УДК 621.396.663

А.С. Аникин, В.П. Денисов

Ошибки пеленгования источников радиоизлучения малогабаритными антеннами в условиях отражений от местности

Получены аналитические выражения для вычисления максимальной погрешности пеленгования источников радиоизлучения (ИРИ) малогабаритными антеннами в условиях конечного числа мешающих отражений.

Ключевые слова: погрешность пеленгования, малогабаритные антенны, искажения пространственной структуры фазового фронта.

Описание проблемы. Известно, что оценка угла прихода волны от источников радиоизлучения (ИРИ) на наземных трассах сопровождается погрешностью из-за пространственных искажений фазового фронта отражениями радиоволн от местных предметов и подстилающей поверхности [1]. Имеется ряд работ по определению ошибок пеленгования, когда отражённые сигналы детерминированы [2] или являются случайными процессами [3–6]. Аналитические выражения для определения ошибки пеленгования при наличии одного местного предмета получены в [2], а оценки погрешности пеленга на ИРИ из-за влияния подстилающей поверхности – в [4, 7]. Работа [7] содержит аналитические выражения для оценки максимальной погрешности пеленгования в случае приёма двух отражённых волн, разность фаз между которыми равна нулю или π. Однако в реальных условиях разность фаз между волнами и количество волн являются случайными. Применение аналитических методов к оценке погрешности пеленгования в этих условиях сложно, что побуждает использовать численное моделирование [8]. Данная работа развивает результаты книги [7] и заключается в оценивании максимальной погрешности измерения направления на ИРИ пеленгатором со слабонаправленными антеннами при приёме сигнала, содержащего сумму произвольного числа отражённых волн со случайными начальными фазами.

Цель работы – получение расчётных закономерностей, характеризующих максимальную ошибку пеленгования на трассах с переотражениями с помощью аппаратуры, имеющей антенную систему малых размеров, в зависимости от амплитудных и фазовых соотношений прямой и отражённых волн. Малой (малогабаритной) считается антенная система (антенна), размеры которой в плоскости пеленгования сравнимы с длиной волны.

Вывод формулы максимальной погрешности пеленгования. Предположим, что антенны пеленгатора расположены на некоторой оси OX, перпендикулярной линии ИРИ-пеленгатора. Антенны могут занимать дискретные позиции на этой оси с шагом $L \ll \lambda$, где λ – длина волны. Предположим, что используется фазовый метод пеленгования, причём база пеленгатора также равна L (рис. 1). Волны, рассеянные объектами на трассе распространения и падающие на антенны, также будем считать плоскими. Подобная ситуация является реальной в сантиметровом диапазоне волн, когда отражающие радиоволны объекты не находятся в непосредственной близости от приёмных антенн.

Пусть на ось OX падают прямая волна от ИРИ по нормали **S** к ней и N плоских отражённых волн частотой ω_0 с амплитудами U_i под углами $\alpha_i > 0$ к нормали **S** (см. рис. 1). Для определения пеленга на ИРИ между парой слабонаправленных антенн пеленгатора, расположенных в точках (x, 0), и ($x + L$, 0) вычисляется разность фаз φ. При отсутствии отражённых сигналов она равнялась бы нулю. Наибольшую погрешность пеленгования можно определить по максимуму разности фаз между выходными сигналами слабонаправленных антенн в зависимости от координаты «x».

Предположим, что сумма амплитуд отражённых сигналов $\sum_{i=2}^{N} U_i$ не превышает амплитуды U_1 сигнала от ИРИ. По данным работы [3] $\sum U_i \approx (0{,}05\ldots0{,}12)\cdot U_1$. Амплитуды U_i, углы падения α_i и начальные фазы волн от источников отражений сначала будем считать известными.

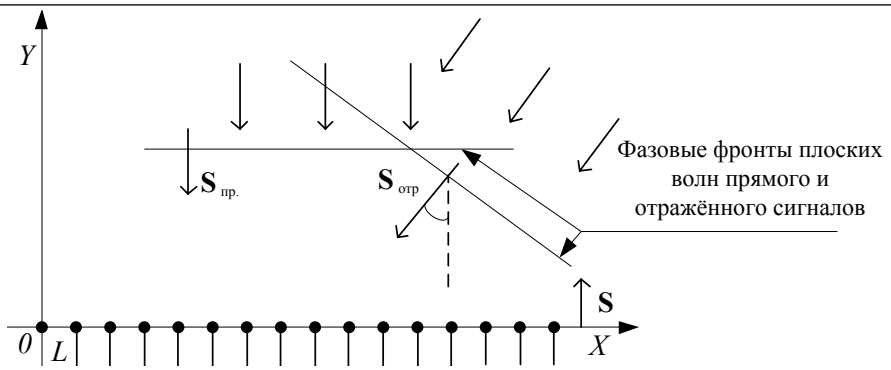

Рис. 1. Расположение малогабаритных антенн пеленгатора (чёрные точки) вдоль оси *OX* и фазовые фронты плоских волн от ИРИ и отражателей

Модель результирующего сигнала на входе малогабаритной антенны в точке с координатой (x, 0) записывается как:

$$\dot{u}(t,x)=\dot{U}(x)\cdot\exp(j\cdot\omega_0\cdot t)\,, \qquad (1)$$

где $\dot{U}(x)=U(x)\cdot\exp(j\cdot\psi(x))$ – комплексная амплитуда результирующего сигнала на выходе антенны в точке с координатой (x, 0); $U(x)=\sqrt{\left(U_{RE}(x)^2+\left(U_{IM}(x)\right)^2\right)}$ – амплитуда результирующего сигнала на выходе антенны в точке с координатой (x, 0); $\psi(x)=\mathrm{arctg}\left(\frac{U_{IM}(x)}{U_{RE}(x)}\right)$ – фаза результирующего сигнала на выходе антенны в точке с координатой (x, 0); $\varphi(x)=\psi(x,0)-\psi(x+L,0)$ – разность фаз между сигналами антенн пеленгатора, расположенных в точках (x, 0) и (x + L, 0); $U_{RE}(x)=\sum_{i=1}^{N}U_i\cdot\cos(k\cdot x\cdot\nu_i+g_i)$ и $U_{IM}(x)=\sum_{i=1}^{N}U_i\cdot\sin(k\cdot x\cdot\nu_i+g_i)$ – действительная и мнимая части результирующего сигнала на выходе антенны в точке с координатой (x, 0) соответственно; g_i – начальная фаза i-го отражённого сигнала в точке с координатами (0, 0); $k=\frac{2\cdot\pi}{\lambda}$ – волновое число; $\upsilon_i=\sin(\alpha_i)$, α_i – угол падения i-й волны по отношению к нормали **S**.

Функция $\psi(x)$ показывает зависимость фазы результирующего сигнала от положения точки на оси *OX*. В монографии [5] показано, что при интерференции двух плоских волн с разными амплитудами, разность фаз сигналов φ как функция координаты «x» колеблется вокруг прямой, соответствующей углу прихода волны с большей амплитудой. Проверим, выполняется ли это правило, если на антенную систему, расположенную вдоль оси O*X*, падают три волны: прямая с амплитудой U_1 и две отражённых с амплитудами U_2 и U_3, так что $U_2 + U_3 < U_1$. На рис. 2 показаны результаты расчётов, полученных при условии: λ = 0,1 м, υ_1 = 0,002, υ_2 = 0,3, υ_3 = 0,02 и U_1 = 1, U_2 = 0,2 , U_3 = 0,1, $g_1 = g_2 = g_3 = 0$ (рис. 2). По оси ординат отложены значения $\psi(x)$ в радианах, а по оси абсцисс – x/λ.

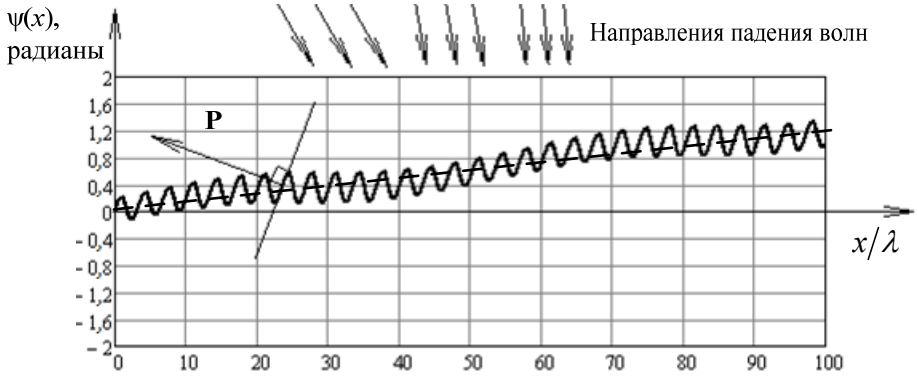

Рис. 2. Зависимость $\psi(x)$ (λ=0,1 м, υ_1=0,002, υ_2=0,3, υ_3=0,02 и U_1=1, U_2= 0,2, U_3=0,1, $g_1=g_2=g_3=0$)

Зависимость фазы результирующего сигнала от координаты «x» имеет средний наклон по отношению к оси O*X*, соответствующий направлению прихода волны с наибольшей амплитудой. Средний наклон зависимости фазы от координаты «x» показан штриховой линией. Вдоль среднего

наклона наблюдается квазипериодическое изменение разности фаз. В данной работе, в квазипериодической структуре кривой $\psi(x)$ условно выделены пространственные квазипериоды разных масштабов, которые в дальнейшем будут условно называться крупномасштабным и мелкомасштабным пространственными периодами. Конечный период имеет место только для рациональных чисел υ_i. На рис. 2 крупномасштабный период функции $\psi(x)$ равен $T_g = 50\cdot\lambda$, а мелкомасштабный – $T_l = 3{,}3\cdot\lambda$.

Периодичность фазы вдоль оси O*X* наглядна, когда волна ($\lambda = 0{,}1$ м) от ИРИ падает по нормали к оси O*X* ($\upsilon_1 = 0$, $U_1 = 1$) (рис. 3).

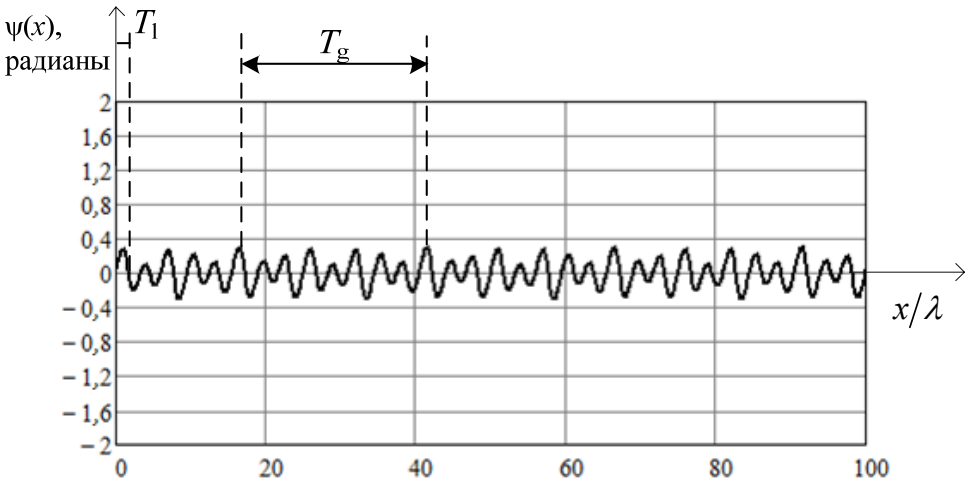

Рис. 3. Зависимость $\psi(x)$ ($\lambda = 0{,}1$ м, $\upsilon_1 = 0$, $\upsilon_2 = 0{,}32$, $\upsilon_3 = 0{,}2$ и $U_1 = 1$, $U_2 = 0{,}2$, $U_3 = 0{,}1$, $g_1 = g_2 = g_3 = 0$)

Рисунок 3 показывает наличие у функции $\psi(x)$ крупномасштабного периода $T_g = 25\cdot\lambda$, и мелкомасштабного периода $T_l = 3{,}13\cdot\lambda$. Вычислить крупномасштабный период приближённо (без учёта амплитудных соотношений между волнами) можно, используя кратность величин υ_2 и υ_3, соответствующих отражённым волнам. С возрастанием количества отражённых волн этот подход является трудоёмким. В случае большого количества волн крупномасштабный период проще оценивать численно.

Мелкомасштабный период можно оценить следующим образом. Когда уровни отражённых сигналов отличаются друг от друга не более чем в 2 раза, то мелкомасштабный период равен:

$$T_l \le \lambda/\upsilon_{max}, \qquad (2)$$

где $\upsilon_{max} = \max(\upsilon_i)$, $i = 2 \ldots N$.

Если уровни отражённых сигналов отличаются более чем в 2 раза, то мелкомасштабный период определяется углом прихода отражённого сигнала с большей амплитудой. В случае равных амплитуд отражённых сигналов мелкомасштабный период определяется максимальным углом прихода отражённых сигналов $T_l \le \lambda/\upsilon_{max}$.

Если антенна пеленгатора направленная, то пространственный период, вычисленный по её выходным сигналам, будет отличаться от пространственного периода поля. Это связано с пространственной избирательностью антенны. Если Θ – ширина главного лепестка ДНА и антенна направлена на ИРИ, то принимаются отражённые волны, приходящие под углами, не большими чем $\Theta/2$. Учитывая, что $T_l \le \lambda/\upsilon_{max}$, получим $T_l \le 2\cdot\lambda/\Theta$. Линейный размер антенны L_a связан с шириной диаграммы направленности формулой $\Theta = \lambda/L_a$, и пространственный период выходных сигналов антенн пеленгатора связан с размерами антенн соотношением:

$$T_l \le 2\cdot L_a. \qquad (3)$$

Из формулы (3) видно, что мелкомасштабный период соизмерим с размерами антенн пеленгатора.

Функцию $\psi(x)$ можно разложить в спектр по пространственными частотам. Фаза $\psi(x)$ является результатом нелинейного взаимодействия интерферирующих волн, поэтому в пространственном спектре должны присутствовать не только частоты, соответствующие углам прихода интерферирующих волн, но и их комбинации. Определим связь между изменением фазы результирующего сигнала вдоль оси O*X* и спектром пространственных частот, используя преобразование Фурье от $\psi(x)$ на пространственном интервале, включающем целое число крупномасштабных периодов. Преобразование Фурье $\psi(x)$ выполним следующим образом:

$$F(\alpha)=\left|\int_{-\infty}^{\infty}\psi(x)\cdot e^{j\cdot x\cdot\alpha}dx\right| \qquad (4)$$

Результат расчёта преобразования Фурье $\psi(x)$ по формуле (4) для случая, данного на рис. 3, представлен на рис. 4.

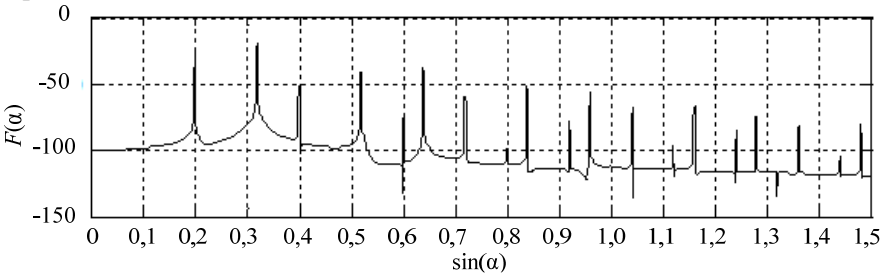

Рис. 4. Спектр функции $\psi(x)$ (λ = 0,1 м; $\upsilon_1 = 0$; $\upsilon_2 = 0{,}32$; $\upsilon_3 = 0{,}2$ и $U_1 = 1$; $U_2 = 0{,}2$; $U_3 = 0{,}14$ $g_1=g_2=g_3=0$)

Из рис. 4 видно, что спектр содержит составляющие, соответствующие углам прихода отражённых волн с $\upsilon_2 = 0{,}32$ и $\upsilon_3 = 0{,}2$ и комбинационные составляющие $\upsilon^* = m\cdot\upsilon_2 \pm n\cdot\upsilon_3 = 0{,}4$, 0,52, 0,6, 0,64... . Анализ кратности составляющих спектра позволяет определить углы прихода тех волн, которые имеют значимый уровень, т.е. получить оценку углового спектра результирующего сигнала. Мелкомасштабный период T_l определяется спектральной составляющей, имеющей наибольший уровень. Наименьшая разность $\min(\upsilon^*_1 - \upsilon^*_2)$ между составляющими υ^*_1 и υ^*_2 спектра функции $\psi(x)$ определяет крупномасштабный период T_g.

Вычислить максимальную погрешность пеленгования по функции $\psi(x)$ можно при совмещении нормали к оси OX с направлением на ИРИ. В иных случаях потребуется предварительно устранять средний тренд функции $\psi(x)$. На апертуре малогабаритных антенн можно считать фазовый фронт плоским, а амплитуду результирующей волны постоянной. Пеленг на ИРИ представляет собой нормаль **P** к плоскости фазового фронта (см. рис. 5). Вследствие искажения фазового фронта возникает погрешность пеленгования и выражается она в отклонении вектора **P** от направления на ИРИ. Искажения фазового фронта характеризуются производной $\partial\psi(x)/\partial x$, имеющей смысл тангенса угла наклона к оси OX касательной *2* в произвольной точке *3* фазового фронта (см. рис. 5). В то же время производная от $\psi(x)$ по координате «x» представляет собой разность фаз между сигналами антенн пеленгатора $\Delta\psi(x) = \psi(x,0) - \psi(x+L,0)$ при $L\to 0$. Когда тангенс угла наклона отличен от нуля, плоскость фазового фронта в точке x имеет наклон по отношению к нормали оси OX, вектор **P** отклоняется от направления на ИРИ и пеленг вычисляется с погрешностью. Погрешность пеленгования пропорциональна углу наклона касательной в точке фазового фронта. Из рис. 5 видно, что при поперечном перемещении пеленгатора имеются точки «x», в которых ошибка пеленгования равна нулю (в этих точках плоскость фазового фронта параллельна оси OX).

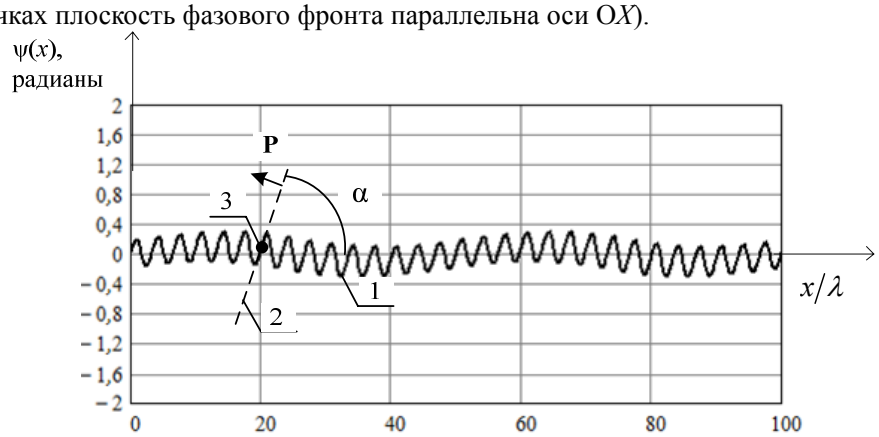

Рис. 5. Изменение фазы суммы интерферирующих волн вдоль оси OX, перпендикулярной линии «передатчик–пеленгатор»

Выразим квадратурные составляющие $U_{RE}(x)$, $U_{IM}(x)$ через $Ri = U_i/U_1$. Тогда

$$U_{RE}(x)=U_1\cdot\left\{\sum_{i=1}^{N}R_i\cdot\cos(k\cdot x\cdot\nu_i+g_i)\right\},\quad U_{IM}(x)=U_1\cdot\left\{\sum_{i=1}^{N}R_i\cdot\sin(k\cdot x\cdot\nu_i+g_i)\right\}.$$

Определим погрешность пеленгования, пользуясь функциональной связью разности фаз φ (или Δψ) между сигналами в разнесённых на расстояние L антеннах, и углом прихода α волны [3]:

$$\varphi = k \cdot L \cdot \sin(\alpha). \tag{5}$$

Запишем выражение (5) как:

$$\frac{\varphi}{\Delta L} = \frac{\varphi(x)}{\Delta x} = k \cdot \sin(\alpha). \tag{6}$$

Пеленг малогабаритными антеннами связан с тангенсом угла наклона касательной к точке фазового фронта 2 в предельном переходе $\Delta x \to 0$:

$$\frac{\partial\varphi(x)}{\partial x} = k \cdot \sin(\alpha). \tag{7}$$

Выражение для вычисления погрешности пеленгования $\Delta\alpha$ получим из (7), выразив угол прихода волны α как

$$\Delta\alpha = \arcsin\left(\frac{1}{k} \cdot \frac{\partial\varphi(x)}{\partial x}\right). \tag{8}$$

Производную от φ(x) можно найти следующим образом:

$$\frac{\partial\varphi(x)}{\partial x} = \frac{k \cdot \left(\nu_1 + \sum\limits_{j=2}^{N} \nu_j \cdot R_j^2 + \left(\sum\limits_{j=2}^{N} R_j \cdot b_j \cdot \cos(r_j + k \cdot x \cdot d_j) + \sum\limits_{j=2}^{N-1} \sum\limits_{k=j+1}^{N} R_j \cdot R_k \cdot b_{jk} \cdot \cos(r_{jk} + k \cdot x \cdot d_{jk})\right)\right)}{\left(1 + \sum\limits_{j=2}^{N} R_j^2 + 2 \cdot \left(\sum\limits_{j=2}^{N} R_j \cdot \cos(r_j + k \cdot x \cdot d_j) + \sum\limits_{j=2}^{N-1} \sum\limits_{k=j+1}^{N} R_j \cdot R_k \cdot \cos(r_{jk} + k \cdot x \cdot d_{jk})\right)\right)}, \tag{9}$$

где $d_j = \nu_1 - \nu_j$, $r_j = g_1 - g_j$, $d_{jk} = \nu_k - \nu_j$, $r_{jk} = g_k - g_j$, $b_j = \nu_1 + \nu_j$, $b_{jk} = \nu_k + \nu_j$.

Тогда выражение (8) для погрешности пеленгования Δα(x) запишется как

$$\Delta\alpha(x) = \arcsin\left(\frac{\nu_1 + \sum\limits_{j=2}^{N} \nu_j \cdot R_j^2 + \left(\sum\limits_{j=2}^{N} R_j \cdot b_j \cdot \cos(r_j + k \cdot x \cdot d_j) + \sum\limits_{j=2}^{N-1} \sum\limits_{k=j+1}^{N} R_j \cdot R_k \cdot b_{jk} \cdot \cos(r_{jk} + k \cdot x \cdot d_{jk})\right)}{1 + \sum\limits_{j=2}^{N} R_j^2 + 2 \cdot \left(\sum\limits_{j=2}^{N} R_j \cdot \cos(r_j + k \cdot x \cdot d_j) + \sum\limits_{j=2}^{N-1} \sum\limits_{k=j+1}^{N} R_j \cdot R_k \cdot \cos(r_{jk} + k \cdot x \cdot d_{jk})\right)}\right). \tag{10}$$

Формула (10) позволяет рассчитать погрешность пеленгования, возникающую в результате интерференции произвольного количества волн. Рассмотрим частные случаи.

Интерференция прямого и одного отражённого сигнала. Пусть на ось OX падают две плоские волны под углами $\alpha_1 = 0$ и $\alpha_2 \neq 0$ с амплитудами U_1 и U_2 и начальными фазами $g_1 = g_2 = 0$. Тогда выражение (10) запишется в виде

$$\Delta\alpha(x) = \arcsin\left[\frac{\nu_1 + R_2^2 \cdot \nu_2 + R_2 \cdot \nu_{12+} \cdot \cos(g_{12-} + k \cdot x \cdot \nu_{12-})}{1 + R_2^2 + 2 \cdot R_2 \cdot \cos(g_{12-} + k \cdot x \cdot \nu_{12-})}\right], \tag{11}$$

где $g_{12-} = g_1 - g_2 = 0$, $\upsilon_{12-} = \upsilon_1 - \upsilon_2$, $\upsilon_{12+} = \upsilon_1 + \upsilon_2$, $R_2 = U_2/U_1$, $\upsilon_1 = 0$.

Из выражения (11) следует, что зависимость ошибки пеленгования от координаты «x» есть периодическая функция. Функция Δα(x) имеет пространственный период, который определяется отношением длины волны λ к угловому разносу падающих волн $\Delta\upsilon = \upsilon_1 - \upsilon_2$ и равен $T_g = \lambda/\Delta\upsilon$. Ошибка пеленгования принимает положительные и отрицательные значения. Положительные $\Delta\alpha^{max}_{+}$ и отрицательные $\Delta\alpha^{min}_{-}$ максимальные ошибки пеленгования зависят от R_2 и υ_2 и равны

$$\Delta\alpha^{max}_{+} = \arcsin(R_2 \cdot \upsilon_2 / (R_2 + 1)), \tag{12}$$

$$\Delta\alpha^{min}_{+} = \arcsin(R_2 \cdot \upsilon_2 / (R_2 - 1)). \tag{13}$$

В табл. 1 показаны абсолютные значения экстремальных ошибок пеленгования для некоторых R_2 и υ_2.

Экстремумы ошибок пеленгования наблюдаются в точках «x», где отклонения от оси OX касательной к функции ψ(x) принимают максимальные и минимальные значения. Координаты точек экстремумов соответствуют значениям

$$x^{max}_{-} = (\lambda/2 \cdot \pi) \cdot [2 \cdot n + 1 + (g_{12}/\pi)], \tag{14}$$

$$x^{\min}_{+} = (\lambda/2\cdot\pi)\cdot[2\cdot n + (g_{12}/\pi)], \qquad (15)$$

для всех $n = 0,1,2\ldots$.

Таблица 1

Результаты расчёта экстремальных ошибок пеленгования

υ_2	R_2	$\Delta\alpha^{\max}$, радианы/градусы
0,005	0,1	$-5{,}5\cdot10^{-4}$ / – 0,032
	0,5	$-5{,}0\cdot10^{-3}$ / – 0,29
	0,8	$-2{,}0\cdot10^{-2}$ / – 1,15
0,05	0,1	$5{,}5\cdot10^{-3}$ / – 0,32

На рис. 6 построена зависимость $\Delta\alpha(x)$ по формуле (11) при λ =0,1 м, υ_2 = 0,005, $g_1 = g_2 = 0$, R_2 =0,5. По оси абсцисс отложена величина x/λ, а по оси ординат – ошибки пеленгования в градусах.

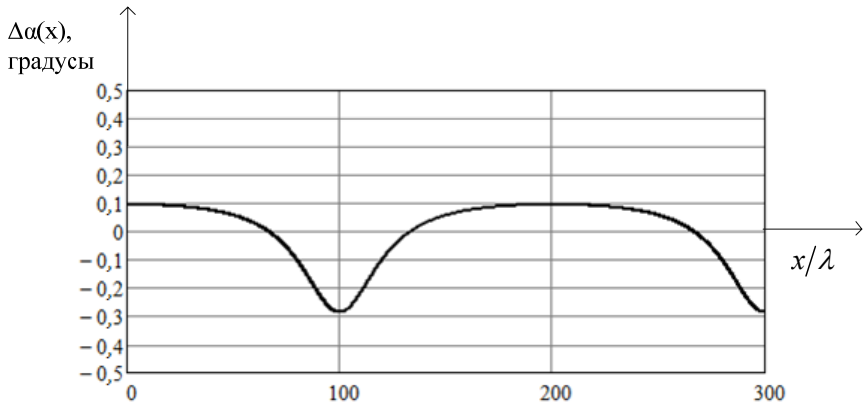

Рис. 6. Зависимость от координаты «x» ошибки пеленгования $\Delta\alpha(x)$, вызванной одной мешающей волной

Средняя за период функции $\Delta\alpha(x)$ ошибка пеленгования равна нулю, т.е. $\int_{100}^{300} \Delta\alpha(x)dx = 0$.

Из формулы (10) и табл. 1 видно, что зависимость ошибки пеленгования от R_2 нелинейная. Из рис. 6 видно, что для R_2 = 0,5 максимальная ошибка пеленгования равна разнице углов прихода сигналов $\Delta\upsilon$. С увеличением углового разноса между плоскими волнами ошибка пеленга возрастает.

Интерференция прямого и нескольких (трёх, четырёх) отражённых сигналов. Рассмотрим случай, когда на ось OX падают четыре плоские волны под углами $\alpha_1 = 0$, а α_2, α_3, $\alpha_4 \neq 0$ с амплитудами $U_1\ldots U_4$, $U_1 >> \sum U_i$ и начальными фазами $g_1 = g_2 = g_3 = g_4 = 0$. Тогда выражение (10) запишется в виде

$$\Delta\alpha(x) = \arcsin\left(\frac{\nu_1 + R_2^2\cdot\nu_2 + R_3^2\cdot\nu_3 + R_4^2\cdot\nu_4 + R_2\cdot\nu_{12+}\cdot\cos(g_{12-} + k\cdot x\cdot\nu_{12-}) + R_3\cdot\nu_{13+}\cdot\cos(g_{13-} + k\cdot x\cdot\nu_{13-}) + R_4\cdot\nu_{14+}\cdot\cos(g_{14-} + k\cdot x\cdot\nu_{14-}) + \{R_2\cdot R_3\cdot\cos(g_{23-} + k\cdot x\cdot\nu_{23-}) + R_2\cdot R_4\cdot\cos(g_{24-} + k\cdot x\cdot\nu_{24-}) + R_3\cdot R_4\cdot\cos(g_{34-} + k\cdot x\cdot\nu_{34-})\}}{1 + R_2^2 + R_3^2 + R_4^2 + 2\cdot R_2\cdot\cos(g_{12-} + k\cdot x\cdot\nu_{12-}) + 2\cdot R_3\cdot\cos(g_{13-} + k\cdot x\cdot\nu_{13-}) + 2\cdot R_4\cdot\cos(g_{14-} + k\cdot x\cdot\nu_{14-}) + \{2\cdot R_2\cdot R_3\cdot\cos(g_{23-} + k\cdot x\cdot\nu_{23-}) + 2\cdot R_2\cdot R_4\cdot\cos(g_{24-} + k\cdot x\cdot\nu_{24-}) + 2\cdot R_3\cdot R_4\cdot\cos(g_{34-} + k\cdot x\cdot\nu_{34-})\}}\right), \qquad (16)$$

где

$$g_{12-} = g_1 - g_2,\ g_{13-} = g_1 - g_3,\ g_{14-} = g_1 - g_4,\ g_{23-} = g_2 - g_3,\ g_{24-} = g_2 - g_4,\ g_{34-} = g_3 - g_4,$$
$$\upsilon_{12-} = \upsilon_1 - \upsilon_2,\ \upsilon_{13-} = \upsilon_1 - \upsilon_3,\ \upsilon_{14-} = \upsilon_1 - \upsilon_4,\ \upsilon_{23-} = \upsilon_2 - \upsilon_3,\ \upsilon_{24-} = \upsilon_2 - \upsilon_4,\ \upsilon_{34-} = \upsilon_3 - \upsilon_4,$$
$$\upsilon_{12+} = \upsilon_1 + \upsilon_2,\ \upsilon_{13+} = \upsilon_1 + \upsilon_3,\ \upsilon_{14+} = \upsilon_1 + \upsilon_4,\ \upsilon_{23+} = \upsilon_2 + \upsilon_3,\ \upsilon_{24+} = \upsilon_2 + \upsilon_4,\ \upsilon_{34+} = \upsilon_3 + \upsilon_4,$$
$$R_2 = U_2/U_1,\ R_3 = U_3/U_1,\ R_4 = U_4/U_1.$$

Выражение (16), как и (11), показывает, что зависимость ошибки пеленгования от координаты «x» есть квазипериодическая функция. Ошибка пеленгования как функция координаты «x» принимает положительные и отрицательные значения. Поиск максимума функции (16) позволяет полу-

чить формулы для положительных $\Delta\alpha_+^{max}$ и отрицательных $\Delta\alpha_-^{min}$ максимальных ошибок пеленгования, когда рассеянные волны приходят с одной стороны по отношению к направлению на ИРИ и $U_1 >> \sum U_i$. Положительные $\Delta\alpha_+^{max}$ и отрицательные $\Delta\alpha_-^{min}$ максимальные ошибки пеленгования ограничены значениями

$$\Delta\alpha_+^{min} \le \arcsin\left(\frac{\nu_1 + R_2\cdot\nu_2 + R_3\cdot\nu_3 + R_4\cdot\nu_4}{1+R_2^2+R_3^2+R_4^2}\right), \tag{17}$$

$$\Delta\alpha_-^{max} \le \arcsin\left[\frac{\nu_1 + R_2^2\cdot\nu_2 + R_3^2\cdot\nu_3 + R_4^2\cdot\nu_4 + \left(R_2\cdot R_3\cdot\nu_{23+} + R_2\cdot R_4\cdot\nu_{24+} + R_3\cdot R_4\cdot\nu_{34+}\right) - \left(R_2\cdot\nu_{12+} + R_3\cdot\nu_{13+} + R_4\cdot\nu_{14+}\right)}{1+R_2^2+R_3^2+R_4^2+2\cdot\left(R_2\cdot R_3+R_2\cdot R_4+R_3\cdot R_4\right)-2\cdot\left(R_2+R_3+R_4\right)}\right]. \tag{18}$$

В табл. 2 показаны значения максимальных ошибок пеленгования, найденных по формулам (17), (18) численным методом.

Как в случае падения двух плоских волн на линейную решётку, экстремумы ошибок пеленгования наблюдаются в точках «*x*», где отклонения от оси *OX,* касательной к функции $\psi(x)$, принимают максимальные и минимальные значения.

Таблица 2

Результаты расчёта экстремальных ошибок пеленгования

№	υ_2	υ_3	υ_4	R_2	R_3	R_4	$\sum R$	$\Delta\alpha^{max}$, градусы	$T_{g.}$, x/λ
1	0,005	0,37	0,29	0,1	0,2	0,15	0,45	–12,39	200
2				0,1	0,3	0,15	0,55	–20,15	200
3				0,1	0,4	0,15	0,65	–33,26	200
4	0,5	0,37	0,29	0,1	0,2	0,15	0,45	–17,73	100

На рис. 7 построена зависимость $\Delta\alpha(x)$ от координаты «*x*», вычисленная по формуле (16) при параметрах падающих волн согласно строке 1 табл. 2 и $g_1 = g_2 = g_3 = g_4 = 0$.

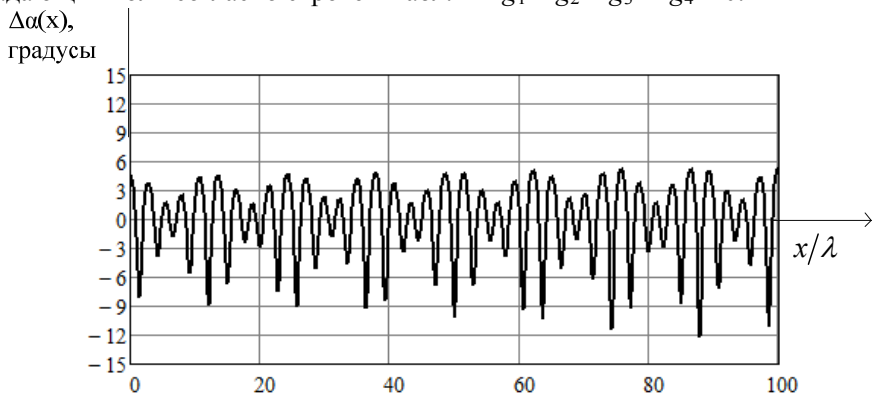

Рис. 7. Зависимость от координаты «*x*» ошибки пеленгования $\Delta\alpha(x)$, вызванной тремя мешающими волнами (λ =0,1 м, υ_2 = 0,005, υ_3 = 0,37, υ_4 = 0,29, R_2 =0,1, R_3 =0,2, R_4 =0,15)

По рис. 7 видно, что значения максимальной и минимальной ошибок и координаты «*x*», где они имеют место, соответствуют формулам (16)–(18). На величину крупномасштабного периода меньшее влияние оказывает амплитуда сигнала, чем направления прихода рассеянных волн. Ошибка пеленгования за крупномасштабный период функции $\Delta\alpha(x)$ равна нулю ($\int_0^{T_д} \Delta\alpha(x)dx = 0$).

Результаты численного моделирования ошибки пеленгования в зависимости от углового спектра, уровня отражённых волн и количества лучей. Приведённые выше максимальные погрешности пеленгования вычислены для частных случаев: предполагалось, что мешающие отражения приходят с одной стороны и начальные фазы падающих волн в точке $x = 0$ равны нулю.

Найдём путём численных расчётов по формуле (10) максимальные погрешности пеленгования для более общих условий.

Пусть заданное количество мешающих плоских волн приходит на антенную систему пеленгатора из сектора γ, симметричного относительно угла прихода прямого сигнала. Зададимся равно-

мерным распределением углов прихода плоских волн в секторе γ, а также равномерным распределением их начальных фаз в точке $x = 0$ на интервале 0, 2π. Амплитуды U_i волн также зададим случайными, зафиксировав их сумму $U_{отр} = \sum_{i=2}^{N} U_i$. Численные расчёты выполним на волне λ = 10 см при перемещении антенн фазового пеленгатора вдоль оси O*X* в пределах от –1300 до +1300 м с шагом 1 см. Вычисления выполнялись 200 раз при случайном наборе перечисленных параметров волн. По полученному набору данных вычислено математическое ожидание $m_{\Delta\alpha}$ и СКО $\sigma_{\Delta\alpha}$ максимальной ошибки пеленгования при перемещении антенной системы пеленгатора в указанном интервале.

На рис. 8, 9 представлены зависимости $m_{\Delta\alpha}$ и $\sigma_{\Delta\alpha}$ от суммы амплитуд мешающих волн, если их количество равно 2 (см. рис. 8) и 100 (см. рис. 9). Параметром семейства кривых служит угловой сектор рассеянных волн. Из рис. 8, 9 видно, что среднее значение максимальной ошибки пеленгования монотонно растёт с увеличением отношения суммы амплитуд рассеянных сигналов к амплитуде прямого независимо от ширины углового сектора рассеянных волн γ, причём при большом количестве отражённых сигналов эта зависимость практически линейная. Зависимости $m_{\Delta\alpha}$ и $\sigma_{\Delta\alpha}$ от суммы амплитуд мешающих волн похожи.

При фиксированном суммарном уровне рассеянных волн максимальная погрешность тем больше, чем меньше их количество. Если отражённых волн только две, максимальные погрешности достигают 90°, когда $\sum_{i=2}^{N} U_i / U_1 \to 1$, для любого сектора γ. В этом случае $\sigma_{\Delta\alpha} \to 0$.

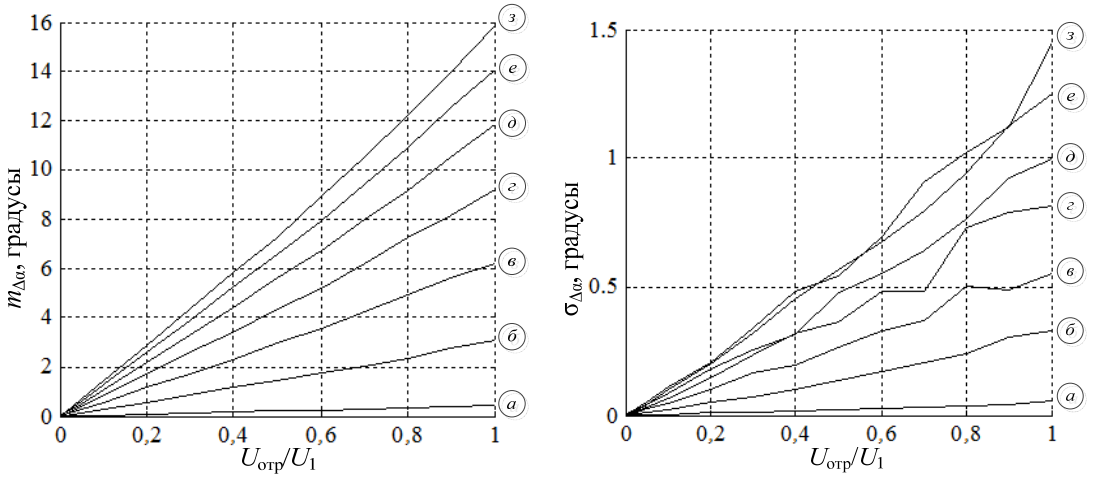

Рис. 8. Зависимость $m_{\Delta\alpha}$ и $\sigma_{\Delta\alpha}$ от общего уровня 100 отражённых сигналов, в секторе углов γ, равном: *а* – 5°; *б* – 30°; *в* – 60°; *г* – 90°; *д* – 120°; *е* – 150°; *з* – 180°

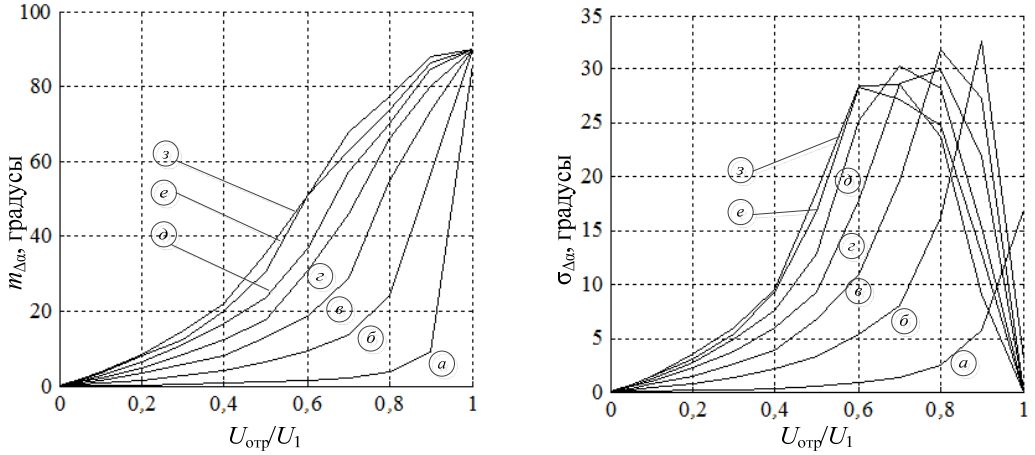

Рис. 9. Зависимость $m_{\Delta\alpha}$ и $\sigma_{\Delta\alpha}$ от общего уровня двух отражённых сигналов, в секторе углов γ, равном: *а* – 5°; *б* – 30°; *в* – 60°; *г* – 90°; *д* – 120°; *е* – 150°; *з* – 180°

Численным методом оценивался крупномасштабный период функции $\psi(x)$. При количестве волн более 20 крупномасштабный период значительно превышает интервал, на котором выполнялось моделирование (более 2600 м).

Выводы

Поскольку при фиксированном отношении суммы амплитуд мешающих волн к амплитуде прямой волны (меньше 1) максимальная погрешность пеленгования тем меньше, чем больше количество волн, для оценки предельно больших ошибок пеленгования можно пользоваться формулами (12), (13), полученными в предположении, что мешающая волна одна.

1) Зависимость фазы суммы прямого и отражённых сигналов от пространственной координаты «x», перпендикулярной линии «ИРИ–пеленгатор», является квазипериодической функцией, поскольку фаза сигнала является результатом нелинейного преобразования падающих волн.

2) Спектр зависимости фазы от поперечной координаты «x» содержит составляющие, соответствующие углам прихода отражённых волн, и комбинационные составляющие. Мелкомасштабный период T_l определяется спектральной составляющей, имеющей наибольший уровень. Наименьшая разность между спектральными составляющими амплитудного спектра зависимости фазы от поперечной координаты определяет крупномасштабный период T_g.

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ № 12-08-31315 мол_а.

Литература

1. Шарыгин Г.С. Статистическая структура поля УКВ за горизонтом. – М.: Радио и связь, 1983. – 138 с.

2. Соломоник М.Е. Корреляционные ошибки УКВ угломерных систем / М.Е. Соломоник, Ю.Г. Шатраков, А.М. Расин; ред. М.Е. Соломоник. – М.: Сов. радио, 1973. – 208 с.

3. Barton D.K. Low-altitude tracking over rough surfaces [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://adsabs.harvard.edu/abs/1979easc.conf..224B, свободный (дата обращения: 14.11.2012).

4. Кулёмин Г.П. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами / Г.П. Кулёмин, В.Б. Разсказовский; ред. Б.Д. Замараев ; Академия наук Украинской ССР, Институт радиофизики и электроники. – Киев: Наукова думка, 1987. – 229 с.

5. Денисов В.П. Фазовые радиопеленгаторы / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск: ТУСУР, 2002. – 251 с.

6. Красненко Н.П. Потенциальная точность пеленгования моноимпульсными методами / Н.П. Красненко, Б.С. Рыбаков // Изв. вузов СССР, Радиоэлектроника. – 1975. – Т. 18, № 4. – С. 30–34.

7. Островитянов Р. В. Статистическая теория радиолокации протяженных целей./ Р.В. Островитянов, Ф.А. Басалов. – М.: Радио и связь, 1982. – 232 с.

8. Разсказовский В.Б. Распространение сантиметровых и миллиметровых радиоволн под малыми углами скольжения: модель многократной дифракции на экранах / В.Б. Разсказовский, Ю.Ф. Логвинов // Изв. вузов. Радиофизика. – 2008. – Т. 51, № 8. – С. 700–710.

Аникин Алексей Сергеевич
Аспирант каф. радиотехнических систем ТУСУРа.
Тел.: 8-906-957-95-83
Эл. почта: rbk@sibmail.com

Денисов Вадим Прокопьевич
Д-р техн. наук, профессор каф. радиотехнических систем ТУСУРа.
Тел.: (382-2) 41-36-70
Эл. почта: dvp@ms.tusur.ru

Anikin A.S., Denisov V.P.

Errors in location of radio-frequency sources by mini-antennas in the surface reflection

In the article we describe the analytics for calculation of maximum error in location of radio-frequency sources by mini-antennas under the condition finite number of surface reflection.

Keywords: errors in location, mini-antennas, space pattern distortion of a phase front.