

*А.И. ДОХОВ, канд. техн. наук, В.В. ЖИРНОВ, канд. техн. наук,
С.Н. МАТЮШЕНКО, Л.З. САХНОВСКАЯ*

ПРИНЦИПЫ ЗАЩИТЫ РАДИОПЕЛЕНГАТОРОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЙ ТИПА "АНГЕЛ-ЭХО"

Присутствие вблизи цели мешающих отражений (МО) типа "ангел-эхо" существенно снижает точность измерения угловых координат радиопеленгаторами вследствие искажения сферичности фазового фронта отраженной волны. Эффективный центр, по которому измеряются координаты, может не только располагаться в пределах габаритных размеров группового отражателя, но и выходить за них. Поэтому актуальность защиты радиопеленгаторов в условиях воздействия МО типа "ангел-эхо" не вызывает сомнений.

При анализе возможностей защиты радиопеленгаторов в указанных помеховых условиях рассмотрим случаи, когда МО находятся с объектом в одном элементе разрешения и когда они разнесены и имеют примерно равные ЭПР.

В случае расположения мешающего отражателя и объекта в одном элементе разрешения, если отраженные от них сигналы соизмеримы, нормированная мощность S_1 суммарного сигнала на раскрытой антенне [1]

$$S_1(t) = \frac{1+k^2}{1-k^2} \left[1 + \left(\frac{2k}{1+k^2} \right) \cos 2\varphi(t) \right]. \quad (1)$$

Здесь $\varphi(t) = (2\pi L / \lambda) \cos \omega_a t$, где L — расстояние между МО и объектом; ω_a — частота вращения линии "МО — объект" относительно линии визирования; k — отношение амплитуд напряженностей поля от МО и от объекта.

Кажущийся угол прихода отраженного сигнала к антенне радиопеленгатора изменяется с изменением угла наблюдения линии "МО — объект" и может быть определен как наклон фазового фронта к раскрытию антенны в плоскости вращения. Как правило, линия "МО — объект" вращается относительно РЛС, тогда общая диаграмма рассеяния группового отражателя "МО — объект" в дальней зоне, характеризующаяся амплитудой и фазой, вращается в пространстве со скоростью, в два раза превышающей скорость вращения этой линии, и существует прямая пропорциональность между наклоном фазового фронта к раскрытию и скоростью изменения фазы во времени в центре раскрытия.

Согласно [1] угловая погрешность, отнесенная к центру линии "МО — объект", определяется выражением

$$\delta_Q(t) = \frac{L \sin \omega_a t}{2RS_1(t)} = \frac{L \sin \omega_a t (1 - k^2)}{2R[1 + k^2 + 2k \cos((4\pi L / \lambda) \cos \omega_a t)]}. \quad (2)$$

Здесь величина $(L/R) \sin \omega_a t$ является углом, под которым групповой отражатель виден из точки стояния РЛС. Этот угол меняется пропорционально $1/2S_1(t)$.

Погрешность δ_f по кажущемуся доплеровскому сдвигу пропорциональна скорости изменения во времени фазы в точке приема, причем эта же функция отличается от δ_Q только коэффициентом $2R\omega_a / \lambda$. Тогда

$$\delta_f(t) = \frac{\omega_a L \sin \omega_a t}{\lambda S_1(t)} = \frac{\omega_a L \sin \omega_a t (1 - k^2)}{\lambda [1 + k^2 + 2k \cos((4\pi L / \lambda) \cos \omega_a t)]}. \quad (3)$$

Для оценки кажущегося доплеровского сдвига (3) можно использовать те же кривые для δ_Q угловых погрешностей, что определяется функциональной зависимостью (2) и (3). Эта взаимосвязь позволяет произвести оценку скорости поворота ω_a группового отражателя (линии "МО — объект") по измеренным значениям δ_Q и δ_f . Погрешность по кажущейся радиальной скорости может быть определена из уравнения

$$\delta_v(t) = \frac{\lambda \delta_f(t)}{2} = \frac{\omega_a L \sin \omega_a t}{2S_1(t)} = \frac{\omega_a L \sin \omega_a t (1 - k^2)}{2[1 + k^2 + 2k \cos((4\pi L / \lambda) \cos \omega_a t)]}. \quad (4)$$

В случае, когда L меньше разрешающей способности радиопеленгатора по дальности, можно убедиться, что изменения кажущейся дальности δ_r имеют тот же функциональный характер. Учитывая, что изменение фазы сигнала с несущей частотой эквивалентно временному сдвигу, получаем

$$\delta_r(t) = \frac{L \cos \omega_a t}{2S_1(t)} = \frac{L \cos \omega_a t (1 - k^2)}{2[1 + k^2 + 2k \cos((4\pi L / \lambda) \cos \omega_a t)]}. \quad (5)$$

Максимальное значение флуктуаций дальности наблюдается в случаях, когда МО и объект расположены на линии визирования. Для

других углов наблюдения величина $L \cos \omega_d t$ выражает радиальное разделение МО и объекта. Из сравнения (5) и (2) следует, что для установления закона изменения погрешности по дальности можно использовать те же зависимости флуктуаций угловых погрешностей от t , умножив значения функций на множитель $R \cos \omega_d t / \sin \omega_d t$.

Приведенные выше результаты могут быть идентифицированы с результатами для шума, имеющего ограниченную полосу и распределенного в некоторой области частотного спектра [1]. При этом МО трактуется как узкополосный шум скорости изменения фазы сигнала $d\varphi/dt$ от группы рассеивающих точек, распределенных в пределах радиолокационного элемента разрешения. Форма напряжения шума аналогична эхо-сигналу от группового отражателя, амплитуда и фаза которого определяются разными углами наблюдения α . Кажущееся угловое положение цели, наблюдаемое радиопеленгатором, находится из скорости изменения фазы по координате α ($\delta_Q = (\lambda / 2\pi R) d\varphi / d\alpha$). На рис. 1 — 6 приведены гистограммы флуктуаций отношения амплитуды отраженных сигналов от МО и объекта, кажущегося углового положения δ_Q групповой цели в зависимости от времени $t = n\Delta t$. Кривая 1 соответствует $D = 1000$, 2 — 500, 3 — 100.

Используя зависимости, показанные на рис. 2 — 6, можно вывести выражения для законов распределения вероятностей флуктуаций кажущегося положения цели, доплеровского сдвига, радиальной скорости и кажущейся дальности при известном распределении флуктуаций отношения амплитуды сигналов k от МО и объекта. Это распределение типа Вейбулла либо логарифмически нормальное. При этом из экспериментальных данных вытекает, что с уменьшением угла места лоцирования статистику МО типа "ангел-эхо" (соответственно и k) более адекватно описывает логарифмически нормальное распределение. При больших углах места лоцирования статистика МО более соответствует распределению Вейбулла при $\eta = 2$, т.е. распределению Релея.

Для нахождения вида плотности вероятностей распределения флуктуаций угловых погрешностей $P(\delta_Q)$ воспользуемся известным соотношением [2] $P(\delta_Q) = P(f(\delta_Q)) |df(\delta_Q) / d\delta_Q|$, где $f(\delta_Q) = k$ находится из (2) путем решения уравнения

$$\delta_Q (1^2 + k + 2k \cos \alpha) = C^2 (1 - k). \quad (6)$$

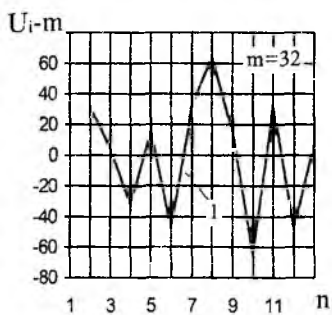
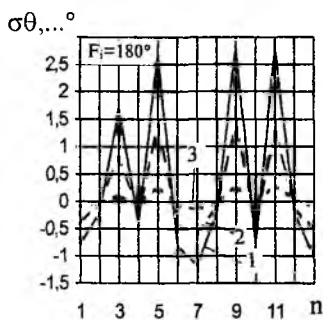
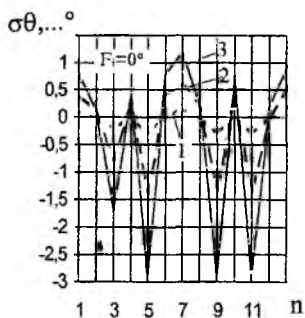


Рис. 1



$R = 10 \text{ км}$

Рис. 2



$R = 10 \text{ км}$

Рис. 3

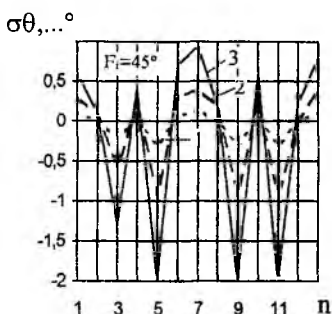


Рис. 4

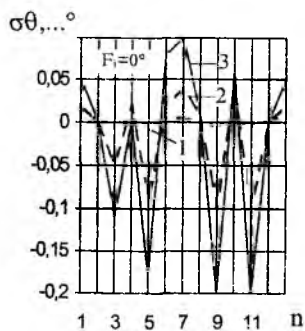


Рис. 5

$R = 150 \text{ км}$

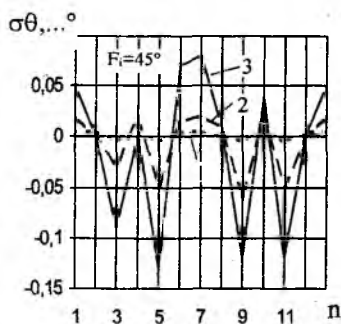


Рис. 6

Здесь $C = L \sin \omega_d / 2R$; $\alpha = (4\pi L / \lambda) \cos \omega_d$.

Общее решение уравнения (6) имеет вид

$$k_{1,2} = (-\delta_Q \cos \alpha \pm \sqrt{C^2 - \delta_Q^2 \sin^2 \alpha}) / (\delta_Q + C). \quad (7)$$

Определим возможные значения k с учетом того, что $k \geq 0$, при различных граничных условиях.

1. При $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ кажущееся угловое положение δ_Q лежит в пределах углов, под которыми виден групповой объект, т.е. $\delta_Q \leq C$. Тогда из (7) получим

$$f(\delta_Q) = k(\delta_Q) = (C - \delta_Q) / (C + \delta_Q); |df(\delta_Q) / d\delta_Q| = 2C / (C + \delta_Q)^2.$$

2. При $\alpha > 90^\circ$ кажущееся угловое положение $\delta_Q > C$ и вблизи 180° может быть намного больше углового размера C группового объекта. При этом

$$f(\delta_Q) = k(\delta_Q) = (\delta_Q - C) / (\delta_Q + C); |df(\delta_Q) / d\delta_Q| = 2C / (C + \delta_Q)^2.$$

С учетом полученных зависимостей $f(\delta_Q)$, $df(\delta_Q) / d\delta_Q$ для разных значений α получены следующие виды законов распределений вероятностей флуктуаций кажущегося углового положения цели:

1. Для больших углов мест лоцирования и $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$

$$P_1(\delta_Q) = \frac{4(C - \delta_Q)C}{\sigma^2(C + \delta_Q)^3} \exp\left(-\left[\frac{C - \delta_Q}{(C + \delta_Q)\sigma}\right]^2\right), \quad (8)$$

а когда $\alpha \approx 180^\circ$, то

$$P_1(\delta_Q) = \frac{4(\delta_Q - C)C}{\delta^2(\delta_Q + C)^3} \exp\left(-\left[\frac{\delta_Q - C}{(\delta_Q + C)\delta}\right]^2\right). \quad (9)$$

2. Для малых углов мест лоцирования и $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$

$$P_2(\delta_Q) = \frac{2C}{\sqrt{2\pi\sigma_z(C^2 - \delta_Q^2)}} \exp\left[-\left(\ln \frac{C - \delta_Q}{C + \delta_Q} - M_z\right)^2 / (2\sigma_z^2)\right], \quad (10)$$

а когда $\alpha \approx 180^\circ$, то

$$P_2(\delta_Q) = \frac{2C}{\sqrt{2\pi\sigma_z(\delta_Q^2 - C^2)}} \exp\left[-\left(\ln \frac{\delta_Q - C}{\delta_Q + C} - M_2\right)^2 / (2\sigma_z^2)\right]. \quad (11)$$

Выражения для законов распределения плотности вероятностей флуктуации кажущегося доплеровского сдвига $P_{1,2}(\delta_f)$, кажущейся радиальной скорости $P_{1,2}(\delta_v)$ и кажущейся дальности $P_{1,2}(\delta_r)$ отличаются от полученных для δ_Q выражений, поскольку для коэффициентов C справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} C_f &= (\omega_a L \sin \omega_a t) / \lambda; & C_v &= (\omega_a L \sin \omega_a t) / 2; \\ C_r &= (L \cos \omega_a t) / 2. \end{aligned} \quad (12)$$

Для ситуации, когда групповой отражатель состоит из МО типа "ангел-эхо" с приведенными выше распределениями и объекта со стационарным вторичным излучением гауссовского распределения со средним $E_1(t)$, среднеквадратические погрешности находятся по формулам

$$\delta_Q = AL_x / R; \quad \delta_f = A(2L_x \omega_a) / \lambda; \quad \delta_v = AL_x \omega_a; \quad \delta_r = AL_n,$$

где L_x — ширина групповой цели; L_n — длина групповой цели; A — коэффициент, по модельным экспериментам $A = 0,3$. Значения δ_Q получают в радианах, δ_f — в герцах, δ_v — в метрах в секунду, δ_r — в долях L .

Как следует из приведенного выше, при некоторых внешних условиях расположения МО и объекта эхо-сигналы от рассеивающих образований могут приводить к возникновению больших погрешностей измерений радиопеленгаторами. Используемые в РЛС методы защиты от малоподвижных отражателей (схемы СДЦ или фильтрация по доплеровскому сдвигу частоты) в данной ситуации малоэффективны по той причине, что эхо-сигналы от МО типа "ангел-эхо" по доплеровскому спектру перекрывают доплеровский сдвиг эхо-сигналов подвижных объектов, хотя и улучшают отношение сигнал-помеха.

Существенное улучшение отношения сигнал-помеха (S/I) при отражении радиолокационных сигналов МО типа "ангел-эхо" можно получить, применив круговую поляризацию. Это связано с тем, что неоднородности атмосферы в виде турбулентных вихрей, характерных для МО типа "ангел-эхо", имеют цилиндрическую или сферическую форму, а отраженные от них волны — обратную круговую поляризацию. Сложным объектам в определенной степени свойственно рассея-

ние электромагнитных волн с обеими поляризациями, в связи с чем примерно до половины отраженной энергии может исключаться за счет поляризации приемной антенны.

Снижения погрешности, обусловленной отражениями от окружающего объект МО, можно добиться путем уменьшения размеров элемента разрешения. Для снижения погрешностей, вызванных воздействием мешающих сигналов от более удаленных от объекта отражателей, необходимо уменьшать уровень боковых лепестков по соответствующей координате.

Погрешности кажущегося положения объекта и доплеровского сдвига, присущие самому отраженному сигналу, можно достаточно быстро измерить моноимпульсными угломерными системами (радиопеленгаторами) и значительной частью детекторов сигнала погрешности по дальности и доплеровскому сдвигу (например, временными фазовыми и частотными дискриминаторами и счетчиками циклов), чтобы приблизиться к точности, определяемой отношением сигнал-шум. При этом характерные флуктуации отраженного сигнала от МО типа "ангел-эхо" (рис. 1), нестационарные во времени, трансформируются в подобные же флуктуации кажущегося углового положения, доплеровского сдвига и дальности во времени (см. рис. 2 — 6).

Исходя из сказанного, для защиты радиопеленгаторов от МО, приводящих к указанным ранее погрешностям, можно предложить следующие методы:

1. По некоторой выборке измеренных значений провести статистический анализ флуктуации измерений углового положения объекта (амплитуды сигнала на выходе фазового детектора), доплеровского сдвига (амплитуда сигнала на выходе узкополосного фильтра) и дальности (на выходе временного дискриминатора). По результатам оценки параметров распределения организовать процедуры учета и компенсации погрешностей. Недостаток метода заключается в том, что появляется задержка на время оценки параметров распределения.

2. Организовать непрерывную оценку степени корреляции между погрешностями или амплитудами на выходе дискриминаторов (фазового, амплитудного или временного) от одного наблюдения к другому, поскольку эта процедура определяет эффективность сглаживания выходных данных измерительной системы. Декорреляция может быть вызвана изменением частоты РЛС или такими перемещениями отражателей:

— взаимным перемещением группы отражателей самого объекта при его вращении относительно линии визирования. При равномерном распределении рассеивателей в пределах объекта временной интервал t_c , с, и частотный интервал f_c , Гц, корреляции определяются

выражениями [1]: $t_c = \lambda / (2\omega_a L_x)$; $f_c = c / (2L_z)$, где c — скорость света. При $L_x = L_z = 10$ м, $\omega_a = 0,01$ рад/с, $\lambda = 3$ см значения $t_c = 0,15$ с, $f_c = 15$ МГц;

— взаимным перемещением группы отражателей МО типа "ангел-эхо";

— вращением группового отражателя "МО — объект" относительно линии визирования.

Интервалы корреляции соответствуют разности времен или частот между измерениями, которые можно рассматривать как некоррелированные. В тех случаях, когда измерения производятся непрерывно или в течение очень коротких интервалов, эффективное количество независимых выборок не превышает $n_e = 1 + (t_o / t_c)$, если весь период наблюдения равен t_o . Точно так же при измерениях в интервалах, разделенных небольшими промежутками в пределах полосы частот Δf , получится $n_e = 1 + (\Delta f / f_c)$ независимых выборок погрешности. Например, при длине МО $L_z = 150$ м и ширине $L_x = 100$ м, $\omega_a = 0,01$ рад/с, время корреляции $t_c = 0,05$ с, а ее частота $f_c = 1$ МГц; радиопеленгатор будет наблюдать в секунду около 20 независимых выборок погрешностей.

Одной из мер по защите радиопеленгаторов от интенсивных флуктуирующих погрешностей при пролете объекта вблизи МО типа "ангел-эхо" является сглаживание выходных данных. При этом представляет интерес количество независимых выборок погрешностей, заключенных в интервале сглаживания. С учетом эффективного количества выборок СКО погрешностей после операции сглаживания определяется выражением $\sigma_{Q,f,v} = \sigma_{Q,f,v} / \sqrt{n_e}$.

Таким образом, путем непрерывной оценки степени корреляции между координатными погрешностями или амплитудами на выходе дискриминаторов (фазового, амплитудного либо временного) можно установить моменты возникновения декорреляции за счет появления МО вблизи цели, принять меры по сглаживанию флуктуации погрешностей и, если есть возможность, применить специальные методы компенсации этих погрешностей.

Список литературы: 1. Бартон Д., Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям: Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1976. 391 с. 2. Абезгауз Г.Г., Тронь А.П., Копенкин Ю.Н. Справочник по вероятностным расчетам. М.: Воениздат, 1970. 536 с.

Харьковский государственный технический университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 11.02.97