

УДК 621.396.96

Е. А. Покровская

РАБОТА ИЗМЕРИТЕЛЯ ВЫСОТЫ НИЗКОЛЕТЯЩЕЙ ЦЕЛИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ОТРАЖЕНИЙ ОТ ВЗВОЛНОВАННОЙ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Определено влияние зеркальной и диффузной составляющих отраженного от подстилающей поверхности сигнала на точность измерения угловых координат низколетящей цели. В суммарной и разностной диаграммах направленности предлагается синтезировать нули в направлении на область диффузного отражения в районе радиогоризонта, где увеличивается ошибка сопровождения.

На погрешность пеленгования, определяющую точность измерения угловых координат цели, влияет среда распространения радиоволн. Источник угловых погрешностей — подстилающая поверхность, приводящая к многолучевому распространению радиоволн. Наиболее сильное помеховое действие отраженных сигналов проявляется при радиолокационном сопровождении низколетящей цели (НЛЦ). Структура отраженных от подстилающей поверхности сигналов достаточно сложная. В зависимости от шероховатости отражающей поверхности и угла скольжения радиоволн в ней могут преобладать зеркальные или диффузные составляющие.

В настоящее время известно достаточно большое число методов, с помощью которых можно измерять угловые координаты НЛЦ [1, 2]. Эти методы позволяют устранить или учесть влияние зеркальной составляющей сигнала, отраженного от подстилающей поверхности. При этом влияние диффузной составляющей устраняется сглаживанием в контуре сопровождения следящего измерителя.

В настоящей работе рассмотрена математическая модель измерителя угловых координат НЛЦ, основанная на методе максимального правдоподобия; зеркальная составляющая отраженного сигнала используется как несущая полезную информацию; влияние диффузного отражения устраняется вследствие установки нулей в суммарной и разностной диаграммах направленности (ДН); определены количественные характеристики с учетом отражения радиоволн от взволнованной морской поверхности; описан принцип синтеза нулей в суммарной и разностной ДН; определена область применения метода формирования нуля в направлении на источник помехи; исследовано пове-

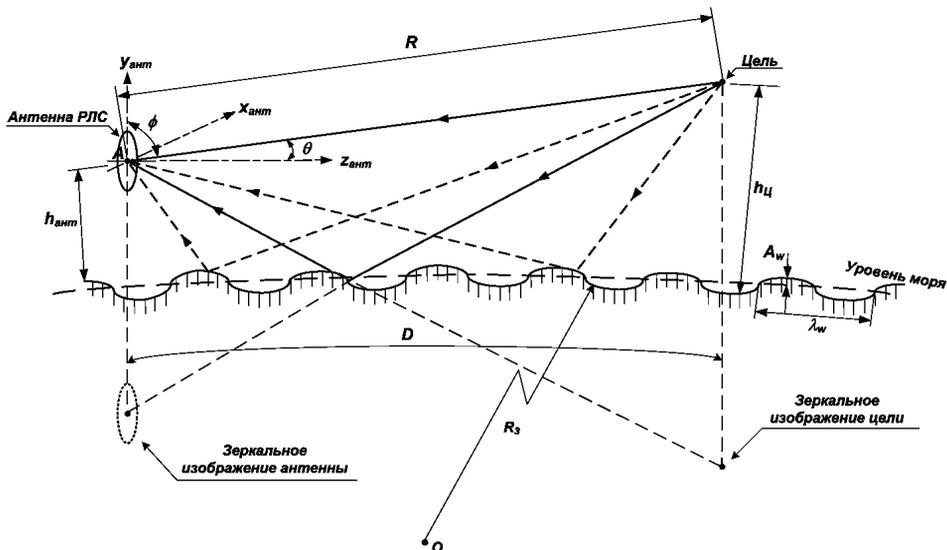


Рис. 1. Геометрическая схема задачи отражения от взволнованной поверхности

дение функции правдоподобия (ФП) в зависимости от уровня диффузного отражения, при котором нарушается чисто зеркальный характер отражения.

Модель отражения радиоволн от морской поверхности. Для моделирования работы измерителя угловых координат НЛЦ и оценки угломестной координаты необходимо рассмотреть модель среды распространения радиоволн. Такая модель должна учитывать эффекты, которые возникают при отражении радиоволн от взволнованной морской поверхности.

В модели в точке приема A (рис. 1) определяется комплексная амплитуда сигнала, приходящего от цели. Морская поверхность представляется в виде синусоиды [3] длиной волны λ_w и амплитудой A_w на сферической поверхности радиусом, равным эффективному радиусу Земли R_3 .

Комплексную амплитуду сигнала в точке A можно записать как

$$S = S_{\text{пр}} + S_{\text{отр}},$$

где $S_{\text{пр}}$ — комплексная амплитуда сигнала, приходящего по прямому пути под углом места θ , $S_{\text{пр}} = e^{-jkR}$ (k — волновое число; R — расстояние между точкой приема A и целью); $S_{\text{отр}}$ — комплексная амплитуда сигнала, отраженного от поверхности моря.

Значение $S_{\text{отр}}$ в модели рассчитывается по методу физической оптики [4]. Морская поверхность разбивается на элементарные площадки, из которых каждая рассматривается как элемент Гюйгенса. Предполагается, что цель излучает сигнал во всех направлениях. Полное поле в точке приема A находится суммированием полей, создаваемых отдельными элементами. Согласно этому принципу, можно

записать следующий интеграл:

$$A_{\text{отр}} = \int_l \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} dl.$$

Под знаком интеграла первый множитель определяет поле волны единичной амплитуды, падающей на элементарный участок dl , расположенный на расстоянии r_2 от цели. Второй множитель определяет поле отраженной от участка dl волны в точке приема (точка A).

В приведенной формуле обозначено

$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{(R_3 + h_{\text{ант}})^2 + (R_3 + x)^2 - 2(R_3 + h_{\text{ант}})(R_3 + x) \cos \alpha_1}; \\ r_2 = \sqrt{(R_3 + h_{\text{ц}})^2 + (R_3 + x)^2 - 2(R_3 + h_{\text{ант}})(R_3 + x) \cos \alpha_2}, \end{cases}$$

где x — высота морской волны; $x = A_W \sin(kl)$.

Используя равенство

$$e^{-j\xi \sin \theta} = \sum_n J_n(\xi) e^{jn\xi}$$

и ряд упрощений, получаем следующее выражение для векторного потенциала отраженного поля:

$$A_{\text{отр}} = \sum_n \int_l \frac{J_n(-k\chi A_W)}{R_1 R_2} e^{j(-k(R_1+R_2)+nkl)} dl,$$

$$\text{где } \chi = \frac{R_3 - (R_3 + h_{\text{ант}}) \cos \alpha_1}{R_1} + \frac{R_3 - (R_3 + h_{\text{ц}}) \cos \alpha_2}{R_2}.$$

Значение интеграла под знаком суммы определяется методом стационарной фазы [3]. Точка стационарной фазы определяется из уравнения

$$-k(R_1 + R_2) + nkl = 0.$$

Используя этот метод, поле отраженной от морской поверхности электромагнитной волны в точке A можно описать следующим выражением:

$$A_{\text{отр}} = \sum_n \frac{J_n(-k\chi(l_s) A_W)}{R_1(l_s) R_2(l_s) \sqrt{|-k(R_1''(l_s) + R_2''(l_s))|}} e^{j(-k(R_1(l_s) + R_2(l_s)) + nkl_s)}.$$

Это выражение показывает, что отраженный от морской поверхности сигнал состоит из суммы сигналов, которые отражаются от точек морской поверхности (точек стационарной фазы). Сигнал, соответствующий $n = 0$, является зеркально отраженным, а остальные представляют собой сигналы диффузного отражения.

На рис. 2 приведены пространственные спектры сигналов, показывающие распределение мощности полного поля в точке приема в

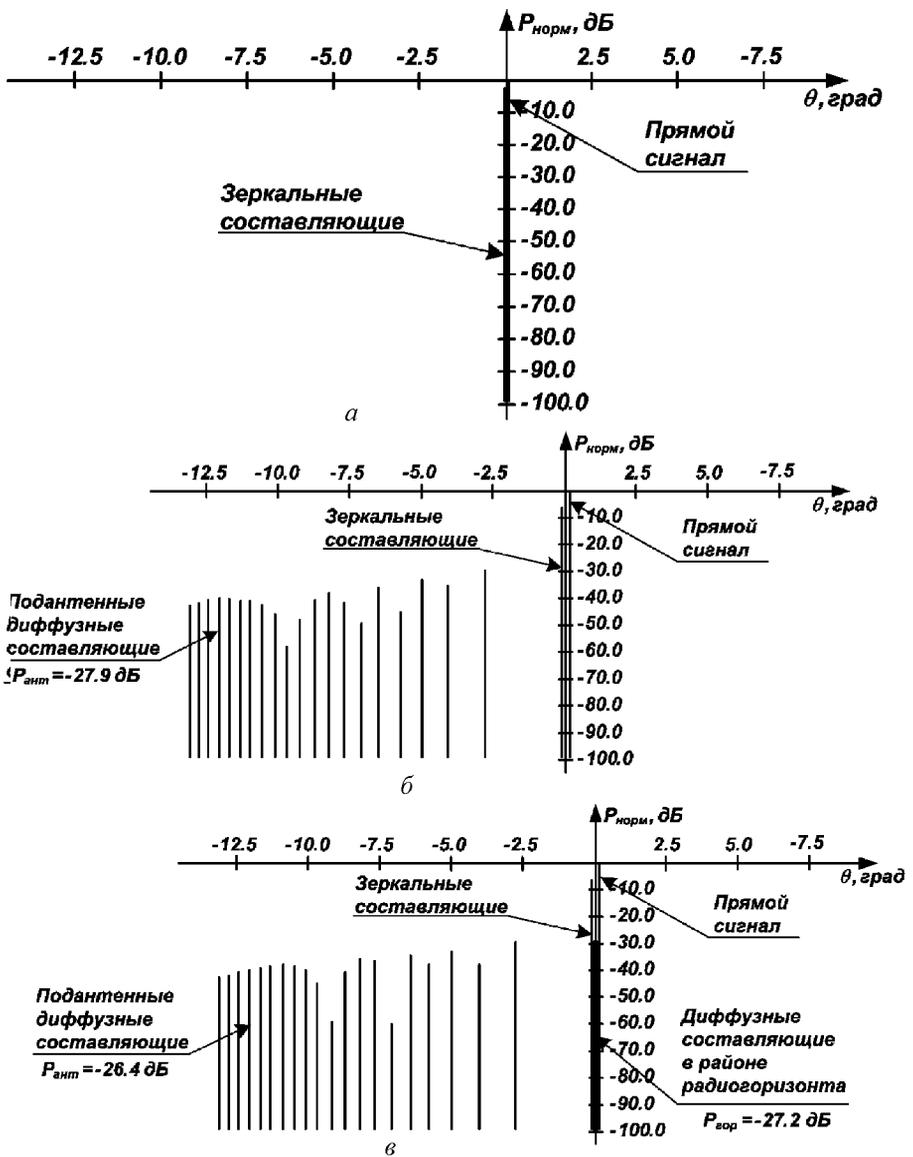


Рис. 2. Пространственный спектр сигнала при значениях дальности:
 $D = 20$ (а), $17,5$ (б) и 10 км (в)

зависимости от направления приема. Результат получен при следующих значениях параметров: длина волны $\lambda = 3$ см; высота антенны $h_{\text{ант}} = 15$ м; высота цели $h_{\text{ц}} = 20$ м; волнение моря 3 балла.

Из рис. 2 видно, что при $D = 20$ км (рис. 2, а) сигнал, отраженный от поверхности моря, имеет только зеркальные составляющие. Когда дальность уменьшается (рис. 2, б), возникают диффузные составляющие отраженного сигнала, которые приходят под большими углами, т.е. непосредственно от поверхности под антенной радиолокатора. Значительное уменьшение дальности (рис. 2, в) ведет к добавлению в

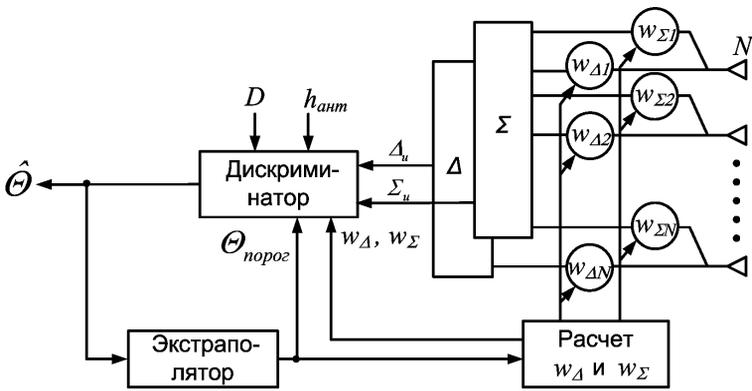


Рис. 3. Функциональная схема измерителя высоты НЛЦ

районе радиогоризонта (РГ) еще и диффузных составляющих, приходящих под малыми углами.

Сравнение полученных результатов с результатами теоретических исследований [4] демонстрирует их качественное и количественное совпадение. Поэтому рассматриваемая модель среды распространения радиоволн будет использоваться и в дальнейшем.

Математическая модель измерителя высоты НЛЦ. Исследования измерения угловых координат НЛЦ с учетом отражения от взволнованной поверхности моря проводятся на математической модели измерителя высоты НЛЦ [5], формирующего оценку высоты на основе метода максимального правдоподобия. На рис. 3 показана функциональная схема измерителя.

Антенная решетка состоит из N элементов, размещенных по вертикали над подстилающей поверхностью с коэффициентом отражения, равным 1. На выходах приемных устройств, подключенных к антенным элементам, одновременно измеряются комплексные амплитуды. Сигналы с выходов антенных элементов при помощи весовых коэффициентов объединяются в суммарном и разностном каналах, формируя сигналы с амплитудами

$$\Sigma_n = \sum_{i=1}^N w_{\Sigma_i} s_i K_{\Sigma}, \quad \Delta_n = \sum_{i=1}^N w_{\Delta_i} s_i K_{\Delta},$$

где w_{Σ_i} и w_{Δ_i} — весовые коэффициенты суммарного и разностного каналов; s_i — сигнал на выходе антенных элементов; K_{Σ} и K_{Δ} — коэффициенты передачи приемного устройства суммарного и

разностного каналов. Сигналы s_i получены при моделировании среды распространения радиоволн с учетом диффузного и зеркального отражения от взволнованной морской поверхности.

Сигналы Σ_n и Δ_n с выходов каналов поступают на дискриминатор. В дискриминаторе находится оценка положения цели $\hat{\Theta}$, соответ-

ствующая максимуму ФП с учетом известных значений следующих параметров: D , $h_{\text{ант}}$, w_{Σ} и w_{Δ} .

Для определения высоты цели после набора сигналов с выходов суммарного и разностного приемных каналов находятся значения ФП. Логарифмическая ФП высоты цели рассчитывается по формуле из работы [5]:

$$L(h) = \frac{|\Delta_p^* \Delta_i + \Sigma_p^* \Sigma_i|^2}{|\Delta_p|^2 + |\Sigma_i|^2},$$

где Δ_p^* , Σ_p^* — комплексные амплитуды разностного и суммарного сигналов, рассчитанные для каждого значения высоты цели. При этом Σ_p^* и Δ_p^* определяются только для зеркальной составляющей отраженного сигнала.

В экстраполяторе выполняется вычисление прогнозируемого значения положения цели $\Theta_{\text{прог}}$ с использованием вновь поступившего отсчета и $(M - 1)$ -го отсчета, поступившего в предыдущий момент времени. Выборка из M отсчетов аппроксимируется полиномом первой степени. По найденным коэффициентам полинома прогнозируется оценка на один такт вперед. Далее в рассматриваемых примерах число отсчетов M выбрано равным 10 с интервалом времени 0,1 с. С экстраполятора значения $\Theta_{\text{прог}}$ поступают на дискриминатор и используются для расчета весовых коэффициентов w_{Σ} и w_{Δ} , которые формируют ДН суммарного и разностного каналов.

Формирование нулей в суммарной и разностной ДН в направлении на источник помехи. Для данного измерителя высоты НЛЦ зеркальная составляющая является полезной [2], а остальные — помеховыми (см. рис. 2). Составляющая спектра вблизи антенны, т.е. при больших углах отклонения главного лепестка, подавляется низким уровнем боковых лепестков. Поэтому основное влияние на точность измерения высоты НЛЦ оказывают составляющие спектра вблизи РГ, образуя сосредоточенную в угловых координатах группу. Для исключения этих составляющих предлагается в суммарной и разностной ДН образовывать нули в направлении на эту помеху [6].

В суммарной и разностной ДН нули образуются вследствие модифицирования векторов весовых коэффициентов суммарного и разностного каналов w_{Σ} и w_{Δ} :

$$w'_{\Sigma} = w_{\Sigma} + k_{\Sigma} w_c;$$

$$w'_{\Delta} = w_{\Delta} + k_{\Delta} w_c.$$

где w_c — вектор весового коэффициента ДН, максимум которой направлен на помеху в области радиогоризонта и рассчитывается при известных положениях цели и антенны; $k_{\Sigma} = \frac{F_{\Sigma}(u_n)}{F_c(u_n)}$ и $k_{\Delta} = \frac{F_{\Delta}(u_n)}{F_c(u_n)}$ —

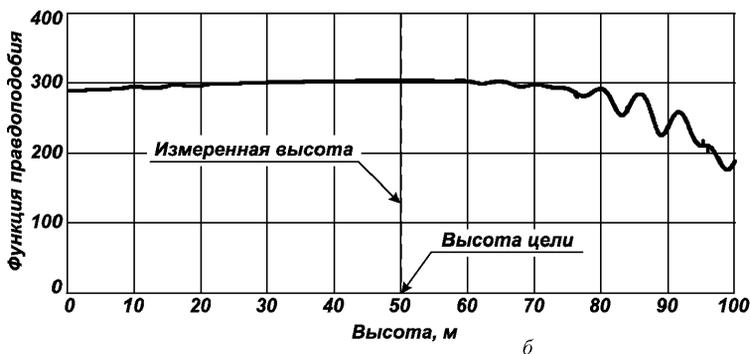
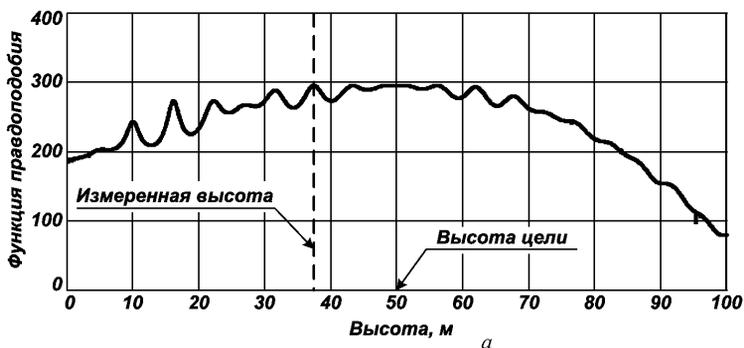


Рис. 4. Сравнение измеренной высоты цели с истинной высотой (без образования нулей (а) и с образованием нулей (б) в направлении на области диффузного отражения)

коэффициенты для суммарного и разностного каналов; $F_{\Sigma}(u_{п})$ — суммарная ДН; $F_{\Delta}(u_{п})$ — разностная ДН; $F_c(u_{п})$ — ДН, максимум которой направлен на помеху в области радиогоризонта.

Для образования нулей в направлении на источник помехи требуется точное целеуказание. Это условие соблюдается, если для расчета $u_{п}$ используются данные предыдущих измерений с соответствующей экстраполяцией, при получении которых влияние диффузного отражения и внутренних шумов было незначительным. Как указано далее, возможна такая последовательность действий, которая позволит в каждый момент времени при работе с движущейся целью измерить ее высоту с небольшими ошибками.

Результаты исследования характеристик измерителя на математической модели. На рис. 4 приведены результаты моделирования работы измерителя высоты НЛЦ. Цель располагается на постоянной высоте 50 м при волнении моря 4 балла. Исследования проводятся при отсутствии внутренних шумов. Высота цели определяется по глобальному максимуму ФП. Максимум суммарной ДН устанавливается на цель.

При определении высоты НЛЦ возникает ошибка измерения угловых координат цели (рис. 4, а). Эта ошибка определяется влиянием

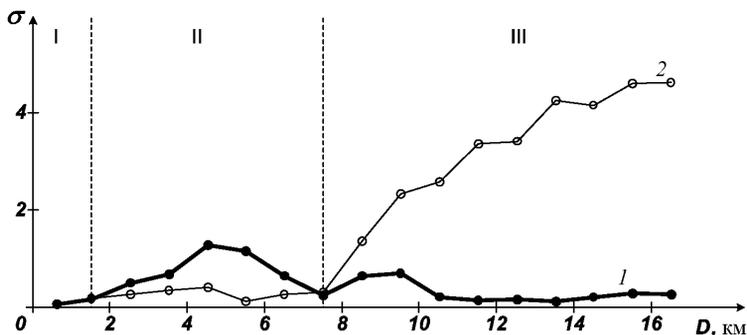


Рис. 5. Зависимость СКО измерения высоты цели от дальности: кривые 1 и 2 — без образования и с образованием нулей в направлении на область диффузного отражения

диффузного отражения от морской поверхности в области главного лепестка, расположенного в районе радиогоризонта.

Влияние диффузного отражения на точность сопровождения НЛЦ уменьшается с образованием в суммарной и разностной ДН нулей в направлении области диффузного отражения. Результаты моделирования приведены на рис. 4, б.

На рис. 5 приведена зависимость среднеквадратичного отклонения (СКО) высоты от дальности до цели при наличии внутренних шумов (ОСШ в суммарном канале — 20 дБ). Измеренная высота определяется по главному максимуму ФП, который соответствует истинному положению цели.

График 1 (см. рис. 5) соответствует случаю работы измерителя высоты НЛЦ без установки нуля в направлении области диффузного отражения в районе радиогоризонта. При малых дальностях ошибка измерения высоты цели увеличивается из-за диффузного отражения. На больших дальностях диффузная составляющая уменьшается, зеркальная составляющая возрастает, и точность измерения повышается.

График 2 (см. рис. 5) соответствует случаю работы измерителя высоты НЛЦ с формированием нуля в направлении области диффузного отражения в районе радиогоризонта. При малых дальностях ошибка измерения высоты цели уменьшается, так как диффузная составляющая отраженного сигнала подавляется низким уровнем боковых лепестков, при этом главный лепесток суммарной и разностной ДН (рис. 6, а) практически не искажается и, как следствие, не проявляются ошибки, возникающие из-за внутренних шумов. Это наблюдается в зоне I (см. рис. 5).

При больших дальностях, что соответствует зоне III (см. рис. 5), суммарная и разностная ДН уменьшаются в направлении полезного сигнала, хотя диффузная составляющая подавляется за счет формирования нуля в ДН (рис. 6, б). Следовательно, из-за внутренних шумов возрастает ошибка.

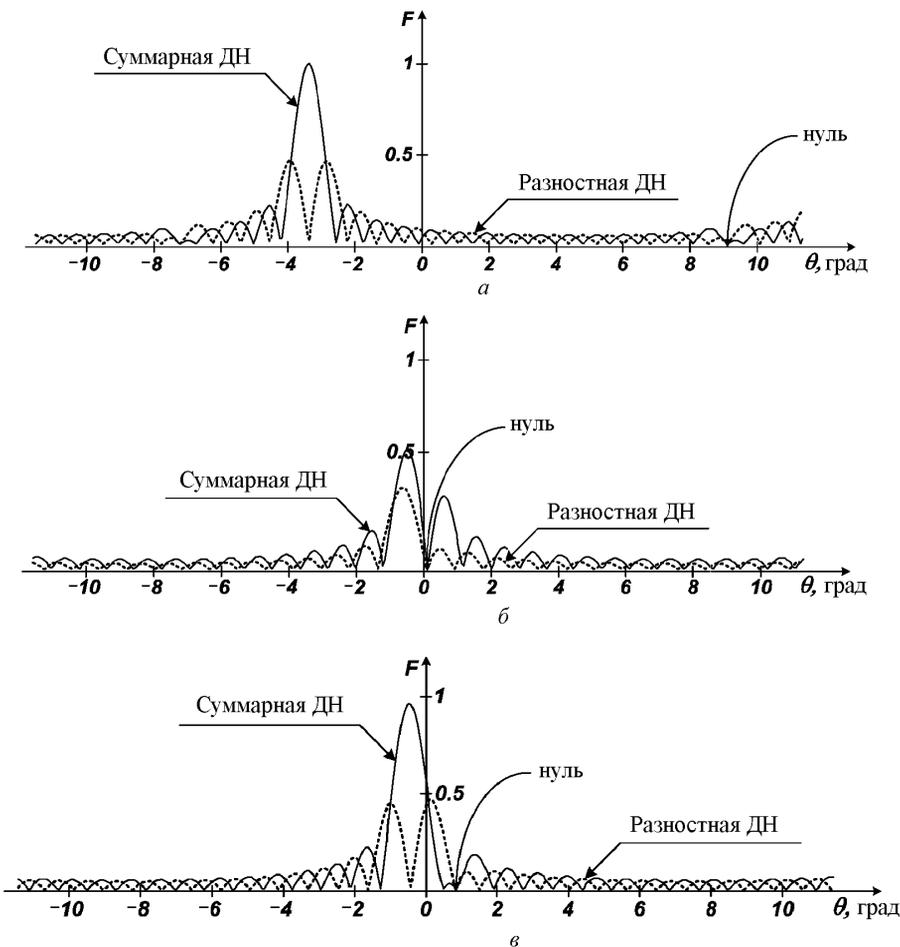


Рис. 6. Формирование нулей в суммарной и разностной ДН в направлении на область диффузного отражения:
a – $D = 0,6$ км, зона I; *б* – $D = 12$ км, зона III; *в* – $D = 4$ км, зона II

Можно найти такое условие, когда ошибки измерения в двух случаях совпадают (для данного примера – на дальности $\approx 7,5$ км). При этом помеха находится примерно на расстоянии, равном ширине ДН от направления на цель (рис. 6, в).

Поскольку в процессе работы измерителя высоты НЛЦ имеются данные о взаимном расположении антенны, цели и подстилающей поверхности, то существует возможность определения момента введения нуля в ДН, чтобы минимизировать общую ошибку по всей трассе.

Выводы. В измерителе высоты НЛЦ по методу максимального правдоподобия при малых дальностях возникают большие ошибки измерения высоты цели за счет появления диффузного отражения. Эти ошибки удастся значительно снизить, вводя нуль в ДН в направлении диффузной составляющей спектра сигнала, отраженного от поверхности, и расположенного вблизи радиогоризонта. Поскольку эта

составляющая спектра имеет определенную протяженность, то дополнительное снижение ошибки возможно при использовании нескольких рядом расположенных нулей в ДН.

Существует некоторая граница по дальности, до которой введение нуля дает снижение общей ошибки измерения. После этой границы необходимо исключить формирование нуля в направлении помехи, иначе возрастают составляющие ошибки, возникающие из-за внутренних шумов. Поскольку в процессе работы измерителя высоты НЛЦ известно взаимное расположение антенны, цели и подстилающей поверхности, то граница может быть определена автоматически. Она соответствует угловому расстоянию между направлением на цель и направлением на область диффузного отражения в районе радиогоризонта, равному примерно ширине ДН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонов А. И., Фомичев К. И. Моноимпульсная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1984. – 312 с.
2. Бартон (David K. Barton). Радиолокационное сопровождение цели при малых углах места // ТИИЭР, 1974. – Т. 62. – № 6. – С. 37–61.
3. Справочник по радиолокации: В 4 т. / Под общ. ред. К.Н. Трофимова. Т. 1: Основы радиолокации // Под ред. Я.С. Иццоки. – М.: Сов. радио, 1976. – 456 с.
4. Пименов Ю. В., Вольман В. И., Муравцев А. Д. Техническая электродинамика: Учеб. пособ. для вузов / Под ред. Ю.В. Пименова. – М.: Радио и связь, 2000. – 536 с.
5. Даниленко А. И., Первачёв С. В., Рожновская Н. А. Функция правдоподобия высоты источника сигнала, расположенного над отражающей поверхностью // Радиотехника. – 1996. – № 7. – С. 105–109.
6. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.

Статья поступила в редакцию 23.04.2007

Елена Анатольевна Покровская родилась в 1980 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2003 г. Старший инженер ОАО «МНИИРЭ «Альтаир». Автор 6 научных работ в области радиолокации.

Ye.A. Pokrovskaya (b. 1980) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2003. Engineer of open stock society “MNIIRE “Altair”. Author of 6 publications in the field of radiolocation.