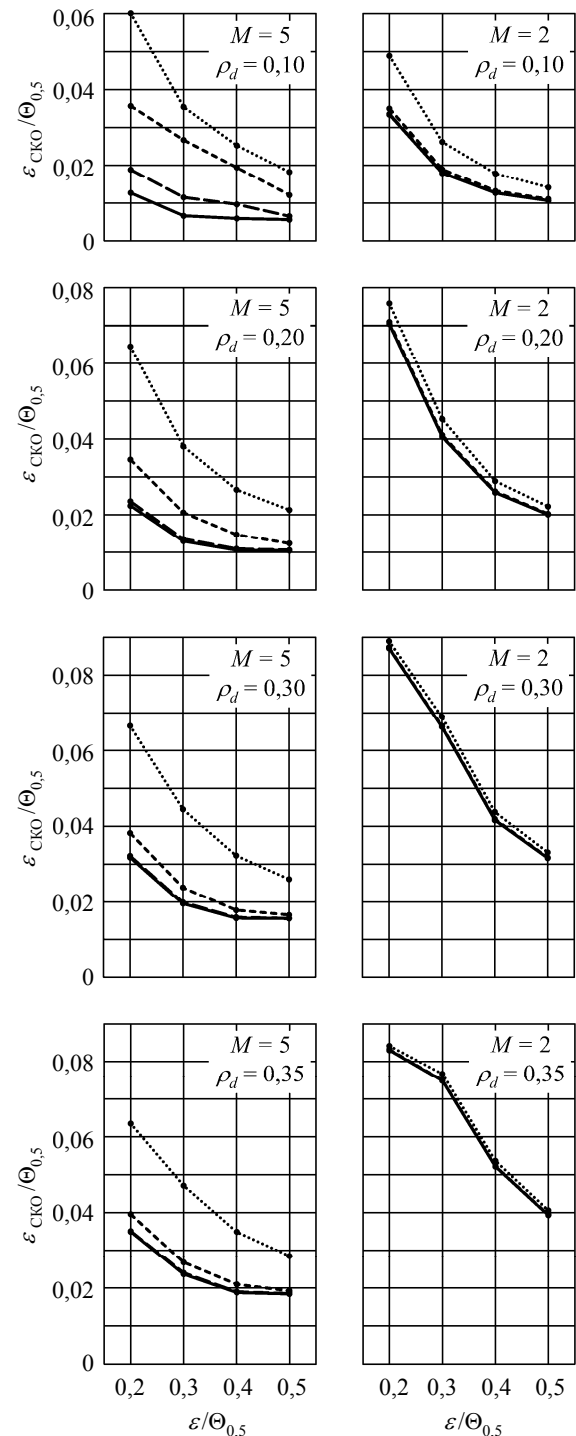


Рис. 6. Ошибки измерения угла места: ..... –  $S/N = 20$  дБ; - - - - - 30 дБ; - · - · - 40 дБ; — — — — —  $\infty$

Перейдем к зависимостям ошибок при  $M = 2$  (правая колонка графиков на рис. 6). Прежде всего следует отметить, что ошибки при отсутствии шумов здесь значительно превышают полу-

ченные при  $M = 5$ . Особенно велико превышение при малых углах места. Оно составляет около трех раз для любой пары графиков из соседних колонок. Добавление тепловых шумов приводит к небольшому увеличению ошибок лишь при низком уровне диффузного отражения и если  $S/N = 20$  дБ. Зависимости ошибок от угла места на остальных графиках правой колонки при любых отношениях сигнал/шум практически совпадают.

В целом можно сказать, что при среднем и большом уровнях диффузного отражения, т. е. при  $\rho_d = 0, 2 \dots 0, 35$ , использование размерности подпространства сигналов  $M = 5$  имеет явное преимущество по сравнению со случаем  $M = 2$ . Это преимущество нарастает с увеличением коэффициента диффузного отражения и с увеличением отношения сигнал/шум.

Использование минимальной размерности  $M = 2$  оправдано лишь при малом уровне диффузного отражения, т. е. при высоком уровне зеркального отражения, и больших уровнях тепловых шумов. Это видно из сравнения двух верхних графиков на рис. 6.

**Выводы.** Выполнено компьютерное моделирование радиолокационного измерения углов места маловысотных целей над морем с использованием метода *root-MUSIC* при одновременном учете помех, создаваемых как многолучевыми сигналами, так и тепловыми шумами пеленгатора.

Изучено влияние априорных параметров метода, таких как размерность подпространства сигналов и порядок автокорреляционной матрицы принимаемых сигналов, на точность измерений. Исследование выполнялось как при сильном, так при слабом диффузном отражении (т. е. преимущественно зеркальном типе отражения), при различных уровнях теплового шума в приемных каналах пеленгатора.

Установлено, что при наличии тепловых шумов с целью получения наименьших ошибок измерения следует использовать размерность автокорреляционной матрицы  $p = (1/3 \dots 1/2)K$ , где  $K$  – количество пространственных выборок принимаемого сигнала.

С той же целью следует выбирать размерность подпространства сигналов  $M = 3 \dots 6$ , причем левая граница этого диапазона соответствует условиям преимущественно зеркального отражения, а правая – сильного диффузного отражения. Лишь в условиях сильного зеркального отражения и высокого уровня тепловых шумов целесообразно снизить размерность до минимальной  $M = 2$ .

## Библиографический список

1. 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.
2. Педенко Ю. А. Влияние многолучевого распространения на определение угла места маловысотного излучателя методом *root-MUSIC* / Ю. А. Педенко, В. Б. Разказовский, Ю. Ф. Логвинов // Радиофизика и электрон. – 2011. – 2(16), № 2. – С. 32–42.
3. 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.
4. Педенко Ю. А. Измерение углов места целей над морем с использованием метода *root-MUSIC*. Выбор решения / Ю. А. Педенко // Радиофизика и электрон. – 2014. – 5(19), № 4. – С. 33–41.
5. 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.
6. Шахтарин Б. И. Методы спектрального оценивания случайных процессов: учеб. пособие / Б. И. Шахтарин, В. А. Ковригин. – М.: Гелиос АРВ, 2005. – 248 с.
7. Веckman P. The scattering of electromagnetic wave from rough surface / P. Веckman, A. Spizzichino. – L.: Pergamon press, 1963. – 303 p.
8. 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. 22–33.
9. Barton D. K. Low-Angle Tracking / D. K. Barton // Proc. of the IEEE. – 1974. – 62, N 6. – P. 687–704.

Рукопись поступила 22.12.15.

Yu. A. Pedenko

## RADAR ELEVATION ANGLES MEASUREMENTS OF LOW-ALTITUDE TARGETS OVER THE SEA BY ROOT-MUSIC METHOD UNDER INTERFERENCE FROM MULTIPATH AND THERMAL NOISE OF DIRECTION FINDER

The work is devoted to improvement of the accuracy of radar measurements of elevation angles of low-altitude targets above sea level when using the *root-MUSIC*, which is considered by experts as one of the means to solve this problem. Unlike previous studies, which take into account the multipath only, in this study the clutter is complicated by thermal noise of radar. This allows to evaluate the capabilities of the method and provide guidance on its application in the conditions close to reality. The study was carried out by computer simulation. It covered various sea states at which the conditions from specular to strong diffuse reflection were complied. In the simulation a wide range of signal/noise ratio was used. The main focus was the study of effects on measurement errors of a priori parameters of the method: the signal subspace dimension and the order of autocorrelation matrix of signals received by a multi-element antenna array. The recommendations of their choice, allowing to minimize the errors of elevation measurement in different conditions, have been developed. The results of the study extend the knowledge of how to improve the methods for measuring the target elevation angle above the sea.



**Key words:** *root-MUSIC*, low altitude target, elevation angle measurement, diffuse reflection, specula reflection, thermal noise, computer simulation.

Ю. О. Педенко

РАДИОЛОКАЦІЙНЕ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ  
МІСЦЯ МАЛОВИСОТНИХ ЦІЛЕЙ НАД МОРЕМ  
МЕТОДОМ *ROOT-MUSIC*  
ЗА УМОВ ЗАВАД ВІД СИГНАЛІВ  
БАГАТОПРОМЕНЕВОГО ПОШИРЕННЯ  
І ТЕПЛОВИХ ШУМІВ ПЕЛЕНГАТОРА

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. На відміну від попередніх робіт, в яких враховується вплив завад, створюваних тільки багатопроменевим поши-

ренням радіохвиль, у цьому дослідженні завади ускладнюються за рахунок додавання теплових шумів пеленгатора. Це дозволяє оцінити можливості методу і дати рекомендації щодо його застосування в умовах, наближених до реальних. Дослідження проводилося шляхом комп'ютерного моделювання. Воно охопило різні ступені хвилювання моря, за яких відтворювалися умови від дзеркального до сильного дифузного відбиття. При моделюванні використовувався широкий діапазон відношень сигнал/шум. Основна увага приділялася дослідженню впливу на похибки вимірювань апріорних параметрів методу: розмірності підпростору сигналів і порядку кореляційної матриці сигналів, прийнятих багатоеlementною антенною решіткою. Розроблено рекомендації щодо їх вибору, які дозволяють мінімізувати похибки вимірювання кутів місця за різних умов. Результати дослідження розширюють уявлення про шляхи вдосконалення методів вимірювання кутів місця маловисотних цілей над морем.

**Ключові слова:** *root-MUSIC*, маловисотна ціль, вимірювання кута місця, дифузне відбиття, дзеркальне відбиття, теплові шуми, комп'ютерне моделювання.