

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**ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МЕТОДА *ROOT-MUSIC* ПРИ РАДИОЛОКАЦИОННОМ ИЗМЕРЕНИИ УГЛОВ МЕСТА ЦЕЛЕЙ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ**

Метод высокого спектрального разрешения *root-MUSIC* рассматривается в последнее время как одно из средств, позволяющих решить задачу повышения точности измерения угла места маловысотных целей над взволнованным морем. Однако традиционный подход к выбору априорных параметров метода, разработанный с позиций спектрального анализа, не позволяет выявить его преимущество в точности измерений по сравнению с лучшими специальными методами, предложенными для решения рассматриваемой задачи. Это послужило причиной разработки различных модификаций метода. В настоящей работе с помощью компьютерного моделирования выполнено исследование метода в его классической форме, но при использовании априорных параметров, в том числе существенно отличающихся от используемых в других исследованиях. В первую очередь это касается размерности подпространства сигналов. Показано, что увеличение размерности от значения равного двум, обусловленного использованием зеркальной модели отражения радиоволн от поверхности раздела, до пяти-семи, позволяет повысить точность измерения угла места маловысотных целей в несколько раз. Установлено, что повышение точности проявляется как при сильном диффузном, так и сильном зеркальном отражении радиоволн от моря. Ил. 2. Библиогр.: 12 назв.

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

К настоящему времени опубликован ряд работ, посвященных использованию метода *MUSIC* [1] как вообще для измерения угловых координат целей [2, 3], так, в частности, и для измерения углов места целей вблизи поверхности моря или суши, например [4–6].

Как отмечалось в работе [7], предпосылки, положенные в основу метода *MUSIC*, не в полной мере соответствуют реальным условиям формирования сигналов над неровной поверхностью моря или суши. К тому же задача измерения угла места цели имеет свою специфику – ее решение в общем случае должно быть направлено исключительно на повышение точности измерения параметров единственного сигнала, поступающего от пеленгуемой цели. При этом повышение точности измерения параметров других сигналов, например зеркального отражения, может представлять интерес, поскольку это способствует решению основной задачи. В таком случае рекомендации, относящиеся к задачам традиционного использования метода *MUSIC*, т. е. к задачам спектрального анализа случайных сигналов, требуют в нашем случае пересмотра и дальнейшего развития.

Использование этого метода предусматривает априорный выбор ряда его параметров, влияющих в итоге на точность измерений. Очевидно, в первую очередь должно быть исследовано влияние следующих параметров:

- размерности подпространства сигналов M ;
- порядка автокорреляционной матрицы пространственных выборок принимаемых сигналов p (размер матрицы при этом равен $(p+1) \times (p+1)$);

– количества пространственных выборок принимаемых сигналов.

При этом подразумевается, что вертикальный размер приемной антенны остается неизменным, а каждое измерение производится с использованием единственной единовременной пространственной выборки сигналов.

Определяющим из перечисленных параметров является параметр M . Следует отметить, что в известных работах, например [4–6], затрагивающих вопрос использования метода *MUSIC* для измерения углов места маловысотных целей, применяется значение $M=2$. Выбор такого значения обусловлен использованием гипотезы о зеркальном отражении от поверхности моря, учитывающей два детерминированных сигнала – прямого от цели и зеркально отраженного от поверхности раздела.

В случае диффузного отражения, имеющего место при работе над взволнованной поверхностью моря на миллиметровых и сантиметровых радиоволнах, такой подход представляется упрощенным и не соответствующим действительности. Так, одним из выводов теории «блестящей поверхности» [8] является вывод о наличии резко выраженного пика в распределении мощности диффузного отражения по углу места. Этот пик расположен вблизи биссектрисы угла, образованного направлениями на цель и ее зеркальное отражение. На этапе предварительного моделирования нами была осуществлена попытка учета этого пика путем увеличения за счет него размерности подпространства сигналов до значения $M=3$. Однако, вопреки ожиданиям, среди решений, полученных в подпространстве

сигналов, не было близких к упомянутой биссектрисе – решение для третьего сигнала лежало, как правило, в области углов, расположенных значительно ниже направления на зеркальное отражение. Тем не менее увеличение размерности подпространства сигналов привело к существенному повышению точности измерения угла места цели. Это и послужило побудительной причиной для исследования ошибок измерения угла места не только при $M = 2$, но и при значениях $M \geq 3$.

Размерность подпространства сигналов M накладывает ограничения на использование значений параметров p и K . Необходимым является выполнение условий $K > p \geq M$. При этом следует обеспечить достаточное превышение количества выборок сигнала над порядком автокорреляционной матрицы, так как это повышает качество ее оценки. С другой стороны, с целью упрощения технической реализации метода стремятся к уменьшению значений перечисленных параметров. В публикациях этим и ограничиваются рекомендации по выбору указанных параметров относительно рассматриваемой задачи.

1. Методика исследований. Исследования проводились путем численного статистического моделирования на ЭВМ с использованием модели поля, разработанной нами [9] на основе теории «блестящей поверхности» [8, 10].

Для исследований была выбрана типичная геометрия трассы, вертикальный размер приемной антенной системы и рабочая длина волны, соответствующие реальным условиям работы радиолокационных станций. При этом параметры трассы, использованные при моделировании, были следующими: длина трассы $D = 2\,000$ м; высота центра приемной антенны над поверхностью $h_R = 12$ м; высота точечного источника излучателя $h_T = 10,6$ м; 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 $N = 156$.

При указанных выше параметрах угловая высота цели над поверхностью $\varepsilon_T = 0,3 \Theta_{0,5}$, где $\Theta_{0,5}$ – ширина виртуальной суммарной диаграммы направленности антенны по уровню половинной мощности, синтезированной по всем элементам антенной решетки. При указанных выше параметрах решетки $\Theta_{0,5} = 1^\circ$.

Поле при моделировании создавалось имитатором цели, представлявшим собой изотропный точечный источник излучения, что обеспечивало равномерную подсветку всей «блес-

тящей поверхности», участвовавшей в формировании диффузного отражения.

На начальной стадии исследования внимание было уделено поиску параметров M , p и K , обеспечивающих минимальные ошибки измерения угла места в условиях сильного диффузного отражения. Такие условия обеспечивались заданным значением среднеквадратической высоты неровностей поверхности $\sigma_h = 0,266$ м (умеренное волнение моря силой около 3 баллов [11]). При этом коэффициенты зеркального и диффузного отражения составляли соответственно $\rho_s = 0,5$ и $\rho_d = 0,35$.

Чтобы оценить область применимости полученных результатов, было выполнено аналогичное исследование и для противоположной ситуации – для условий сильного зеркального отражения. Для этого использовалось значение $\sigma_h = 0,089$ м (легкое волнение моря силой около 2 баллов [11]), при этом $\rho_s = 0,92$, а $\rho_d = 0,10$.

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

Следствием использования фиксированных размеров трассы и рабочей длины волны, приведенных выше, является постоянство разности фаз между прямым и зеркально отраженным сигналом в центре приемной решетки $\Delta\varphi_0$. Для того чтобы результаты моделирования не были привязаны к этой разности фаз, а оценки измерения угла места носили общий характер, реализации поля рассчитывались для ряда искусственно заданных значений: $\Delta\varphi_0 = 0, 20, 40 \dots 340^\circ$. Для этого фаза отражения сигнала от поверхности последовательно изменялась таким образом, чтобы получить заданный ряд значений $\Delta\varphi_0$. Такой результат при строгом подходе (т. е. при сохранении постоянной фазы отражения в точке зеркального отражения и угла места источника излучения) можно было бы получить, например, путем незначительных смещений центра решетки по высоте 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.

На втором этапе выполнялось вычисление углов места с использованием алгоритма корней *MUSIC*, называемого *root-MUSIC* [12]. Для исследования зависимости ошибок измерения угла места от количества пространственных выборок основная решетка, состоявшая из

156 элементов, разбивалась на K подрешеток, примыкавших друг к другу и содержащих по I элементов каждая. Каждая из подрешеток использовалась для получения одной пространственной выборки сигнала. Значения K и I (в скобках) принимались равными 9 (17); 12 (13); 17 (9) и 26 (6). Как видно, при $K = 9$ и 17 использовалось 153 элемента из 156, что практически не оказало влияния на результаты исследования. Различные комбинации значений p и M выбирались в диапазоне от 2 до $K/3 \dots K/2$, при этом выполнялось условие $p \geq M$.

При формировании пространственных выборок полагалось, что оси элементарных антенн, синтезированных на базе подрешеток, направлены под нулевым углом к горизонту. Таким образом, возможность повышения точности измерений за счет подъема осей элементарных антенн [7] в данной работе не использовалась. Весовые коэффициенты для элементов каждой из подрешеток рассчитывались с использованием функции Хэмминга, что обеспечивало уровень боковых лепестков элементарных антенн не выше -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 применения того или иного сочетания исследуемых параметров. Для оценки использовалось сравнение среднеквадратических ошибок измерения угла места, полученных путем усреднения на интервале разностей фаз между прямым и зеркальным сигналом $0 \dots 360^\circ$ (далее – ошибки).

2. Результаты исследований. Результаты исследований представлены на рис. 1 (условия сильного диффузного отражения: $\rho_s = 0,5$; $\rho_d = 0,35$) и рис. 2 (условия сильного зеркального отражения: $\rho_s = 0,93$; $\rho_d = 0,10$). На них в виде точек, соединенных отрезками прямых, представлены зависимости среднеквадратических ошибок измерения угла места от параметра p . Каждая точка соответствует одному из сочетаний параметров K , M и p . Важно отметить, что любая из точек на рис. 1 рассчитана по одной и той же совокупности реализаций поля \dot{A}_n , полученной для условий сильного диффузного отражения, а на рис. 2 – соответственно для условий сильного

зеркального отражения. Каждая линия построена при соответствующем параметре M . При этом значение M для конкретной кривой соответствует значению p в ее начальной точке: сплошные кривые относятся к $M = 2$, крупно-штриховые – к $M = 3$, мелко-штриховые – к $M = 4$ и т. д. Каждая из четырех групп зависимостей получена при соответствующем значении количества пространственных выборок K от 9 до 26, представляющих собой ряд, близкий к геометрической прогрессии с множителем полтора.

Сравнение данных, представленных на обоих рисунках, показывает: главное отличие между ними заключается в том, что в среднем ошибки при сильном зеркальном отражении значительно, до нескольких раз, меньше ошибок, полученных при диффузном отражении. Другим отличием является то, что в условиях сильного диффузного отражения увеличение количества полезных сигналов M приводит к уменьшению ошибок измерения при любом количестве выборок из числа исследуемых, а при сильном зеркальном отражении такая зависимость четко наблюдается только при $K > 12$.

В то же время наблюдается ряд общих закономерностей, которые мы рассмотрим далее.

Для случая сильного диффузного отражения при увеличении количества выборок от $K = 9$ до $K = 26$ минимальные ошибки уменьшаются от значений $0,053 \Theta_{0,5}$ до $0,012 \Theta_{0,5}$, а для случая сильного зеркального отражения – от $0,016 \Theta_{0,5}$ до $0,005 \Theta_{0,5}$. Отсюда следует, что трехкратное увеличение количества пространственных выборок на фиксированной апертуре позволило уменьшить минимальные ошибки от трех до четырех раз и более. Этот эффект более выражен в условиях сильного диффузного отражения.

Как видно, уменьшить ошибки измерения за счет увеличения размерности подпространства сигналов можно, лишь используя достаточное количество пространственных выборок сигнала. Так, минимальные ошибки можно получить, как видно из рис. 1, в, г, при $M = 5 \dots 7$ и выполнении условия: $K \approx (3-4)M$. Однако следует отметить, что существует некоторое предельное значение M , превышение которого приводит к резкому ухудшению точности. Это видно из сравнения, например, графиков, относящихся к $M = 7$ (малые ошибки) и $M = 8$ (рост ошибок) на рис. 1, в, г. Причина ухудшения точности измерений обусловлена появлением в подпространстве сигналов решений, лежащих вблизи направления на цель, и ухудшением в связи с этим вероятности правильного выбора из них того, которое соответствует цели.

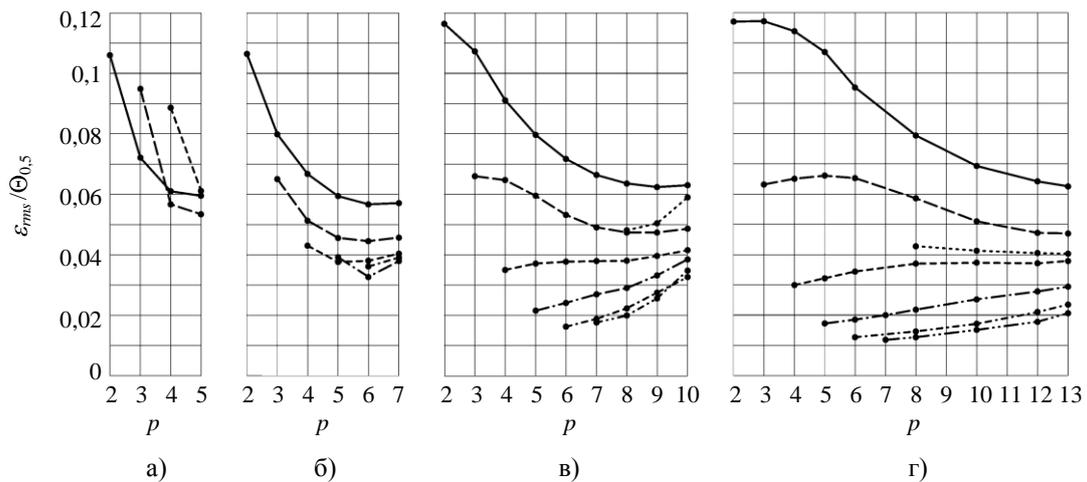


Рис. 1. Зависимости среднеквадратических ошибок измерения угла места от порядка автокорреляционной матрицы при высоком уровне диффузного отражения от поверхности моря: а) – $K = 9$; б) – $K = 12$; в) – $K = 17$; г) – $K = 26$

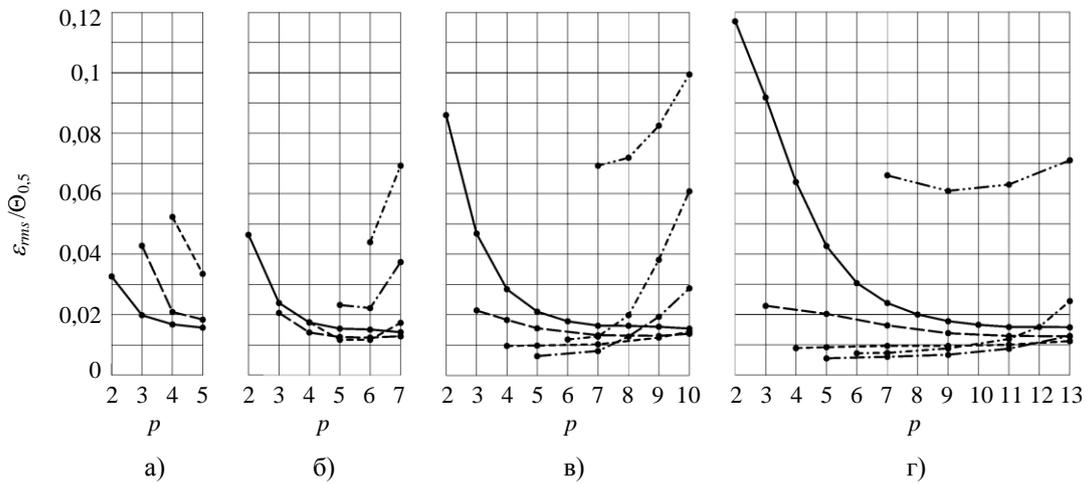


Рис. 2. Зависимости среднеквадратических ошибок измерения угла места от порядка автокорреляционной матрицы при высоком уровне зеркального отражения от поверхности моря: а) – $K = 9$; б) – $K = 12$; в) – $K = 17$; г) – $K = 26$

Для случая $M = 2$ с увеличением порядка автокорреляционной матрицы p происходит монотонное уменьшение ошибок до некоторого предельного значения. Отметим, что это значение практически не зависит от количества выборок сигнала K , а определяется только условиями распространения радиоволн над поверхностью. Так, для случая сильного диффузного отражения оно составляет около $0,06 \Theta_{0,5}$, а для сильного зеркального – около $0,015 \Theta_{0,5}$. Таким образом, для случая $M = 2$ можно ограничиться небольшим количеством пространственных выборок (в нашем случае наименьшим – девятью), так как увеличение их числа не приводит к уменьшению ошибок измерения угла места.

Как видно из приведенных рисунков, при достаточно большом количестве выборок (для сильного диффузного отражения – при $K \geq 12$, а для сильного зеркального отражения – при

$K \geq 17$) можно выбрать такое значение параметра $M > 2$, при котором ошибки измерения становятся минимальными, значительно меньше тех, которые имеют место при $M = 2$. Особенно это проявляется при сильном диффузном отражении радиоволн от поверхности моря. Так, если сравнить минимальные ошибки на рис. 1, г ($K = 26$) при различных M , то можно отметить, что при $M = 2$ они более чем в 5 раз превышают ошибки при $M = 7$. При зеркальном отражении этот эффект выражен несколько слабее, но и там отличие ошибок составляет почти 3 раза (см. рис. 2, г). Таким образом, выбирая размерность подпространства сигналов более двух, ошибки измерения углов места можно уменьшить в широком диапазоне волнений моря: ошибки принимают минимальное значение при $M = 5 \dots 7$, что существенно отличается от общепринятого $M = 2$.

Увеличение порядка автокорреляционной матрицы p приводит к уменьшению ошибок лишь при наименьших из исследуемого диапазона значений как M , так и K . Это видно на примере всех зависимостей рис. 1, а, 2, а, а также в большей или меньшей степени – при $M = 2$ и $M = 3$ на остальных графиках. С увеличением значений параметров M и K эта зависимость ослабевает и даже меняется на противоположную. Проследим этапы этой трансформации на примере рис. 1. Так, зависимости при $M \leq 3$ характеризуются уменьшением ошибок с ростом порядка матрицы; зависимость при $M = 4$ свидетельствует о слабой зависимости ошибок от порядка матрицы; при $M \geq 5$ – об увеличении ошибок с ростом p . Аналогичная ситуация наблюдается на всех рисунках, относящихся к большим значениям количества выборок по апертуре (в нашем случае при $K \geq 17$).

Отметим, что независимо от типа отражения радиоволн от подстилающей поверхности минимальные ошибки соответствуют возрастающим кривым, описанным выше. Это кривая при $M = 6$ на рис. 1, в и $M = 7$ на рис. 1, г, а также кривые при $M = 5$ на рис. 2, в, г. Отмеченное обстоятельство дает возможность ограничиться минимально возможным значением размерности матрицы для данной размерности подпространства сигналов $p = M$, получив при этом минимальные ошибки.

Выводы. Основные рекомендации по выбору параметров метода *root-MUSIC* при измерении угла места точечной цели над взволнованной поверхностью моря состоят в следующем.

Для достижения высокой точности измерений следует отказаться от традиционно используемой размерности подпространства сигналов, равной двум; увеличение размерности подпространства до значений пяти-семи и использование количества пространственных выборок сигнала, которое равно утроенному – учетверенному значению указанной размерности, позволяет повысить точность измерений в несколько раз по сравнению со случаем размерности, равной двум.

При соблюдении этих условий максимальная точность измерений достигается, когда порядок автокорреляционной матрицы сигналов совпадает с размерностью подпространства сигналов.

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. Джонсон Д. Х. Применение методов спектрального оценивания к задачам определения угловых координат источников излучения / Д. Х. Джонсон // Тр. ин-та инж. по электротехнике и электрон. – 1982. – 70, № 9. – С. 126–139.

3. Алгоритмы оценивания угловых координат источников излучений, основанные на методах спектрального анализа / В. В. Дрогалин, В. И. Меркулов, В. А. Родзивилов и др. // Зарубежная радиоэлектрон. Успехи современной радиоэлектрон. – 1998. – № 2. – С. 3–17.
4. Howell R. K. D-MUSIC, a real time algorithm for estimating the DOA of coherent sources using a single array snapshot / R. K. Howell // Proc. of IEEE Intern. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing. – Phoenix, 1999. – Vol. 5. – P. 2881–2884.
5. Hybrid Method of DOA Estimation for Low-angle Target Tracking / Xuebing Han, Hao Zhang, Huadong Meng, Xiqin Wang // Intern. Conf. on Electrical and Control Engineering (ICECE). – Wuhan, 2010. – P. 4687–4690.
6. Bosse E. Improved radar tracking using a multipath model: maximum likelihood compared with eigenvector analysis / E. Bosse, R. M. Turner, D. Brookes // Radar, Sonar and Navigation, IEE Proc. – 1994. – 141, iss. 4. – P. 213–222.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Векман П. The scattering of electromagnetic wave from rough surface / P. Beckman, A. Spizzichino. – London: Pergamon press, 1963. – 303 p.
11. Бартон Д. Справочник по радиолокационным измерениям / Д. Бартон, Г. Вард, пер. с англ. под ред. М. М. Вейсбейна. – М.: Сов. радио, 1976. – 392 с.
12. Шахтарин Б. И. Методы спектрального оценивания случайных процессов: учеб. пособие / Б. И. Шахтарин, В. А. Ковригин. – М.: Гелиос АРВ, 2005. – 248 с.

Рукопись поступила 13.11.12 г.

Yu. A. Pedenko

THE CHOICE OF ROOT-MUSIC PARAMETERS FOR RADAR MEASUREMENTS OF TARGET ELEVATION ANGLES NEAR SEA SURFACE

The method of spectral resolution *root-MUSIC* has been considered recently as one of the means to solve the problem of increasing the accuracy of measuring the elevation of low-altitude targets above rough sea. However, the traditional approach to the selection of a priori parameters of the method developed with spectral analysis does not reveal its advantage in accuracy compared to the best special methods proposed to solve this problem. This was the reason for the development of various modifications of the method. In this paper, computer simulations are used to study the method in its classical form, but with use of a priori parameters, including significantly different from those used in other studies. In particular this applies to the signals subspace. It was found that the increase the signal subspace dimension from two, due to the use of a specular reflection model, up to five-seven, improves the measurement accuracy of the elevation of low-altitude targets several times. It was found that increases in accuracy occur in any case of strong diffuse or strong specular reflection of radio waves from the sea.

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

Ю. О. Педенко

ВИБІР ПАРАМЕТРІВ МЕТОДУ *ROOT-MUSIC*
ПРИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ВИМІРЮВАННЯХ
КУТІВ МІСЦЯ ЦІЛЕЙ ПОБЛИЗУ
ПОВЕРХНІ МОРЯ

Метод високого спектрального розподілу *root-MUSIC* розглядається останнім часом як один із засобів, що дозволяють вирішити задачу підвищення точності вимірювання кута місця маловисотних цілей над схвильованим морем. Однак традиційний підхід до вибору апріорних параметрів методу, розроблений з позицій спектрального аналізу, не дозволяє виявити його переваг в точності вимірювань у порівнянні з кращим спеціальними методами, запропонованими

для вирішення розглянутої задачі. Це послужило причиною розробки різних модифікацій методу. У даній роботі за допомогою комп'ютерного моделювання виконано дослідження методу в його класичній формі, але при використанні апріорних параметрів, які в тому числі суттєво відрізняються від використовуваних в інших дослідженнях. В першу чергу це стосується розмірності підпростору сигналів. Показано, що збільшення розмірності від значення рівного двом, зумовленого використанням дзеркальної моделі відбиття радіохвиль від поверхні розділу, до п'яти-семи дозволяє підвищити точність вимірювання кута місця маловисотних цілей в кілька разів. Встановлено, що підвищення точності проявляється як при сильному дифузному, так і сильному дзеркальному відбитті радіохвиль від моря.

Ключові слова: *MUSIC*, ціль на малій висоті, вимірювання кута місця, комп'ютерне моделювання.