

ВЛИЯНИЕ МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА МЕСТА МАЛОВЫСОТНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ МЕТОДОМ *ROOT-MUSIC*

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

Оценено влияние многолучевого распространения мм и см радиоволн над морем на точность определения угла места маловысотного источника излучения методом спектрального оценивания *root-MUSIC*. Принимаемый сигнал моделировался по разработанной в последние годы методике расчета поля над неровной поверхностью при сильных затенениях, применимой вплоть до нулевых углов скольжения. Ошибки определения угла места методом *root-MUSIC* сравниваются с полученными при измерении моноимпульсным и внеосевым методами. Отмечены преимущества метода *root-MUSIC* при углах места, составляющих десятки доли ширины диаграммы направленности пеленгационной антенны. Ил. 7. Табл. 1. Библиогр.: 17 назв.

Ключевые слова: мм и см радиоволны, многолучевое распространение, измерение угла места, спектральное оценивание, *MUSIC*.

Проблема измерения угла места радиолокационных целей и излучателей над поверхностями моря и суши, когда существенное влияние оказывает многолучевое распространение радиоволн, известна по крайней мере с 1940-х гг. [1]. Результатом развития средств воздушного нападения за последние десятилетия стало появление летательных аппаратов, летящих на высотах до единиц метров. К таким, в частности, относятся многие классы противокорабельных ракет (ПКР), высота траектории которых на участке атаки составляет 3...7 м, например ПКР типов «Уран», «Москит», «Альфа» (Россия), «Exocet» (НАТО), а у некоторых, например «*Gabriel*» Mk3 (Израиль), – 1,5...4 м [2]. Соответственно, при таких же высотах должны работать и средства их уничтожения.

Одним из путей ослабления негативного влияния многолучевого распространения явилось укорочение длины радиоволн, используемых в таких системах [3, 4]. Это, во-первых, позволяет сузить диаграмму направленности антенны при приемлемых размерах ее апертуры; во-вторых, приводит к изменению структуры поля, отраженного поверхностью моря или суши: интенсивное квазизеркальное отражение разрушается неровностями поверхности раздела. Ей на смену приходит распределенное в пространстве диффузное, которое существенно слабее влияет на точность измерения направления на цель [5]. Однако результаты обширных теоретических и экспериментальных исследований по этой проблеме, проведенных в 1960–80 гг., показали, что при допустимом (с точки зрения обеспечения других тактико-технических характеристик) укорочении радиоволны не удается снизить ошибки измерения угла места до значений, существенно меньших единиц миллирадиан [6]. Они также показали, что из изучавшихся в те годы методов повышения точности

измерения угла места, использующих антенны со сплошными апертурами, рядом преимуществ с точки зрения достижения повышения точности без коренных изменений типа антенной системы обладает так называемый внеосевой метод измерения [6, 7].

Прогресс в теории обработки радиолокационных сигналов и в технике создания фазированных антенных решеток дал толчок развитию новых методов разделения (разрешения) радиолокационных отражений от близко расположенных целей и сигналов, излучаемых одновременно несколькими источниками (первичными или вторичными); достаточно полный обзор работ этого направления приведен в статьях [8, 9]. Сложность технической реализации этих методов, в особенности в мм диапазоне, которая делает их экспериментальную проверку в широком диапазоне условий весьма дорогостоящей, по-видимому, является причиной отсутствия в доступной литературе публикаций о результатах их испытаний, повышая роль моделирования их функционирования. В нашей работе описывается разработанная авторами методика и результаты моделирования работы одного из методов определения угловой высоты точечного источника излучения над поверхностью со свойствами, соответствующими морской с ветровым волнением.

Для исследования выбран метод *root-MUSIC*, имеющий согласно [9] ряд преимуществ при использовании одномерной антенной решетки. Его результаты пеленгования сравниваются с результатами, получаемыми в тех же условиях при использовании широко известных моноимпульсного и внеосевого методов измерения угла места.

1. Методика моделирования. Моделирование пеленгования над морской поверхностью состояло из следующих этапов:

– моделирование формы морской поверхности при заданной скорости ветра над ней;

– выделение вершин гребней волн, которые при выбранной для моделирования геометрии трассы (длина трассы, высоты корреспондирующих пунктов) находятся в освещенной области по отношению к обоим корреспондирующим пунктам, вычисление их кривизны и определение их координат;

– расчет для всех точек апертуры исследуемой пеленгационной антенны параметров электромагнитных волн, переизлученных каждым гребнем волны, который находится в освещенной области;

– расчет комплексной амплитуды сигнала, создаваемого всеми переизлучающими гребнями в каждом элементе апертуры приемной пеленгационной антенны;

– обработка комплексных амплитуд всех элементарных антенн, образующих антенную решетку пеленгационной антенны в соответствии с алгоритмами, реализующими методы MUSIC, моноимпульсный и внеосевой методы пеленгования.

Метод моделирования поля над поверхностью моря подробно рассмотрен в работе [10].

Здесь отметим только следующие его особенности. Во-первых, он учитывает специфику распространения мм и см радиоволн при очень малых высотах и углах скольжения, когда в переизлучении участвуют только гребни волн, находящиеся в освещенной области пространства, т. е. не затенены другими элементами поверхности. Количество таких гребней является случайным и не слишком большим, по крайней мере, с точки зрения применимости к суммарному полю центральной предельной теоремы теории вероятности. Во-вторых, при моделировании поля не используются какие-либо гипотезы о статистических свойствах суммарного поля, в частности, о присутствии в нем когерентной с излученной первичным источником составляющей. Гипотеза о присутствии такой составляющей переизлученного поля, как следует из [11], существенно влияет на статистические характеристики пеленгов.

Трассы для моделирования были выбраны протяженностью $D = 2040$ м, длина радиоволны $\lambda = 8$ мм. Высоты изотропного излучателя и центра апертуры пеленгационной антенны задавались равными друг другу, $h_T = h_{R0}$, и составляющими 5, 10, 15 и 20 м. Именно для таких геометрий трассы выполнялся поиск освещенных участков морской поверхности с ветровыми волнами, выделение переизлучающих элементов, определение их координат и радиусов кривизны. Моделировались два состояния моря: слабого

волнения (скорость ветра на высоте 10 м над поверхностью около 4...5 м/с) и умеренного (скорость ветра 6...8 м/с). В модели считалось, что этим скоростям ветра соответствуют длины волн максимумов спектра $\Lambda_m = 20$ м и $\Lambda_m = 40$ м.

Для каждой из указанных высот корреспондирующих пунктов и каждого значения длины волны Λ_m генерировалось 20 независимых двумерных (дальность–высота) реализаций формы поверхности и производилось определение координат и радиусов кривизны гребней. Статистические свойства формы модельных поверхностей подробно рассмотрены нами в работе [10]. Здесь для использования при анализе укажем только, что число переизлучающих гребней, например при длине волны максимума спектра волнения $\Lambda_m = 40$ м, лежит в среднем в пределах от 40 для $h_T = h_{R0} = 5$ м до 140 при $h_T = h_{R0} = 20$ м; «укорочение» длины Λ_m до значения 20 м приводит к росту этих значений примерно в два раза. При моделировании предполагалось, что облучающее поле имеет линейную поляризацию либо в плоскости падающей волны (условно «вертикальную»), либо ортогональную ей («горизонтальную»). Поле, переизлученное каждой вершиной волны, представлялось суммой двух цилиндрических электромагнитных волн (моделировалось, как указывалось ранее, двумерный случай): краевой волны дифракции Френеля и отраженной от цилиндрической поверхности, являющейся границей воздух–вода; их поляризация в моделируемом двумерном случае совпадает с поляризацией облучающего поля. Как и в [10], учитывалось влияние на локальные значения коэффициентов отражения и дифракции мелкомасштабных неровностей; среднее квадратическое значение высоты этих неровностей σ_h принималось равным 0 («гладкие» волны), 0,01 и 0,02 м.

Последующее моделирование поля в апертурах пеленгационных антенн поясняется рис. 1, на котором T – точечный излучатель, $h_R(n)$ – высоты центров элементарных приемных антенн эквидистантной антенной решетки, наибольшее используемое число элементарных приемных антенн $N_A = 64$. При таком выборе N_A , используемом для моделирования, разнесении этих антенн $d_A = 0,025$ м и апертуре каждой из них, равной этой же величине, наибольший моделируемый размер по высоте составляет 1,6 м; при наиболее типичных апертурных функциях ему соответствует диаграмма направленности шириной около $6,5$ мрад $\approx 0,37^\circ \approx 22'$. Угол Θ_A соответствует текущему направлению максимума диаграммы направленности синтезированной антенны (подробнее в разд. 2).

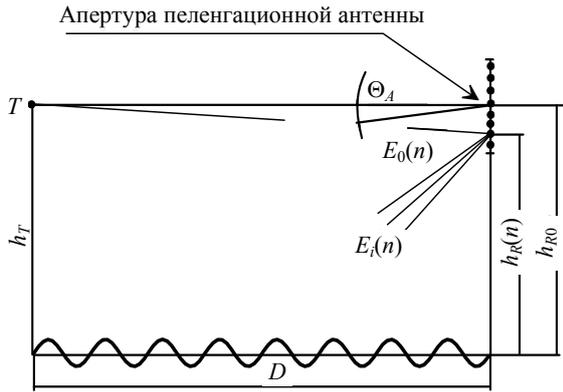


Рис. 1. Схема опыта

Считалось, что каждая из 64 элементарных антенн имеет в вертикальной плоскости диаграмму направленности формы функции Гаусса шириной около 23° по уровню половинной мощности; это соответствует размеру апертуры, равному расстоянию между соседними элементами 2,5 см на волне 8 мм и распределению поля в апертуре в соответствии с функцией Хемминга. Такой подход, во-первых, отвечает реальным конструкциям антенн этого диапазона, во-вторых, такие направленные свойства элементарных антенн позволяют существенно ослабить прием от одиночных больших гребней вблизи от пеленгатора.

В каждую точку приема приходят поля цилиндрических волн от следующих источников:

- невозмущенная волна \vec{E}_0 , поступающая непосредственно от излучателя;
- волны \vec{E}_i , переизлученные каждым из освещенных гребней с комплексными амплитудами и направлениями прихода, которые зависят от координат точек переизлучения, кривизны поверхности в них и поляризации поля, а также от координат излучателя и приемной антенны.

Расчет комплексных амплитуд учитывает механизм переизлучения каждой из волн (дифракция и отражение), влияние поляризации – методика расчета подробно описана в работе [10]. Отметим одну важную особенность ее применения в данной работе, позволяющую в десятки и сотни раз уменьшить затраты машинного времени на моделирование. Она состоит в использовании допущения, что для всех 64 точек приема, находящихся на разной высоте в пределах $\pm 0,8$ м от центра на высоте h_{R0} , координаты всех переизлучающих точек поверхности считаются неизменными, такими же, как для точки на высоте h_{R0} .

Избыточное количество точек, для которых выполняется расчет поля (64 при апертуре из 32 точек), позволяет оценивать при необходимости спектр плоских волн в месте размещения пе-

ленигационной антенны с вдвое более высоким угловым разрешением, чем у основной антенны.

2. Результаты моделирования. Первичными результатами моделирования, базой для последующих оценок характеристик пеленгования, всеми исследуемыми методами служат значения комплексных амплитуд принятых сигналов в функции номера элементарной приемной антенны n , характеризующие изменения амплитуды принимаемого сигнала по апертуре антенной решетки; примеры таких данных для случайно выбранных комплектов показаны на рис. 2.

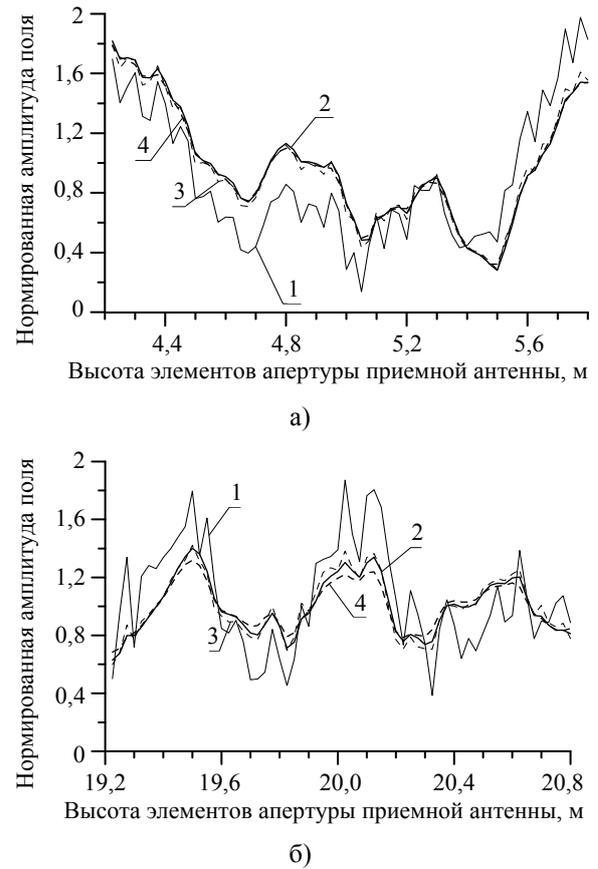


Рис. 2. Нормированная амплитуда поля в апертуре приемной антенны: а) – $h_{R0} = 5$ м; б) – $h_{R0} = 20$ м

Приведенные на нем данные относятся к $\Lambda_m = 40$ м (умеренное волнение) и двум крайним значениям высот корреспондирующих пунктов: наименьшей из исследуемых высот – высоте 5 м (рис. 2, а) и наибольшей – 20 м (рис. 2, б); для большей наглядности значения, полученные при одинаковых условиях, соединены отрезками прямых. На этих рисунках сплошные линии 1 и 2 относятся к случаю соответственно горизонтальной и вертикальной поляризации в отсутствие мелкомасштабных неоднородностей, штриховые линии 3 и 4 соответствуют тем же поляризациям, но при $\sigma_h = 0,02$ м.

Из графиков видно существование характерных для распространения над шероховатой поверхностью раздела пространственных флуктуаций амплитуды поля в функции высоты точки наблюдения. При высоте корреспондирующих пунктов 5 м высотные зависимости амплитуды поля практически совпадают для обеих поляризаций поля, а также для случаев поверхностей гладкой и с мелкомасштабными неровностями $\sigma_h = 0,02$ м. Это объясняется малыми углами скольжения облучающего поля относительно поверхности раздела в точках отражения или дифракции [1, 6]. При $h_T = h_{R0} = 20$ м углы скольжения становятся сравнимыми с углом Брюстера, а параметр шероховатости Рэлея возрастает до значений, близких к единице. Следствием этого является уменьшение глубины флуктуаций амплитуд при вертикальной поляризации и при наличии мелкомасштабных неровностей поверхности («ряби»).

Наглядно представить влияние на работу радиосистемы пространственной структуры поля над поверхностью позволяет анализ угловых спектров плоских волн [12]. Он показывает, как распределена по углам прихода в вертикальной плоскости амплитуда плоских волн, формирующих рассматриваемую зависимость комплексной амплитуды поля от высоты. Форма углового спектра с точностью до постоянного множителя совпадает с угловой зависимостью амплитуды выходного сигнала антенны в функции угла наклона максимума ее синтезированной диаграммы направленности Θ_A .

На рис. 3, 4 приведены примеры угловых спектров для тех же сочетаний параметров, что и на рис. 2 при использовании как 64-элементной антенны так и 32-элементной. На рис. 3 показан угловой спектр при количестве элементов $N_A = 64$ для высоты корреспондирующих пунктов 5 м (рис. 3, а, б) и 20 м (рис. 3, в, г). Кривая 1 показывает угловой спектр в отсутствие переизлучающей поверхности моря, т. е. фактически форму диаграммы направленности 64-элементной антенны. Кривая 2 представляет случай горизонтальной поляризации и идеально гладкой поверхности моря, т. е. когда $\sigma_h = 0$ м; кривая 3 – та же поляризация при $\sigma_h = 0,02$ м; кривая 4 – вертикальная поляризация и гладкая поверхность; кривая 5 – вертикальная поляризация при $\sigma_h = 0,02$ м. На рис. 3, б те же зависимости приведены в более крупном масштабе по оси абсцисс, стрелками на ней отмечены значения углов, соответствующих направлению на центр трассы. Рис. 3, в, г представляет такие же зависимости при высоте корреспондирующих пунктов 20 м.

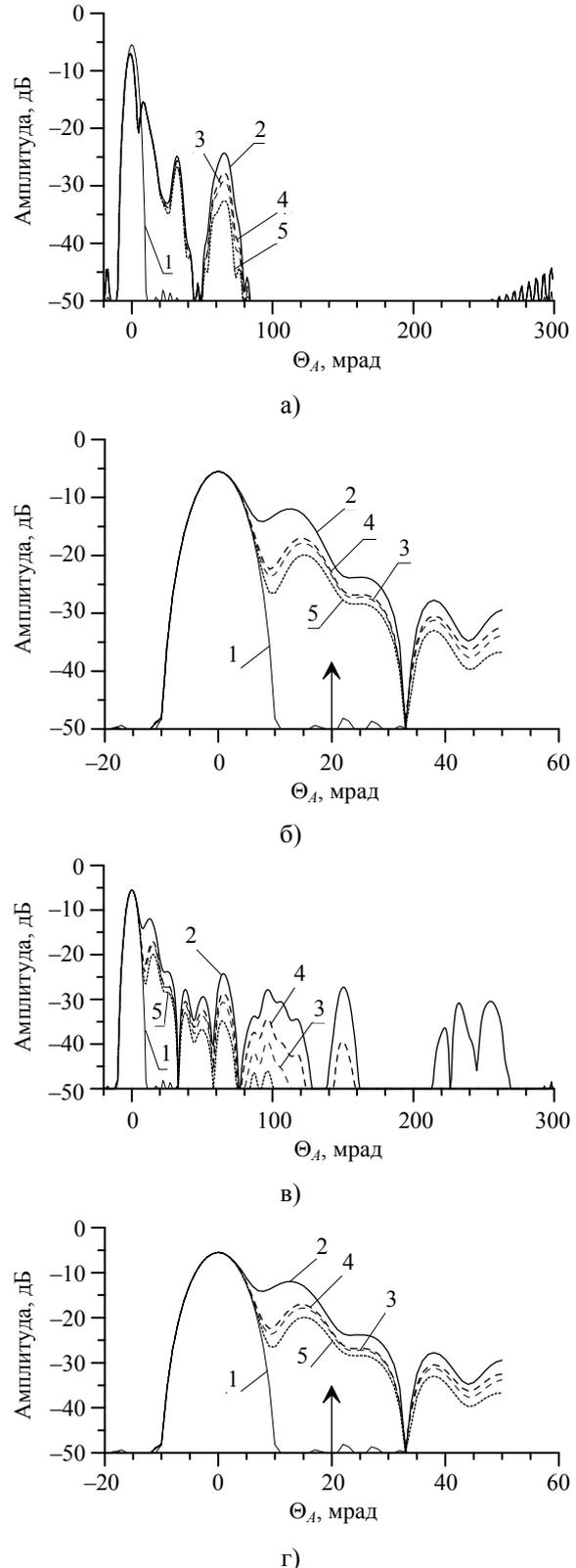


Рис. 3. Угловые спектры плоских волн для антенны из 64 элементов

Аналогичный комплект зависимостей для антенны, состоящей из 32 элементов и, соответ-

венно, имеющей вдвое худшее угловое разрешение, представлен на рис. 4. Анализ приведенных на рис. 3 и 4 зависимостей показывает следующее:

- 64-элементная антенна с апертурой 1,6 м при высоте корреспондирующих пунктов 20 м обеспечивает достаточно четкое выделение сигнала источника излучения, в то же время при 32-элементной антенне основной лепесток сливается с соседним, а максимум такого суммарного лепестка существенно смещен по отношению к направлению на излучатель.

- При высоте корреспондирующих пунктов 5 м 64-элементная антенна обеспечивает частичное выделение основного лепестка, но максимум его существенно смещен по отношению к точному направлению, 32-элементная антенна формирует сильно искаженный интерференцией лепесток.

- Сравнение угловых спектров с модельными параметрами переизлучающих гребней на морской поверхности показывает, что количество максимумов угловых спектров значительно меньше числа переизлучателей и их максимумы не соответствуют направлениям на последние, т. е. угловой спектр отображает результат интерференции многих переизлученных сигналов.

- Из формы угловых спектров хорошо видно, что поляризация и мелкомасштабные неровности наиболее сильно влияют на переизлучение участков морской поверхности, направления на которые образуют значительные углы с поверхностью; это свойство ярко проявилось на рис. 3, в, 4, в, где амплитуда переизлучения из области, соответствующей углам наблюдения 200...240 мрад (11,5...14°) уменьшилась более чем на 20 дБ.

- Из рис. 3 и 4 видно, что при рассматриваемых высотах корреспондирующих пунктов, длине трассы, длине волны и размерах апертуры антенн формирование сигнала главного лепестка углового спектра происходит в результате суммирования переизлучения практически от половины прилегающей к источнику излучения трассы, в которую входят десятки гребней волн, являющихся точечными вторичными источниками излучения. Из графиков видно, что при высоте корреспондирующих пунктов 20 м (угловая высота 10 мрад) как 64, так и 32-элементные антенны обеспечивают достаточно уверенное выделение прямой волны источника на фоне волн, переизлученных гребнями на поверхности. При высоте источника и пеленгатора 5 м (угловая высота 2,5 мрад), как показывает анализ всех модельных данных, при 64-элементной антенне примерно в 50 % случаев можно говорить о надежном наблюдении основного максимума; при 32-элементной антенне в большинстве случаев он не имеет четко выраженной границы с отражениями от поверхности.

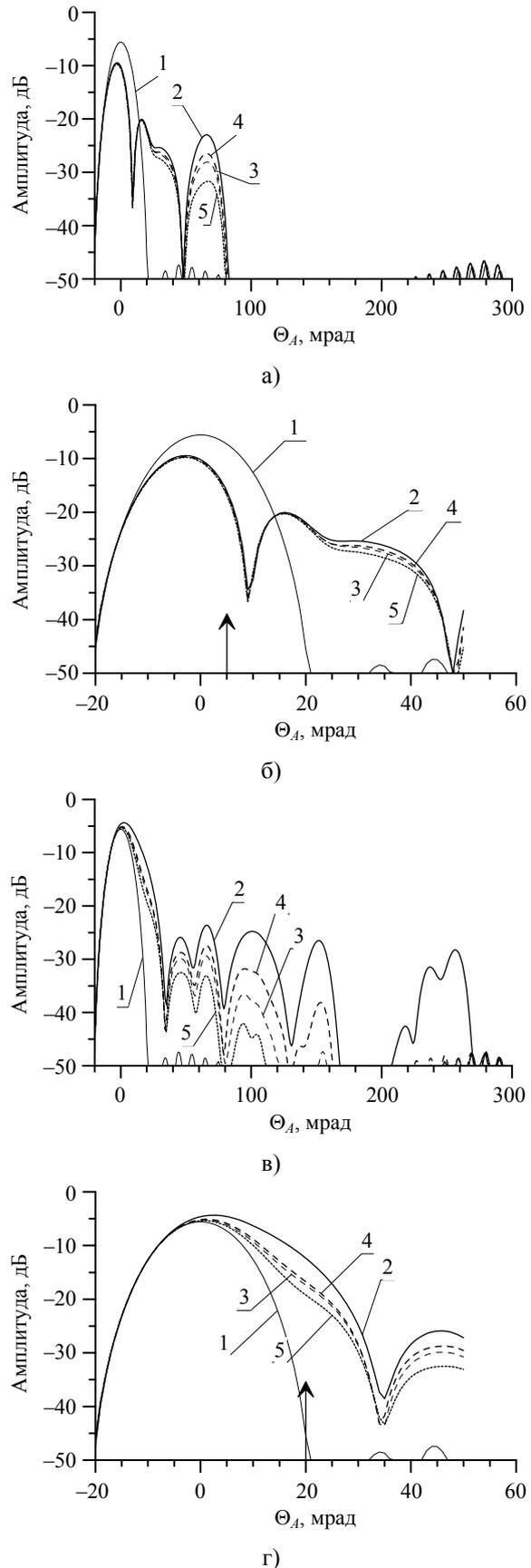


Рис. 4. Угловые спектры плоских волн для антенны из 32 элементов

Уменьшение интенсивности переизлучения поверхностью при появлении мелкомасштабных неровностей при такой высоте излучателя и пеленгатора также выражена достаточно четко.

Выбранные для моделирования параметры трассы, длина волны и размеры антенны позволяют охватить исследованиями основные представляющие практический интерес области угловых высот над поверхностью моря:

– область «умеренного» влияния многолучевого распространения, для которых угловая высота источника Θ_T над средним уровнем моря лежит в пределах $\Theta_{0,5} \geq \Theta_T \geq \frac{1}{2}\Theta_{0,5}$, где $\Theta_T = \frac{h_T}{D}$;

– область сильного влияния многолучевого распространения, для которой $\Theta_T < \frac{1}{2}\Theta_{0,5}$.

В нашем случае ширина диаграммы направленности антенны $\Theta_{0,5} \approx 13$ мрад $\approx 0,74^\circ \approx 45'$, $D = 2\,040$ м, следовательно, границе между умеренным и сильным влиянием соответствует высота около 13 м. Естественно, эта граничная высота является условной, зависящей от выбора критериев сильного и умеренного влияния и характеристик морского волнения. Таким образом, выбранные для моделирования значения высот примерно соответствуют:

– высоты 5 и 10 м – области сильного влияния многолучевого распространения;

– высоты 15 и 20 м – области умеренного влияния.

3. Результаты моделирования ошибок пеленгования. При моделировании измерений углов использовалась разновидность метода *MUSIC*, известная под названием метод корней *MUSIC* (*root-MUSIC*) [9]. При измерении углов места такой вариант является более удобной альтернативой поиску максимумов углового спектра [13] благодаря сокращению количества вычислений.

При использовании этого метода существует проблема выбора исходных параметров, влияющих в конечном итоге на точность измерений. Это относится к заданию количества пространственных выборок поля принимаемого сигнала N_S , размерности подпространства сигналов M , размера и типа автокорреляционной матрицы, составленной на основе полученных выборок сигнала. Применительно к задаче измерения углов места над шероховатой поверхностью раздела методика выбора этих параметров в опубликованной литературе отсутствует и требует специального исследования. Моделирование в данной работе проводилось при следующих сочетаниях указанных параметров: $N_S = 16$, $M = 3$, размер автокорреляционной матрицы принимаемых

сигналов – 4×4 . По предварительным исследованиям эти параметры оказались наиболее оправданными.

Использовались значения сигнала в 32 соседних элементарных антеннах, попарно суммированных для получения заданного количества ($N_S = 16$) пространственных выборок. Ширина диаграммы направленности, формируемой 32-элементной апертурой, составляет, как сказано выше, 13 мрад. Это значение используется в дальнейшем для нормировки углов места и ошибок их измерения.

Данные, приведенные ниже, получены с использованием модифицированной формы автокорреляционной матрицы [14]. Она, как показали наши исследования, обеспечивает более точные оценки углов места при различных сочетаниях исходных параметров.

Серьезной проблемой при использовании метода *MUSIC* является проблема выбора из нескольких решений M (которое заведомо существенно меньше количества реальных точечных переизлучателей) того, которое в дальнейшем считается соответствующим источникам излучения. Особенно остро эта проблема проявляется при углах места цели менее $0,5\Theta_{0,5}$, когда появляются ложные решения с углом места выше направления на излучатель. Нами предложены и опробованы три следующих варианта выбора:

– излучателю соответствует угол места, который имеет наибольшее значение из найденных;

– излучателю соответствует угол места сигнала, обладающего наибольшей мощностью;

– излучателю соответствует угол места, который наименее отличается от значения $0,5\Theta_{0,5}$.

Как показало предварительное моделирование с использованием данных поля сигналов, первые два варианта выбора удовлетворительно работают лишь при относительно больших углах места (более $0,5\Theta_{0,5}$). Аналогичные выводы были получены и в нашей работе [15], выполненной на основе модели поля [16], в основу которой были положены результаты работ Бартона [6]. Наилучшие же результаты были получены с использованием третьего способа, поэтому он и был использован при моделировании.

Результаты расчетов ошибок измерения угла места с использованием метода *root-MUSIC* иллюстрируется рис. 5, при этом рис. 5, а дает наглядное представление о разбросе значений этих ошибок. Результаты расчетов для каждой из высот источника излучения показаны в виде группы, состоящей из 6 столбиков. Каждый из них содержит результаты, полученные с использованием параметров, приведенных в таблице (нумерация столбиков в каждой группе осуществ-

вляется слева направо). В таблице использованы условные обозначения: Г – горизонтальная, В – вертикальная поляризация.

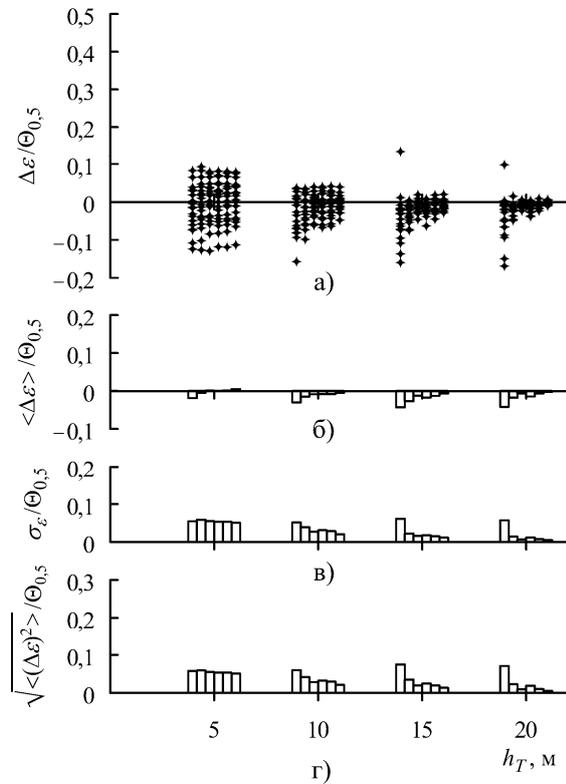


Рис. 5. Ошибки метода *root-MUSIC*: а) – разброс ошибок; б) – средние значения ошибки; в) – среднеквадратические отклонения ошибок; г) – среднеквадратические значения ошибок

Параметры моделирования

№ столбика	1	2	3	4	5	6
Поляризация	Г	Г	Г	В	В	В
$\sigma_h, \text{ м}$	0	0,01	0,02	0	0,01	0,02

Каждая точка соответствует одной реализации поверхности, а всего при каждом значении высоты использовались 20 независимых реализаций. Видно, что при всех высотах коррелирующих пунктов отдельные выбросы превышают $0,15 \Theta_{0,5}$, хотя наиболее вероятные значения лежат в существенно более узкой области. Самые неблагоприятные условия соответствуют работе на горизонтальной поляризации над гладкой поверхностью.

Представление о количественных характеристиках ошибок дают рис. 5, в, г, на которых в виде столбиковых диаграмм представлены средние значения, среднеквадратические значения и среднеквадратические значения ошибок, нормированные на $\Theta_{0,5}$. Позиции столбиков имеют тот же смысл, что и на рис. 5, а. Из рис. 5, г вид-

но, что среднеквадратические значения ошибок даже в самом неблагоприятных условиях работы не превышают $0,08 \Theta_{0,5}$, при вертикальной поляризации сигнала, высотах коррелирующих пунктов более 10 м и наличии мелкомасштабных неровностей ошибки, в основном, не превышают $0,03 \dots 0,04 \Theta_{0,5}$.

Ошибки оценивания угла места методом *root-MUSIC* сравнивались с ошибками традиционных методов, моноимпульсного и внеосевого, полученными в тех же условиях. Значения ошибок рассчитывались по тем же зависимостям сигналов от координат элементов приемной антенной решетки, что и рассмотренные ранее. В пределах 32-элементной антенны формировались две парциальные 28-элементные антенны, фазовые центры которых были смещены по высоте относительно друг друга на 7,5 см. Суммирование сигналов в каждой из этих антенн осуществлялось с параболической оконной функцией

$$f(n) = \left\{ 1 - \left[\frac{\left(n - \frac{N_A}{2} \right)^2}{\frac{N_A}{2}} \right]^{\frac{3}{2}} \right\}, n = 0 \dots 27.$$

Согласно [17] при ее использовании уровень первого бокового лепестка составляет $-24,6 \text{ дБ}$, а ширина главного лепестка по уровню -3 дБ равна $1,27 \frac{\lambda}{L_A}$, где $N_A = 28$ – число элементов антенны; L_A – вертикальный размер апертуры, в нашем случае $L_A = 0,7 \text{ м}$.

По разности фаз суммарных выходных сигналов виртуальных антенн вычислялось угловое отклонение измеренного направления на источник излучения от точного. При этом использовались два варианта ориентации максимумов их диаграмм направленности. При первом условно именуемым вариантом пеленгования оси ориентировались горизонтально, т. е. параллельно точному направлению на излучатель. При втором варианте, соответствующем внеосевому пеленгованию, максимумы отклонялись вверх на угол около 8 мрад, при котором прием сигнала излучателя в условиях свободного пространства ослаблялся примерно на 3 дБ. Это достигалось путем введения в сигналы элементов антенной решетки фазового сдвига, линейно меняющегося вдоль апертуры. В измеренное по разности фаз направление прихода волны вносилась коррекция на этот угол наклона. Результаты моделирования ошибок измерения угла места этими методами иллюстрируются рис. 6 и 7, аналогичными по способу графического представления данных рис. 5.

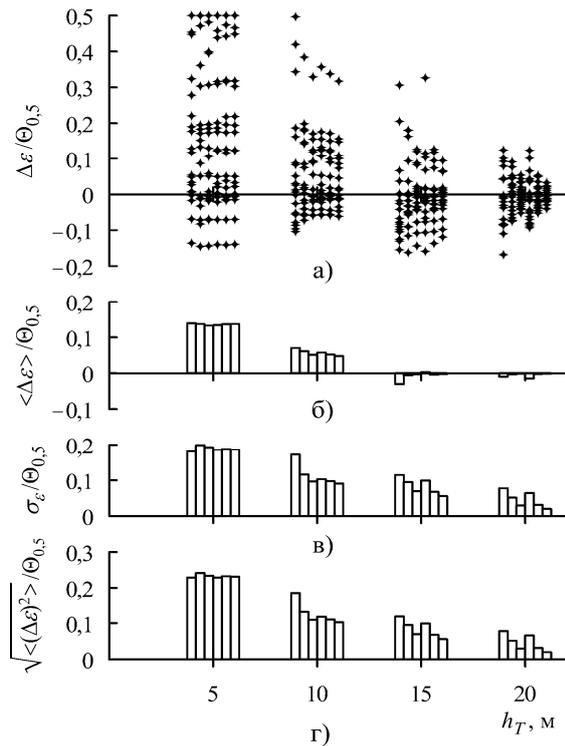


Рис. 6. Ошибки моноимпульсного метода: а) – разброс ошибок; б) – средние ошибки; в) – средноквадратические отклонения ошибок; г) – средноквадратические значения ошибок

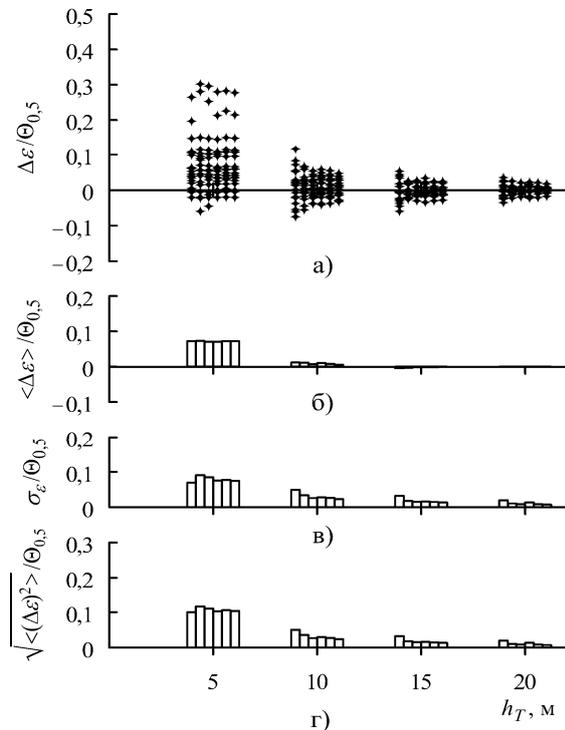


Рис. 7. Ошибки внеосевого метода: а) – разброс ошибок; б) – средние ошибки; в) – средноквадратические отклонения ошибок; г) – средноквадратические значения ошибок

На рис. 6, б–г и 7, б–г приведены столбчатые диаграммы численных значений оши-

бок, аналогичных рис. 5, б–г. Из сравнения графиков видно, что в области наиболее сильного влияния поверхности раздела измерения координат (высота корреспондирующих пунктов 5 м) метод *root-MUSIC* превосходит по точности внеосевой почти в два раза, а он, в свою очередь, примерно в два раза точнее простого моноимпульсного.

При большей высоте точности первых двух методов практически одинаковы, не считая более резкого влияния на ошибки метода *root-MUSIC* возрастания интенсивности отражений от поверхности моря при горизонтальной поляризации и в отсутствие на ней ряби.

При использовании простого моноимпульсного измерения ошибки в 2–4 раза превышают имеющие место при применении двух других, рассмотренных выше способов пеленгования.

Выводы. Приведены результаты моделирования влияния многолучевого распространения радиоволн над поверхностью моря на ошибки измерения угла места маловысотных источников излучения тремя современными методами пеленгования. При моделировании поля над поверхностью использовалась модель, которая учитывала влияние всех переизлучающих элементов поверхности и механизмы переизлучения, действующие при малых углах скольжения. Такой подход позволил отказаться от используемых при статистическом моделировании гипотезы о присутствии в переизлученном поле когерентной составляющей.

В результате расчетов установлено:

- в области сильного влияния многолучевого распространения, соответствующей угловым высотам менее полуширины диаграммы направленности пеленгационной антенны, применение метода спектрального оценивания *root-MUSIC* позволяет примерно в два раза повысить точность измерения угла места по сравнению с методом внеосевого сопровождения, который, в свою очередь, примерно в два раза точнее моноимпульсного;

- в области умеренного влияния многолучевого распространения (угловая высота излучателя более полуширины диаграммы направленности и менее удвоенного ее значения) точности двух первых методов (*root-MUSIC* и внеосевой) практически совпадают и в 3–4 раза превосходят точность простого моноимпульсного.

Полученные результаты позволяют разработчикам более полно представлять преимущества и недостатки рассмотренных методов измерения угла места маловысотных источников излучения и радиолокационных целей, сравнивая их не только по достижимой точности, но и по сложности их технической реализации.

1. Керр Д. Е. Распространение ультракоротких радиоволн / Д. Е. Керр; пер. с англ. под ред. Б. А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954. – 711 с.
2. Противокорабельные системы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www/URL: http://eng.ship.bsu.by. – Загл. с экрана.
3. Ракетно-артиллерийский комплекс «Каштан» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www/URL: http://www.pvo.guns.ru/naval/kashtan-m.htm. – Загл. с экрана.
4. Корабельный ЗРК «Кроталь» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www/URL: http://www.warships.ru/France/Wearpons/Crotale. – Загл. с экрана.
5. Разсказовский В. Б. Радиолокационное сопровождение мало-высотных целей над поверхностью моря / В. Б. Разсказовский, Ю. А. Педенко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2006. – 11, № 3. – С. 377–384.
6. Бартон Д. Радиолокационное сопровождение целей при малых углах места / Д. Бартон // Тр. Ин-та инж. по электро-технике и радиоэлектрон. – 1974. – 62, № 9. – С. 37–61.
7. Леонов А. И. Моноимпульсная радиолокация / А. И. Леонов, К. И. Фомичев. – М.: Радио и связь, 1984. – 312 с.
8. Комбинированные пеленгаторы точечных источников шумовых излучений на основе адаптивных решетчатых фильтров / Д. И. Леховицкий Д. В. Атаманский, В. В. Джус, Г. А. Жуга // II Междунар. радиоэлектрон. форум. Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития [Электронный ресурс]. – Х., 2005. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с этикетки диска.
9. Дрогалин В. В. Алгоритмы оценивания угловых координат источников излучений, основанные на методах спектрального анализа / В. В. Дрогалин, В. И. Меркулов, И. Б. Родзивилов и др. // Успехи современной радио-электрон. – 1998. – № 2. – С. 3–17.
10. Разсказовский В. Б. Эвристическая модель поля миллиметровых и сантиметровых радиоволн над взволнованной морской поверхностью при сильных затенениях / В. Б. Разсказовский, Ю. Ф. Логвинов // Радиофизика и электрон. – 2010. – 1(15), № 4. – С. 23–31.
11. Чаевский Е. В. Статистические свойства потоков энергии, создаваемых случайными источниками и системой случайных излучателей / Е. В. Чаевский // Укр. физ. журнал. – 1968. – 13, № 4. – С. 670–678.
12. Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику / С. М. Рытов. – М.: Наука, 1966. – 404 с.
13. Нечаев Ю. Б. Методы быстрого поиска максимума на пеленгационном рельефе / Ю. Б. Нечаев, С. А. Зотов // Изв. вузов. Радиоэлектрон. – 2010. – 53, № 1. – С. 20–25.
14. 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.
15. 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.
16. Разсказовский В. Б. Модель поля миллиметровых и сантиметровых волн над морем для исследования 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.
17. Скольник М. Справочник по радиолокации: в 4 т. Т. 2. Радиолокационные антенные устройства / М. Скольник; пер. с англ. под ред. К.Н. Трофимова. – М.: Сов. радио, 1977. – 406 с.

V. B. Razskazovskiy, Yu. F. Logvinov,
Yu. A. Pedenko

MULTIPATH EFFECT ON MEASUREMENT OF ELEVATION ANGLE OF LOW-LEVEL RADIATION SOURCE USING ROOT-MUSIC ALGORITHM

Influence of multipath propagation microwaves over the sea on accuracy of measurement of elevation angle of low-level radiation source by a spectral estimation *root-MUSIC* algorithm is investigated. The received signal was modeled by the design procedure of a field developed during last years over a rough surface at strong shadowing, applicable up to zero sliding angles. Errors of measurement of an elevation angle achieved by *root-MUSIC* algorithm has been compared with monopulse and off-axes technique. Advantages of method *root-MUSIC* are noted at angles equal to some tenth of the direction-finding antenna pattern width.

Key words: millimeter radio waves, multipath, elevation angle measurement, spectral estimation, *MUSIC*.

В. Б. Разсказовський, Ю. Ф. Логвинов,
Ю. О. Педенко

ВПЛИВ БАГАТОПРОМЕНЕВОГО ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ НА ВИЗНАЧЕННЯ КУТА МІСЦЯ МАЛОВИСОТНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА МЕТОДОМ *ROOT-MUSIC*

Оцінено вплив багатопроенового поширення мм і см радіохвиль над морем на точність визначення кута місця маловисотного джерела випромінювання методом спектрального оцінювання *root-MUSIC*. Сигнал, що приймається, моделювався за розробленою останніми роками методикою розрахунку поля над нерівною поверхнею при сильних затіненнях застосовною аж до нульових кутів ковзання. Помилки визначення кута місця методом *root-MUSIC* порівнюються з отриманими при вимірі моноімпульсним і позаосьовим методами. Відмічено переваги методу *root-MUSIC* при кутах місця, що становлять десятки долі ширини діаграми спрямованості пеленгаційної антени.

Ключові слова: мм та см радіохвилі, багатопрое- неве поширення, вимір кута місця, спектральне оцінювання, *MUSIC*.

Рукопись поступила 15.04.11 г.