

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ МЕСТА МАЛОВЫСОТНЫХ ЦЕЛЕЙ МНОГОЧАСТОТНОЙ МОНОИМПУЛЬСНОЙ РЛС

Ю. А. Педенко

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

Выполнено статистическое компьютерное моделирование радиолокационного измерения углов места маловысотных целей с использованием трехчастотной моноимпульсной радиолокационной станции (РЛС) в условиях многолучевого распространения радиоволн над взволнованной поверхностью моря. Отмечено, что при использовании трехчастотного варианта моноимпульсной РЛС существенно уменьшаются ошибки измерения угла места по сравнению с одночастотным вариантом, а также снижается вероятность срыва сопровождения цели. Исследована зависимость этих характеристик от разности рабочих частот. Ил. 8. Табл. 2. Библиогр.: 5 назв.

Ключевые слова: моноимпульсный метод, многочастотная РЛС, маловысотная цель, многолучевое распространение, измерение угла места, моделирование.

Известно, что радиолокационное сопровождение маловысотных целей происходит в условиях многолучевого распространения, связанного с отражением радиоволн от поверхности суши или моря. Многолучевые сигналы, поступающие на вход приемного устройства РЛС одновременно с полезным прямым сигналом от цели, приводят к ошибкам измерения координат цели, в частности, угла места, а также способствуют срыву автосопровождения цели [1, 2].

В случае зеркального характера отражений радиолокационных сигналов от гладкой поверхности величина и знак ошибки углового дискриминатора приемника РЛС зависит от фазы интерференции прямого и зеркально-отраженного сигналов.

Известно также, что в условиях диффузного отражения с увеличением разницы используемых частот наблюдается падение корреляции между принимаемыми сигналами.

Можно предположить, что эти факторы могут снизить ошибки измерения угла места при одновременной работе РЛС на нескольких частотах. Учитывая результаты работы [3], в которой, в частности, исследованы условия срыва сопровождения цели над взволнованной поверхностью моря моноимпульсной РЛС, можно ожидать, что использование многочастотного режима работы позволит уменьшить вероятность срыва сопровождения цели.

В последние годы вследствие совершенствования мощных усилителей СВЧ, предназначенных для работы в выходных каскадах передатчиков РЛС, появилась возможность работы РЛС одновременно на нескольких частотах в диапазоне до 20 % и более от центральной рабочей частоты (см., например, работу [4]). Это позволяет осуществить многочастотное измерение угла места цели на практике. Настоящая работа преследует цель оценить ожидаемые результаты использования многочастотного режима путем компью-

терного моделирования с использованием разработанной и апробированной нами методики моделирования поля над шероховатой поверхностью моря [5].

1. Методика исследований. Исследования проводились путем численного моделирования на ЭВМ, выполнявшемся в три этапа. На первом этапе вычислялись комплексные структуры поля в раскрыве вертикальной эквидистантной линейной решетки. Поля создавались имитатором цели, представляющим собой точечный изотропный многочастотный источник излучения. Для вычислений использовалась методика, описанная в работе [5]. В результате для каждого сочетания геометрических параметров трассы и неровностей поверхности раздела сред получалось достаточное большое количество реализаций поля сигналов, необходимое для обеспечения достоверности выводов об ошибках измерения угла места.

В соответствии с методикой работы [5] полный сигнал на каждом элементе приемной антенной решетки формируется путем суммирования сигнала от цели, ее зеркального и диффузных отражений. Последние представлены дискретными сигналами, поступающими от примыкающих друг к другу элементарных площадок. Эти площадки расположены в пределах «блестящей» поверхности, представляющей собой узкую вытянутую вдоль трассы дорожку. Фазовый центр каждой из элементарных площадок расположен случайно в пределах ее продольного размера, амплитуда отраженного от нее сигнала распределена по закону Релея, а фаза – равномерно на интервале $0 \dots 2\pi$. При вычислении дистанционной зависимости мощности диффузной компоненты значение бистатистического сечения рассеяния поверхности в соответствии с выводами работы [5] принималось постоянным по дистанции.

При вычислении поля сигналов использовался ряд допущений. Так, фаза отражения, амплитуда и положение фазовых центров площадок вдоль дистанции, относящиеся к текущей реализации поля, считались одинаковыми на всех рабочих частотах. Это было вызвано тем, что в рамках используемой модели поля [5] эти величины не имеют прямой функциональной зависимости от частоты сигнала. В действительности же вследствие того, что отражение от каждой из площадок является суперпозицией отражений от элементарных отражателей, расположенных в ее пределах, зависимость перечисленных величин от рабочей частоты реально существует. Следствием упомянутых допущений является факт – степень частотной декорреляции сигналов на антенной решетке при моделировании будет меньше, чем в реальных условиях. В связи с этим улучшение эффективности многочастотной РЛС по сравнению с одночастотной по результатам моделирования следует рассматривать в качестве нижнего предела такого улучшения.

В результате выполнения первого этапа создавалась база данных, содержащая реализации комплексных сигналов на вертикальной антенной решетке \dot{A}_{kn} ($k = 1, 2, \dots, K$ – порядковый номер рабочей частоты РЛС; K – количество рабочих частот; $n = 1, 2, \dots, N$ – номер элемента решетки, начиная с нижнего; N – количество элементов решетки). Для каждой задаваемой ситуации, определяемой высотой РЛС, дистанцией, углом места цели и степенью волнения моря, рассчитывалось достаточно большое количество реализаций \dot{A}_{kn} , отличающихся друг от друга только набором случайных диффузных отражений.

Количество реализаций для каждого сочетания параметров трассы составляло по 10000 для каждой из рабочих частот. Количество рабочих частот K было выбрано небольшим, равным трем, а разносы между крайними из них – 0, 4, 8, 12 и 16 % от центральной частоты, так, чтобы их можно было легко реализовать на практике.

На втором этапе моделировалось измерение угла места с использованием моноимпульсного метода в режиме автосопровождения. Суммарный и разностный сигналы вычислялись в виде

$$\dot{U}_{\Sigma(\Delta)k} = \sum_{n=1}^N \dot{A}_{kn} \dot{G}_{\Sigma(\Delta)n} \exp[j\chi_{kn} \sin \Theta_{\text{РСН}}], \quad (1)$$

где $\chi_{kn} = \frac{\pi d}{\lambda_k} (2n - N - 1)$ – фазовое смещение n -го элемента решетки относительно ее центра; d – шаг антенной решетки; $\Theta_{\text{РСН}}$ – угол места равносигнального направления (РСН) приемной

антенны; $\dot{G}_{\Sigma(\Delta)n}$ – значение апертурной функции, относящееся к n -му элементу решетки.

Вид апертурной функции задает параметры суммарной и разностной диаграмм. В нашем случае они определены следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{G}_{\Sigma n} &= \dot{G}_{pn} \cos(\chi_n \sin \Delta \Theta), \\ \dot{G}_{\Delta n} &= j \dot{G}_{pn} \sin(\chi_n \sin \Delta \Theta), \end{aligned} \quad (2)$$

где \dot{G}_{pn} – значение апертурной функции частичной диаграммы направленности, относящееся к n -му элементу решетки; $\Delta \Theta$ – отклонение частичных диаграмм в вертикальном направлении от РСН.

Следует отметить, что выражения (2) описывают суммарную и разностную диаграммы, полученные путем сложения и вычитания разнесенных по углу места симметричных частичных диаграмм, формируемых, например, зеркальной антенной, снабженной двухрупорным облучателем. Апертурная функция частичной диаграммы в нашем случае была задана в виде косинусного на пьедестале амплитудного распределения

$$\dot{G}_{pn} = G_0 + (1 - G_0) \cos \frac{\pi(2n - N - 1)}{2n}, \quad (3)$$

где G_0 – относительный к максимуму уровень облучения краев апертуры, образуемой решеткой. С целью исключения дополнительных главных лепестков синтезируемых диаграмм направленности расстояние между элементами решетки было выбрано $\lambda_0/2$, где λ_0 – длина волны на центральной частоте. При разносе между осями частичных диаграмм $2\Delta \Theta = \lambda_0/Nd$ и количестве элементов решетки $N = 156$ вертикальный размер решетки составил 2,5 м. При этом ширина суммарной диаграммы направленности по уровню половинной мощности $\Theta_{0,5}$ при $G_0 = 0,2$ равнялась 17,5 мрад ($\approx 1^\circ$), а уровень первого бокового лепестка суммарной диаграммы направленности составил –31,2 дБ.

Сигнал ошибки, используемый при измерении угла места, формировался в виде среднего значения действительной части отношения разностного сигнала к суммарному, полученного на всех длинах волн

$$\delta = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \text{Re}(\dot{U}_{\Delta k} / \dot{U}_{\Sigma k}). \quad (4)$$

Для каждой реализации поля измерение угла места осуществлялось независимо от предыдущих измерений и выполнялось следующим образом: равносигнальная ось антенны РЛС устанавливалась под углом места $0,5\Theta_{0,5}$ относительно горизонта, затем в соответствии со знаком сигнала угловой ошибки моделировалось движение оси до изменения этого знака. Угол места равносигнальной оси, при котором сигнал ошиб-

ки обращался в ноль, принимался за измеренный угол места цели.

В связи с невозможностью охвата в одной работе всего многообразия исходных условий были выбраны типичные исходные условия, имеющие место в реальной ситуации. Они приведены в табл. 1 и 2, где D – расстояние между источником излучения и антенной РЛС; h_r – высота центра антенны РЛС над поверхностью моря; β_{\max} – максимальный наклон неровностей морской поверхности при равномерном распределении наклонов; $\varepsilon_{\text{ист}}$ – угловая высота источника излучения над поверхностью раздела.

Таблица 1

Параметры трассы			
D , км	h_r , м	β_{\max} , рад	$\varepsilon_{\text{ист}}/\Theta_{0,5}$
2	12	0,05	0,2–0,5

Таблица 2

Параметры шероховатости (q) и соответствующие им коэффициенты диффузного (ρ_d) и зеркального (ρ_s) отражений

q	ρ_d/ρ_s
0,031	0,10/0,93
0,052	0,20/0,81
0,074	0,30/0,65
0,093	0,36/0,50

Параметры шероховатости, приведенные в табл. 2, вычислялись в виде

$$q = \sigma_h \sin(\psi_s / \lambda_0), \quad (5)$$

где σ_h – среднеквадратическая высота неровностей (морских волн); ψ_s – угол скольжения радиоволны в точке зеркального отражения. Длина волны λ_0 была выбрана равной 3,2 см.

Исследование ошибок проводилось в диапазоне разностей фаз между прямым и зеркальным сигналами в центре решетки $\Delta\varphi_0 = 0, 20, 40 \dots 180^\circ$, относящихся к центральной рабочей частоте. При моделировании заданные значения разности фаз при неизменных остальных параметрах задавались путем искусственного изменения фазы отражения зеркального сигнала от поверхности раздела (в действительности фаза отражения при скользящих углах распространения радиоволн близка к 180°). Требуемого результата можно было бы достичь и другими способами, например, за счет изменения высоты антенны РЛС либо рабочих частот. Однако выбранный путь способствовал упрощению процесса моделирования и интерпретации получаемых результатов. Далее, следует считать, что статистики ошибок, относящиеся к некоторой разности фаз $\Delta\varphi_0$, будут иметь место и при разности фаз $\pm\Delta\varphi_0 + 2\pi n$, где n – целое число, при сохранении значений остальных параметров.

На третьем этапе производилась статистическая обработка полученных результатов. При ее выполнении вычислялись средние значения ошибок измерения угла места и среднеквадратичное отклонение ошибок измерения угла места в зависимости от разности фаз между прямым и зеркально-отраженным сигналом для каждого из разносов рабочих частот РЛС. Были получены среднеквадратические ошибки измерения (усредненные по диапазону разностей фаз $0 \dots 2\pi$) в функции величины частотного разноса, а также законы распределения ошибок измерения угла мест цели.

2. Средние значения ошибок измерения угла места. Рассмотрим зависимости средних ошибок измерения угла места $\langle \Delta\varepsilon \rangle$ от разности фаз $\pm\Delta\varphi_0$ между прямым и зеркально-отраженным сигналом на центральной частоте. Обсуждение проведем, используя в качестве иллюстраций некоторые из полученных графиков – они представлены на рис. 1, а–4, а.

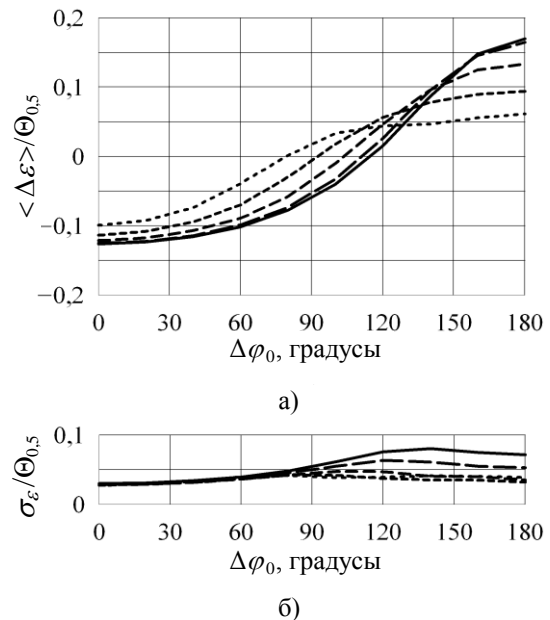


Рис. 1. Средние ошибки (а) и среднеквадратичные отклонения ошибок (б) при $\varepsilon_{\text{ист}} = 0,2\Theta_{0,5}$; $\rho_d = 0,36$; $\rho_s = 0,50$; $2\Delta f/f_0 = 0\%$ – —; 4% – - - -; 8% – - · - ·; 12% – ·····; 16% – - - - -

Первая особенность рассматриваемых зависимостей состоит в том, что при увеличении разноса частот наблюдается существенное уменьшение, до нескольких раз, абсолютных значений средних ошибок, особенно в экстремумах поля. В минимуме поля это уменьшение ярко выражено во всем диапазоне исследуемых углов места, а в максимуме – при угловой высоте более $0,3\Theta_{0,5}$.

Вторая особенность состоит в том, что с ростом разноса частот нарушается монотонная зависимость изменения средних ошибок, присущая одночастотному варианту работы РЛС, для

которого характерно изменение средних ошибок от отрицательных значений в максимуме поля к положительным – в минимуме. Более того, при некоторых достаточно больших частотных разностях средняя ошибка в экстремумах поля может изменить знак на противоположный по сравнению с одночастотным вариантом. Это происходит за счет сигналов боковых частот, на которых фаза интерференции меняется на противоположную относительно центральной частоты.

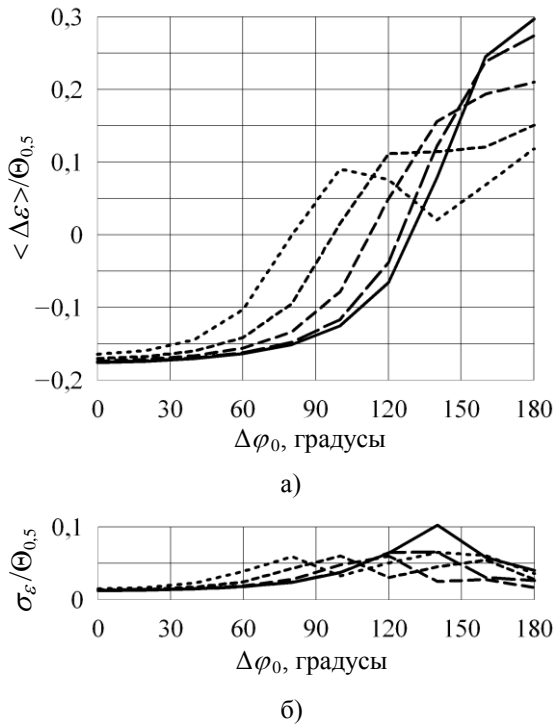


Рис. 2. Средние ошибки (а) и средноквадратичные отклонения ошибок (б) при $\varepsilon_{\text{нет}} = 0,2\Theta_{0,5}$; $\rho_d = 0,20$; $\rho_s = 0,81$; обозначения кривых, как на рис. 1

Для каждого сочетания геометрических параметров трассы можно выбрать такой разнос частот, при котором кривая средних ошибок будет расположена вблизи нулевых значений во всем диапазоне разностей фаз $\pm \Delta \varphi_0$. Как показал анализ полученных данных, наименьшие средние ошибки при работе на трех частотах реализуются, если отличие разностей фаз между прямым и зеркальным сигналом на соседних частотах составляет около $2\pi/3$. Разнос соседних частот должен при этом отвечать условию

$$\Delta f \approx \frac{Dc}{6h_r h_t}, \quad (6)$$

действительному при $h_r, h_t \ll D \ll a_3$, где h_r, h_t – соответственно высоты антенны РЛС и цели; D – расстояние между РЛС и целью; c – скорость света; a_3 – эквивалентный радиус Земли. В частности, данные, представленные на рис. 3 и 4, по-

лученные при угле места $0,4\Theta_{0,5}$ и разное $2\Delta f/f_0 = 12\%$, практически соответствуют условию (6), которое для данной геометрии трассы дает значение 12,6 %.

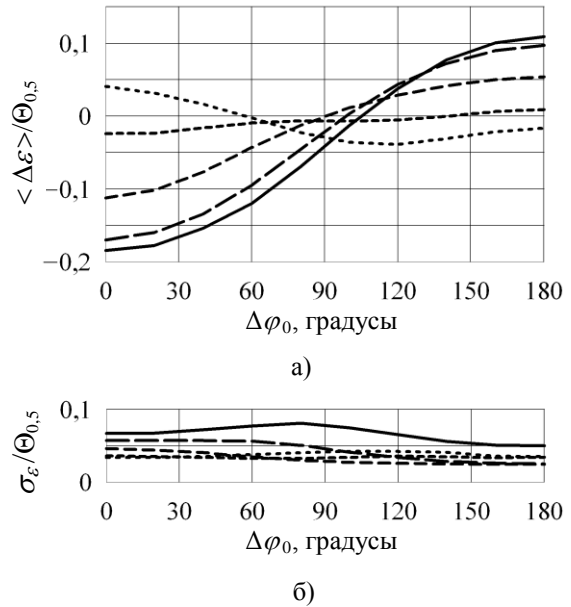


Рис. 3. Средние ошибки (а) и средноквадратичные отклонения ошибок (б) при $\varepsilon_{\text{нет}} = 0,4\Theta_{0,5}$; $\rho_d = 0,36$; $\rho_s = 0,50$; обозначения кривых, как на рис. 1

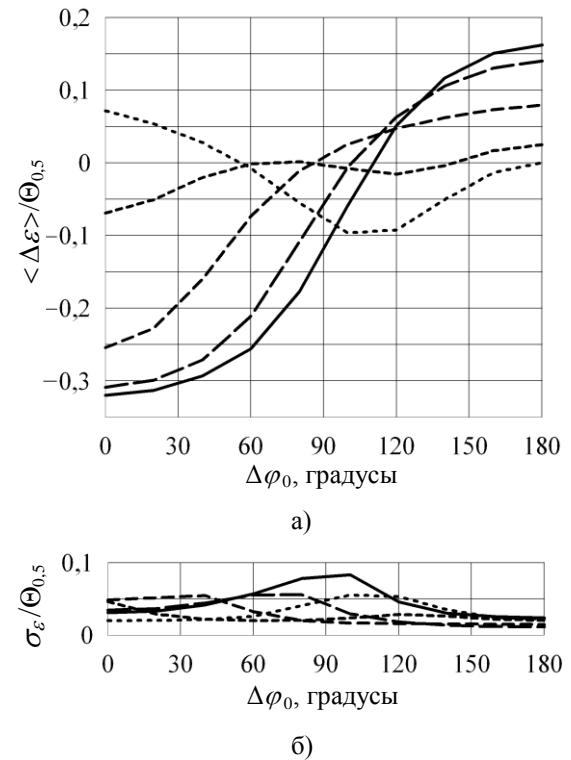


Рис. 4. Средние ошибки (а) и средноквадратичные отклонения ошибок (б) при $\varepsilon_{\text{нет}} = 0,4\Theta_{0,5}$; $\rho_d = 0,20$; $\rho_s = 0,81$; обозначения кривых, как на рис. 1

При угле места цели $0,5\Theta_{0,5}$ наименьшие средние ошибки получились при значении частотного разноса, лежащего между 8 и 12 %, что хорошо согласуется с величиной 10,0 %, рассчитанной с помощью (6).

3. Среднеквадратичные отклонения ошибок измерения угла места цели. Что касается флуктуаций ошибок измерения угла места цели, то здесь также наблюдается их уменьшение при переходе в многочастотный режим измерений. Степень этого уменьшения зависит как от угла места цели, так и от уровня зеркального отражения, разности фаз между прямым и зеркальным отражением и, естественно, от частотного разноса. Особенности флуктуаций ошибок измерения угла места можно наблюдать на рис. 1, б – 4, б.

Наиболее сильно уменьшаются флуктуации ошибок при многочастотных измерениях с разрушением зеркального отражения и увеличением угла места цели. Так, при угле места $0,5\Theta_{0,5}$ и коэффициенте зеркального отражения 0,5 достигается уменьшение флуктуаций до двух и более раз во всем диапазоне разностей фаз уже при частотном разносе 4 %. Дальнейшее увеличение разноса практически не приводит уменьшению флуктуаций. С другой стороны, уменьшение флуктуаций ошибок до двух раз при угле места $0,2\Theta_{0,5}$ и том же коэффициенте зеркального отражения происходит лишь на участке разностей фаз $90 \dots 180^\circ$. При этом необходим частотный разнос не менее 8 % (см. рис. 1, б).

Что касается больших уровней зеркального отражения, то здесь следует отметить следующее. Как отмечалось в публикации [3], рассматриваемые зависимости при одночастотной работе существенно неравномерны по диапазону разностей фаз между прямым и зеркальным сигналами, особенно при малых углах места. Это проявляется в наличии ярко выраженного максимума, расположенного вне области экстремумов поля. В максимуме поля флуктуации ошибок превышают в несколько раз значения, лежащие в остальной области разности фаз. Это, например, видно на рис. 2, б и 4, б, где данные при одночастотной работе представлены сплошной кривой.

Переход в многочастотный режим при больших коэффициентах зеркального отражения практически не уменьшает указанную неравномерность. Наблюдается некоторое уменьшение максимумов и смещение их по оси разностей фаз, а также появление новых максимумов.

4. Среднеквадратические ошибки. Наиболее общее представление об эффективности многочастотного режима работы получить, используя для анализа зависимости среднеквадратических ошибок от разноса частот, получен-

ных путем усреднения на интервале разностей между прямым и зеркальным сигналами $0 \dots 2\pi$

$$\varepsilon_{\text{скв}} = \sqrt{\frac{2 \sum_{m=0}^M \varepsilon_m^2 - \varepsilon_0^2 - \varepsilon_M^2}{2M}}, \quad (7)$$

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

Рассматриваемые зависимости представлены на рис. 5. Каждый из четырех приведенных графиков получен при соответствующем угле места источника излучения от $0,2$ до $0,5\Theta_{0,5}$ и содержит по четыре кривых, относящихся к различным степеням неровности подстилающей поверхности.

Как видно из графиков, измерение угла места с использованием трех частот позволяет уменьшить ошибки измерения. Степень уменьшения зависит как от неровности поверхности раздела, так и от угла места цели. Наиболее существенное уменьшение ошибок при углах места цели более $0,3\Theta_{0,5}$, где оно достигает 2...3 и более раз.

Анализ результатов моделирования показал, что минимальные среднеквадратические ошибки измерения угла места получаются при таких разносах частот, при которых имеют место и минимальные средние ошибки, т. е. при выполнении условия (6).

5. Законы распределения ошибок измерения угла места. Анализ гистограмм распределения ошибок показывает, что законы распределения ошибок как при одночастотной, так и при многочастотной работе описываются одним из двух типов. Первый тип – это симметричное распределение, близкое в энергичной области к нормальному, но отличающееся от последнего отсутствием боковых «хвостов». Второй тип – несимметричное распределение, характеризующееся наличием пологого левого ската и левостороннего «хвоста», простирающегося по оси ошибок на интервале, близком по значению к удвоенному углу места цели. Пример распределения второго типа приведен на рис. 6.

Тип распределения связан с фазой интерференции прямого и зеркального сигналов, поступающих от цели. В случае одночастотной работы распределения первого типа соответствуют минимуму и максимуму поля. Распределения второго типа при этом соответствуют некоторой промежуточной фазе интерференции поля в центре антенной системы: при малых углах места это происходит ближе к минимуму поля, при увеличении угла места эта область смещается к максимуму поля.

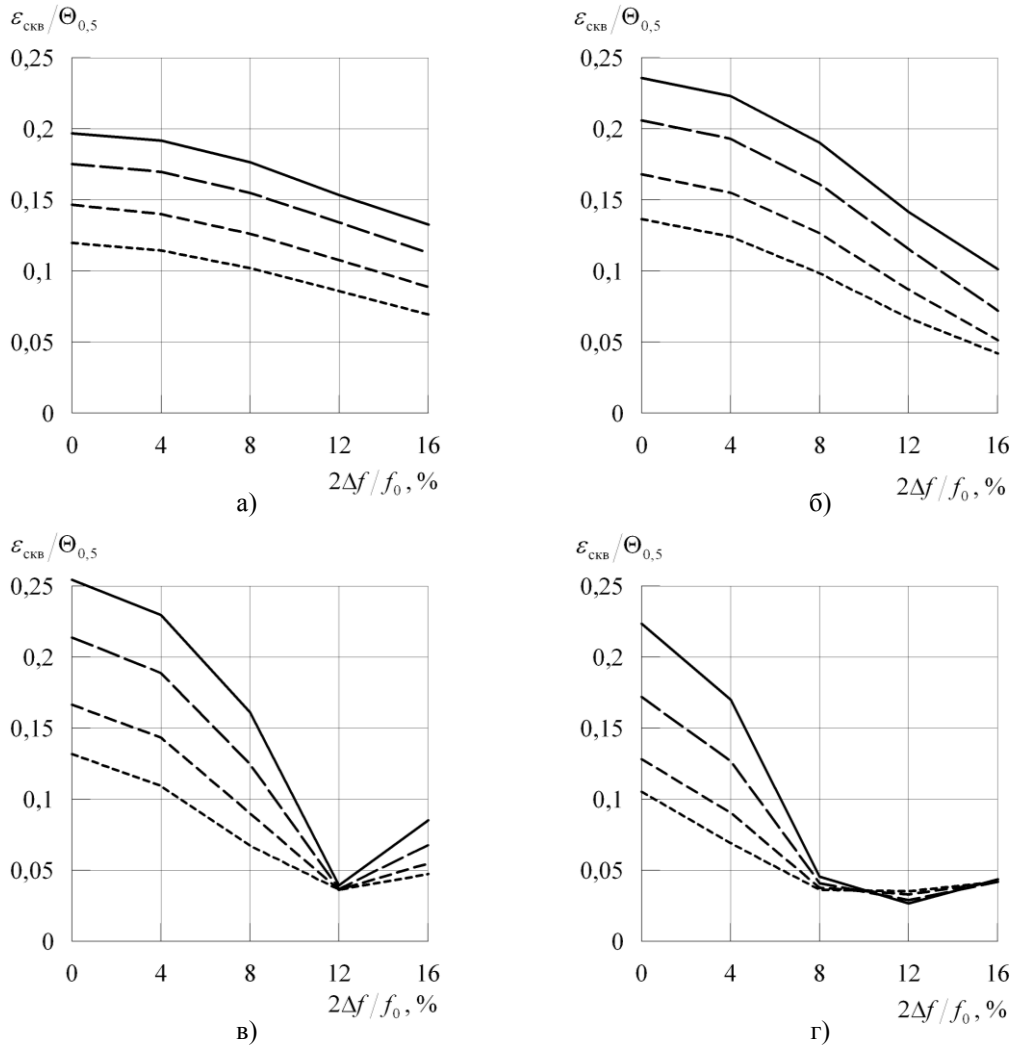


Рис. 5. Среднеквадратические ошибки измерения угла места: а) – $\varepsilon_{\text{ист}} = 0,2\Theta_{0,5}$; б) – $\varepsilon_{\text{ист}} = 0,3\Theta_{0,5}$; в) – $\varepsilon_{\text{ист}} = 0,4\Theta_{0,5}$; г) – $\varepsilon_{\text{ист}} = 0,5\Theta_{0,5}$; $\rho_d/\rho_s = 0,10/0,93$ – —; $0,20/0,81$ – - -; $0,30/0,65$ – - - -; $0,36/0,5$ – - - - -

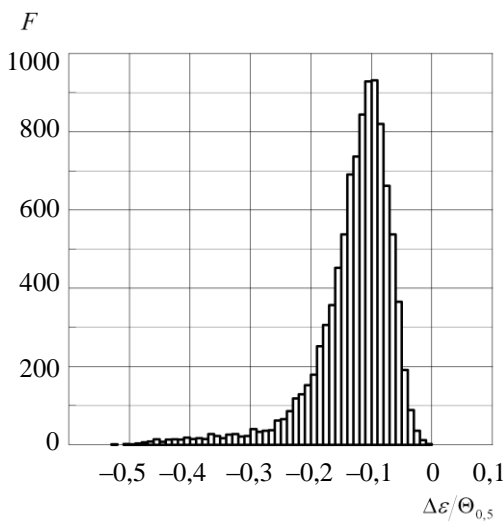


Рис. 6. Гистограмма распределения ошибок измерения угла места второго типа: $\varepsilon_{\text{ист}} = 0,3\Theta_{0,5}$; $\rho_d = 0,10$; $\rho_s = 0,93$; $\Delta\varphi_0 = 120^\circ$

С целью анализа законов распределения ошибок рассмотрим полученные при моделировании угломестные зависимости сигналов ошибок углового дискриминатора, полученные, в частности, для случая: $\varepsilon_{\text{ист}} = 0,3\Theta_{0,5}$; $\rho_d = 0,10$; $\rho_s = 0,93$; $\Delta\varphi_0 = 120^\circ$. Эти зависимости получены как на центральной частоте (рис. 7, б), так и на боковых частотах (рис. 7, а, в). На рис. 7, г приведены усредненные по трем частотам зависимости, использованные при измерении угла места.

На каждом из упомянутых графиков приведено по 100 случайных реализаций. Если бы мы выполняли измерение на одной частоте, то для случая рис. 7, а, в получили бы распределение первого типа, а для случая рис. 7, б – второго. При работе в многочастотном режиме (случай на рис. 7, г) распределение ошибок соответствует второму типу (гистограмма на рис. 6 соответствует условиям рис. 7, г).

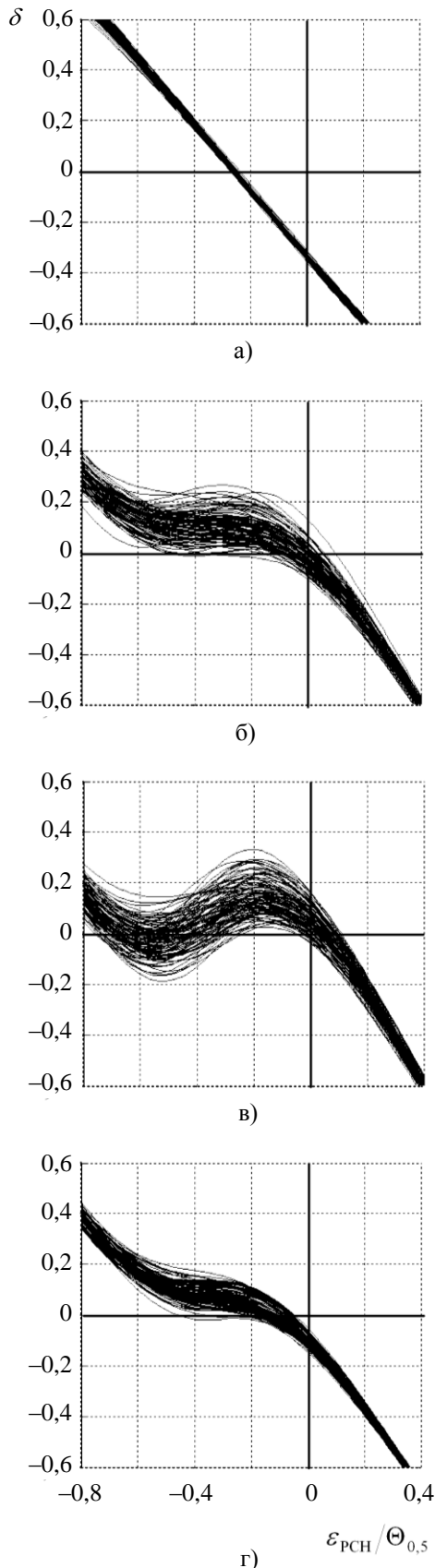


Рис. 7. Угломестные зависимости сигнала углового дискриминатора: а) $-f = 0,93 f_0$; б) $-f = f_0$; в) $-f = 1,08 f_0$; г) – зависимость, усредненная по трем частотам

Таким образом, закон распределения ошибок измерения угла места зависит от крутизны угломестной зависимости сигнала углового дискриминатора вблизи ее нулевых значений. При большой крутизне (рис. 7, а, в) получаем распределение первого типа, а при малой (рис. 7, б, г) – второго.

При распределениях второго типа флуктуационная составляющая ошибки измерения угла места превышает ту же, относящуюся к распределениям первого типа.

При работе РЛС в режиме автосопровождения цели важной характеристикой является вероятность потери цели. Условимся, что потеря цели соответствует ситуации, при которой измеренное значение угла места указывает на точку, лежащую под поверхностью раздела под истинной целью. Используя распределения ошибок, полученные для всего диапазона разностей фаз между прямым и зеркальным сигналами, можно вычислить усредненную вероятность потери цели

$$P = \frac{2 \sum_{m=0}^M P_m - P_0 - P_M}{2M}, \quad (8)$$

где P_m – вероятность того, что при данной разности фаз между прямым и зеркальным сигналами ошибка измерения угла места отвечает условию $\Delta \varepsilon \leq -\varepsilon_{\text{ист}}$. Полученные результаты представлены на рис. 8.

Как видно из приведенных рисунков, наиболее остро проблема потери цели проявляется при малых углах места и больших уровнях зеркального отражения от поверхности раздела. В то же время использование многочастотного режима работы именно в области малых углов дает устойчивое снижение вероятности потери цели с увеличением разнеса частот. Улучшение этой характеристики достигает 2...3 раз при относительных разнесах между крайними частотами 12 %.

Выводы. С использованием разработанной ранее модели поля многолучевого сигнала над взволнованной морской поверхностью выполнено статистическое компьютерное моделирование моноимпульсного метода измерения угла места маловысотных целей с использованием суммарно-разностной амплитудной РЛС. Особенность измерений состояла в том, что измерения осуществлялись с одновременным использованием трех эквидистантно разнесенных рабочих частот, а формирование сигнала ошибки – путем усреднения сигналов ошибок на этих частотах.

Установлено, что переход от одночастотного режима работы моноимпульсной амплитудной суммарно-разностной РЛС к работе на трех частотах позволяет существенно, до 2...5 раз, уменьшить среднеквадратические ошибки изме-

рения угла места маловысотных целей при углах места последних $0,3 \dots 0,5 \Theta_{0,5}$.

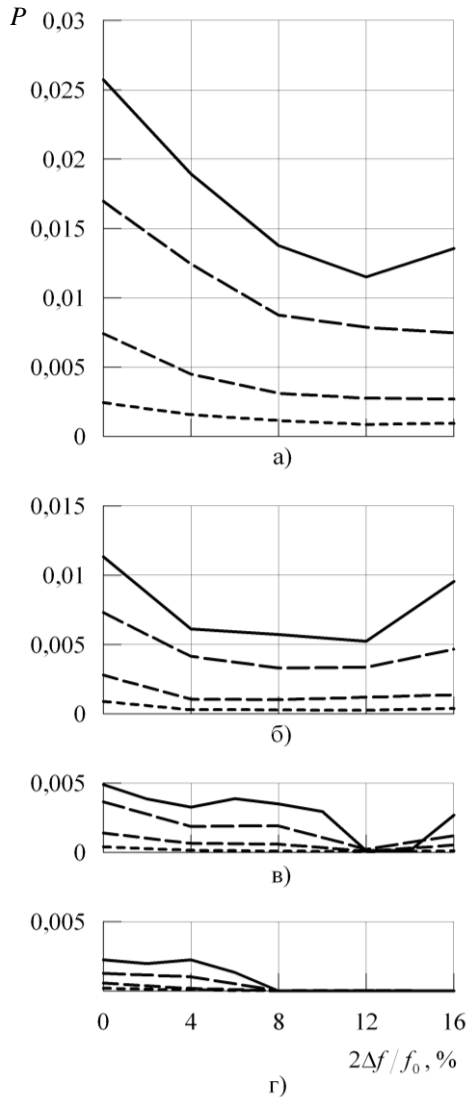


Рис. 8. Вероятность потери цели: а) – $\varepsilon_{\text{ист}} = 0,2\Theta_{0,5}$; б) – $\varepsilon_{\text{ист}} = 0,3\Theta_{0,5}$; в) – $\varepsilon_{\text{ист}} = 0,4\Theta_{0,5}$; г) – $\varepsilon_{\text{ист}} = 0,5\Theta_{0,5}$; условные обозначения кривых, как на рис. 5

Многочастотный режим позволяет также снизить вероятность потери цели. Это улучшение достигает 2...3 раз в наиболее неблагоприятных случаях, относящихся к предельно малым углам места цели.

Следует отметить, что указанные положительные результаты могут быть реализованы на практике, так как разносы частот, требуемые для этого, не превышают предельных, освоенных современной техникой СВЧ.

1. Бартон Д. Радиолокационное сопровождение целей при малых углах места // Тр. Ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектрон. – 1974. – 62, № 6. – С. 37–61.
2. Dax P. R. Keep track of than low-flying attack // Microwaves. – 1976. – 15, April. – P. 36–53.
3. Разказовский В. Б., Педенко Ю. А. Радиолокационное сопровождение маловысотных целей над поверхностью моря // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2006. – 11, № 3. – С. 377–384.
4. De Nek A. P., Hunneman P. A. H. Small sized high-gain PHEMT high-power amplifiers for X-BAND applications // Proc. Gallium Arsenide applications symposium. GAAS 2000. – Paris, 2000. – P. 221–223.
5. Разказовский В. Б., Педенко Ю. А. Модель поля миллиметровых и сантиметровых волн над морем для исследования методов измерения углов места низколетящих целей // Радиофизика и электроника. – Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2003. – 8, № 1. – С. 22–23.

MODELLING OF ELEVATION ANGLES MEASUREMENT OF LOW-ALTITUDE TARGETS BY MULTIFREQUENCY MONOPULSE RADAR

Yu. A. Pedenko

The computer simulation of measuring elevation angles of low-level targets has been carried out by means of three-frequency monopulse radar above the rough sea under multipath conditions. It is shown that the use of three-frequency monopulse radar substantially decreases errors of elevation angles measurement in comparison with single-frequency version. The use of three-frequency monopulse radar also reduces the possibility of tracking loss. The dependence of these characteristics on frequency spacing has been investigated.

Key words: monopulse radar, multifrequency radar, the low-altitude target, multipath, measurement of an elevation angle, computer simulation technique.

МОДЕЛЮВАННЯ ВИМІРУ КУТІВ МІСЦЯ МАЛОВИСОТНИХ ЦІЛЕЙ БАГАТОЧАСТОТНОЇ МОНОІМПУЛЬСНОЇ РЛС

Ю. А. Педенко

Виконано статистичне комп'ютерне моделювання радіолокаційного виміру кутів місця маловисотних цілей з використанням трьохчастотної моноімпульсної радіолокаційної станції (РЛС) в умовах багатопроменевого поширення радіохвиль над схвильованою поверхнею моря. Відзначено, що при використанні трьохчастотного варіанта моноімпульсної РЛС істотно зменшуються похибки виміру кута місця в порівнянні з одночастотним варіантом, а також знижується ймовірність зриву супроводу цілі. Досліджено залежність цих характеристик від розносу робочих частот.

Ключові слова: моноімпульсний метод, багаточастотна РЛС, маловисотна ціль, багатопроменеве поширення, вимір кута місця, моделювання.

Рукопись поступила 5 декабря 2008 г.