

Эти закономерности можно использовать для анализа зеркального многолучевого пространства с очень малыми углами места цели.

#### Библиографический список

1. Barton D. K. Radar System Analysis and Modeling, Artech House, 2005.
2. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука, 1972.
3. Sherman S. M., Barton D. K. Monopulse Principles and Techniques, Artech House, 2011.
4. Черный Ф. Б. Распространение радиоволн. М.: Зарубежное радио, 1972.

УДК 621.396

### КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ НИЗКОЛЕТЯЩИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Г. А. Ершов, В. Д. Сухотерин, В. А. Сеницын

*АО «Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры»  
Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова*

Рассмотрен метод комплексной оценки угловых координат низколетящих летательных аппаратов в условиях влияния переотражений от земной поверхности. Представлены аналитические выражения для вычисления угла места летательного аппарата, находящегося на малых углах места, при работе посадочного радиолокатора в условиях многопутного распространения радиоволн.

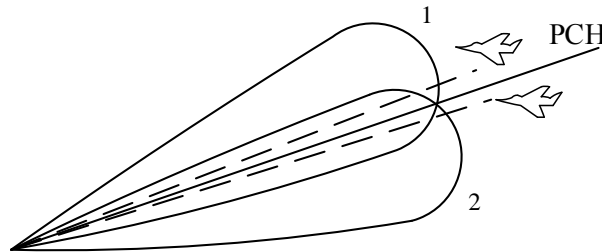
Посадочные радиолокаторы (ПРЛ) обеспечивают самый сложный и ответственный элемент полета летательного аппарата (ЛА) – заход на посадку, поэтому к ПРЛ предъявляются довольно жесткие требования по точности и достоверности радиолокационной информации. Точность измерения угловых координат летательных аппаратов, заходящих на посадку, является важной задачей при обеспечении безопасности полетов военной авиации.

На точность определения угловых координат летательных аппаратов моноимпульсным посадочным радиолокатором влияет ряд факторов. Одним из основных факторов, связанным условиями распространения радиоволн, является переотражения от поверхности земли.

Физическая причина возникающих трудностей точного определения угломестных координат низколетящих целей связана с тем, что облучение ЛА, располагающихся на малых углах места над подстилающей поверхностью, сопровождается облучением этой поверхности и, как следствие, формированием не только сигнала, отраженного от ЛА, но и сигнала, отраженного от подстилающей поверхности. Это обстоятельство влияет на работу РЛС и приводит к ошибке определения угломестной координаты ЛА вследствие искажений пеленгационной характеристики РЛС в угломестной плоскости, вид и степень которых зависят от взаимного расположения ЛА и антенной системы РЛС, а также от отражательных и поглощающих свойств подстилающей поверхности. В частности, изменяется крутизна пеленгационной характеристики и смещается положение ее нуля в угломестной плоскости, что приводит к ошибкам определения угломестной координаты цели, а при определенных условиях – к срыву сопровождения.

Моноимпульсный радиолокатор формирует в вертикальной плоскости две перекрещивающиеся диаграммы направленности (ДН) антенны, разнесенные на определенный угол от равносигнального направления (РСН) (рисунок 1). Разница между напряжениями, измеренными по верхнему и нижнему лепестку диаграммы направленности дает информацию об угле отклонения цели от равносигнального направления. Если  $V_1 - V_2 > 0$ , то цель находится в области

верхнего лепестка ДН над РСН, если  $V_1 - V_2 < 0$ , то цель находится в области нижнего лепестка ДН ниже РСН и, если  $V_1 = V_2$ , то цель находится на равносигнальном направлении [1].



$V_1$  = Величина сигнала по верхнему лепестку  
 $V_2$  = Величина сигнала по нижнему лепестку

Рис. 1. Принцип работы моноимпульсного радиолокатора

Отношение  $\Delta/\Sigma$  является нормированным разностным сигналом или нормированным сигналом ошибки. Эта величина используется как оценка углового положения цели. Нормировка разностного сигнала является операцией, необходимой для устранения зависимости величины оценки угловых координат от силы отраженного сигнала.

Рассмотрим случай одиночной цели.

Предположим, что ЛА расположен на угле места  $\theta_1$  по отношению к равносигнальному направлению, а между угловым отклонением цели от РСН и значением нормированного разностного сигнала существует линейная зависимость [2, 3]

$$\frac{\Delta}{\Sigma} = \mu\theta_1 \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент угловой чувствительности;  $\theta_1$  – угловое отклонение цели от РСН.

Разделив обе части формулы **Ошибка! Источник ссылки не найден.** на  $\mu$ , получаем

$$\frac{1}{\mu} \frac{\Delta}{\Sigma} = \theta_1 \quad (2)$$

Выражение  $(1/\mu)(\Delta/\Sigma)$  в левой части **Ошибка! Источник ссылки не найден.** – это формируемая в системе величина, которая может рассматриваться как оценка угловой координаты, а величина  $\theta_1$  – это истинный геометрический угол отклонения цели относительно РСН.

В случае одиночной цели отношение  $\Delta/\Sigma$  в (1) является действительной величиной, так как  $\Delta$  и  $\Sigma$ , по определению, находятся в фазе или в противофазе. То есть в обычных моноимпульсных суммарно-разностных РЛС в канале измерения одной угловой координаты оценивают реальную составляющую нормированного разностного сигнала.

$$\text{Re}(\Delta/\Sigma) = \frac{|\Delta|}{|\Sigma|} \cos \varphi_s \quad (3)$$

Появление в одной ячейке разрешения РЛС двух целей вызывает ошибки в определении координат. При наблюдении РЛС неразрешаемых целей значения  $\Delta$  и  $\Sigma$  могут иметь любую относительную фазу и отношение  $\Delta/\Sigma$ , следовательно, в общем случае будет комплексным.

Для демонстрации этого утверждения рассмотрим две независимые неразрешаемые цели, разнесенные на угол  $\theta_1$  и угол  $\theta_2$  соответственно относительно РСН. Хотя по условию считаем, что обе цели расположены в одном элементе разрешения по дальности, в общем случае имеется некоторая относительная разность фаз между сигналами, отраженными от этих целей. Будем считать, что цели расположены на противоположных направлениях относительно РСН (справа и слева). Положим, что первая цель имеет положительный нормированный раз-

ностный сигнал, т.е. разностный сигнал  $\Delta_1$  будет в фазе с  $\Sigma_1$ , так как первая цель находится над РСН. Нормированный разностный сигнал второй цели  $\Delta_2$  – в противофазе с  $\Sigma_2$ , так как вторая цель находится ниже РСН. Результирующий разностный сигнал равен  $\Delta$  (рис. 2).

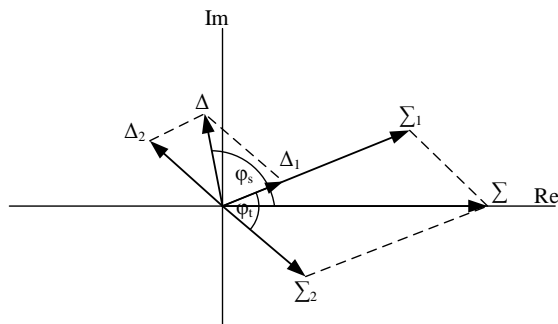


Рис. 2. Суммарные и разностные вектора сигналов при наблюдении двух целей

Из рис. 2 видно, что сигнал  $\Delta$  имеет две составляющие – в квадратуре и в фазе с сигналом  $\Sigma$ . Таким образом, отношение  $\Delta/\Sigma$  является комплексным. Из-за разницы длины распространения радиоволн от первой и второй цели и фазового сдвига в точке отражения, существует разность фаз  $\varphi_r$  между сигналами от первой и второй цели. Между суммарным и разностным сигналами существует разность фаз  $\varphi_s$ . Если сигналы  $\Sigma_1$  и  $\Sigma_2$  в противофазе (сдвиг  $180^\circ$ ) и имеют примерно равные амплитуды, отношение  $\Delta/\Sigma$  может быть очень большим.

Приведенные рассуждения, конечно, справедливы не только для случая, когда цели расположены с обеих сторон РСН.

Для решения задачи обеспечения точности измерения малых углов места моноимпульсной РЛС предлагается использовать квадратурную составляющую

$$\text{Im}(\Delta / \Sigma) = \frac{|\Delta|}{|\Sigma|} \sin \varphi_s \quad (4)$$

В таком случае выражение (2) носит комплексный характер

$$\frac{1}{\mu} \frac{\Delta}{\Sigma} = \frac{|\Delta|}{|\Sigma|} e^{j\varphi_s} = \frac{|\Delta|}{|\Sigma|} \cos \varphi_s + j \frac{|\Delta|}{|\Sigma|} \sin \varphi_s = x + iy \quad (5)$$

где  $x$  и  $y$  – соответственно действительная и мнимая части комплексной оценки углового отклонения цели от РСН.

Результирующий суммарный сигнал в соответствии с рисунком 3 равен

$$\Sigma = \Sigma_1 + \Sigma_2 \quad (6)$$

Из выражения (2) следует, что разностные сигналы равны

$$\Delta_1 = \mu\theta_1\Sigma_1, \quad \Delta_2 = \mu\theta_2\Sigma_2 \quad (7)$$

Тогда для результирующего разностного сигнала справедливо следующее

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \mu(\theta_1\Sigma_1 + \theta_2\Sigma_2) \quad (8)$$

Обозначим отношение векторов суммарных сигналов как

$$\frac{\Sigma_2}{\Sigma_1} = g\rho e^{j\varphi} \quad (9)$$

где  $g$  – отношение квадратов коэффициентов усиления антенны по напряжению в направлениях на цель и ее зеркальное изображение;  $\rho$  – модуль коэффициента зеркального отражения;  $\varphi$  – относительная разность фаз отраженных сигналов от двух целей. Как величина  $g$ , так и  $\rho$  являются неотрицательными и действительными.

Используя формулы (6) и (8) на основании (1) получаем оценку угла места цели

$$\theta_i = \frac{1}{\mu} \frac{\Delta}{\Sigma} = \frac{1}{\mu} \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{\Sigma_1 + \Sigma_2} = \frac{\theta_1 \Sigma_1 + \theta_2 \Sigma_2}{\Sigma_1 + \Sigma_2} \quad (10)$$

Разделив правую часть (числитель и знаменатель) (10) на  $\Sigma_1$  и используя формулу (9), имеем

$$\theta_i = \frac{1}{\mu} \frac{\Delta}{\Sigma} = \frac{\theta_1 + \theta_2 gre^{j\varphi}}{1 + gre^{j\varphi}} \quad (11)$$

Формула (11) является основной для определения комплексной оценки углового положения двух неразрешаемых целей. Выделим действительную и мнимую части выражения (11), умножив на комплексно сопряженное

$$\begin{aligned} \theta_i &= \frac{\theta_1 + \theta_2 gre^{j\varphi}}{1 + gre^{j\varphi}} \frac{1 + gre^{-j\varphi}}{1 + gre^{-j\varphi}} = \frac{\theta_1 + \theta_1 gre^{-j\varphi} + \theta_2 gre^{j\varphi} + \theta_2 (gr)^2}{1 + gre^{-j\varphi} + gre^{j\varphi} + (gr)^2} = \\ &= \frac{\theta_1 + \theta_2 (gr)^2 + \theta_1 gr(\cos \varphi - j \sin \varphi) + \theta_2 gr(\cos \varphi + j \sin \varphi)}{1 + (gr)^2 + 2gr \cos \varphi} \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, реальная составляющая определяется следующим выражением

$$\text{Re}(\theta_i) = \frac{\theta_1 + (\theta_1 + \theta_2)gr \cos \varphi + \theta_2 (gr)^2}{1 + 2gr \cos \varphi + (gr)^2} \quad (13)$$

и мнимая составляющая

$$\text{Im}(\theta_i) = \frac{(\theta_2 - \theta_1)gr \sin \varphi}{1 + 2gr \cos \varphi + (gr)^2} \quad (14)$$

Описанный метод применим также и к случаю зеркальных переотражений от земной поверхности.

В процессе зондирования РЛС пространства отраженные от цели сигналы попадают в главный луч диаграммы направленности антенны РЛС не только по прямому пути, но и другими путями. Ошибки многолучевости являются частным случаем углового шума от двух источников, возникающего в результате особенности геометрии, показанной на рисунке 4, когда цель и точка отражения от поверхности земли в направлении луча РЛС являются двумя источниками отраженного сигнала [4, 5].

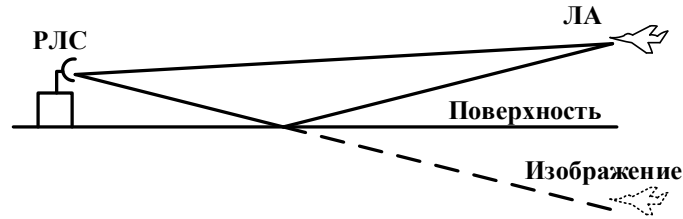


Рис. 3. Геометрия зеркального отражения от ЛА в условиях многолучевости

Свяжем компоненты комплексной оценки углового положения цели с истинными геометрическими углами прихода прямого сигнала от цели и его зеркального отражения от поверхности земли. Вместо символов  $\theta_1$  и  $\theta_2$ , используемых ранее для указания углов места двух целей относительно РСН, введем новые обозначения:  $\theta_{ц}$  - истинный угол места цели и  $\theta_{рчн}$  - угловое положение РСН. Указанные углы отсчитываются относительно горизонта. Соотношения, связывающие два вида обозначения углов, следующие

$$\theta_1 = \theta_{ц} - \theta_{рчн} \quad (15)$$

$$\theta_2 = -\theta_{ц} - \theta_{рчн} = -\theta_1 - 2\theta_{рчн} \quad (16)$$

Для вычисления величины комплексной оценки угла места цели  $\theta_i$  подставим (15) и (16) в формулу (11).

Получаем в результате

$$\theta_i = \frac{1}{\mu} \frac{\Delta}{\Sigma} = \frac{(\theta_{\text{ц}} - \theta_{\text{рчн}}) - gre^{j\varphi}(\theta_{\text{ц}} + \theta_{\text{рчн}})}{1 + gre^{j\varphi}} \quad (17)$$

или

$$\theta_i = \frac{1}{\mu} \frac{\Delta}{\Sigma} = -\theta_{\text{рчн}} + \theta_{\text{ц}} \frac{1 - gre^{j\varphi}}{1 + gre^{j\varphi}} \quad (18)$$

Выражая действительную и мнимую части, получим

Действительная часть

$$x = \text{Re}\left\{\frac{1}{\mu} \frac{\Delta}{\Sigma}\right\} = -\theta_{\text{рчн}} + \theta_{\text{ц}} \frac{1 - g^2 r^2}{1 + g^2 r^2 + 2gr \cos \varphi} \quad (19)$$

и мнимая часть

$$y = \text{Im}\left\{\frac{1}{\mu} \frac{\Delta}{\Sigma}\right\} = -\theta_{\text{ц}} \frac{2gr \sin \varphi}{1 + g^2 r^2 + 2gr \cos \varphi} \quad (20)$$

Относительная фаза имеет две составляющие

$$\varphi = \varphi_s + \Delta\varphi \quad (21)$$

где  $\varphi_s$  – фаза коэффициента отражения  $\rho$  от поверхности, а  $\Delta\varphi$  – разность фаз, соответствующая разности хода лучей

$$\Delta\varphi = -4\pi \frac{h}{\lambda} \sin \theta_{\text{ц}} \quad (22)$$

где  $h$  – высота центра антенны над поверхностью земли, а  $\lambda$  – длина волны РЛС. Величины  $g$  и  $\varphi_s$  являются функциями частоты, поляризации и угла места.

Выражения (19) и (20) служат основой для получения оценок истинных значений угла места цели при наличии многопутной составляющей в принимаемом сигнале в режиме моноимпульсного определения координат.

Все величины  $g$ ,  $r$  и  $\varphi$  являются функциями угла  $\theta_{\text{ц}}$ . Отношение амплитуд  $r$ , которое может лежать в пределах от 0 до 1, соответствует модулю коэффициента отражения  $\rho$  от поверхности.

Если угол места цели достаточно мал ( $\theta_{\text{ц}} \leq 1$ ), а поверхность земли гладкая, то можно предположить, что величина  $r \approx 180^\circ$ , а  $\varphi_s \approx 180^\circ$ .

Все величины в правой части являются или постоянными, или функциями только угла  $\theta_{\text{ц}}$ . Поэтому, зная диаграмму направленности приемной антенны, текущее положение РСН  $\theta_{\text{рчн}}$ , измеряя  $x$  и  $y$  при приеме одного импульса, то можно определить неизвестную величину  $\theta_{\text{ц}}$ .

Таким образом, при заданных положениях РСН по углу места можно заранее рассчитать калибровочные кривые, по которым будет определена оценка угла места цели (рис. 4).

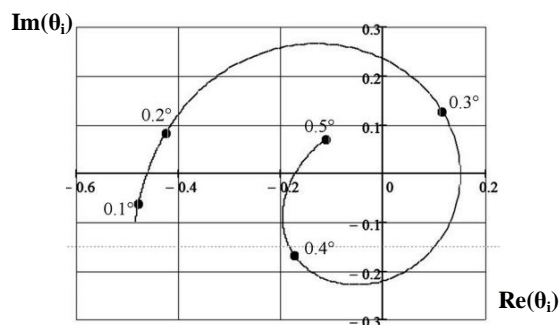


Рис. 4. Геометрия зеркального отражения от ЛА в условиях многолучевости

Эти кривые можно получить и путем измерений при испытательных облетах РЛС. Полученные калибровочные кривые, или соответствующие таблицы значений  $x$  и  $y$ , могут использоваться для сравнения с результатами расчетов на ЭВМ или непосредственно с показателями на индикаторе РЛС. В этом случае измерения комплексной оценки угла дают некоторую точку на калибровочной кривой, а величина  $\theta_{ц}$ , соответствующая этой точке, является углом места цели (если, конечно, нет шумов или других источников ошибок).

Метод измерения угла места, основанный на использовании комплексной оценки угла места, не требует изменения структуры антенной системы. Измерение комплексной оценки угла может быть просто режимом работы РЛС.

#### Библиографический список

1. *Леонов А. И.* Моноимпульсная радиолокация. М.: Радиосвязь, 1984.
2. *Sherman S. M., Barton D. K.* Monopulse Principles and Techniques, Artech House, 2011.
3. *Сухотерин В. Д.* Уменьшение влияния многолучевого рассеяния при обработке сигналов в моноимпульсном посадочном радиолокаторе // Труды X ОНПК «Инновационные технологии и технические средства специального назначения». СПб: БГТУ «Военмех», 2018. С. 410 – 413.
4. *Сколник М. И.* Справочник по радиолокации. Книга 1. М.: Техносфера, 2014.
5. *Barton D. K.* Radar System Analysis and Modeling, Artech House, 2005.

УДК 621.396.969

### О ВЛИЯНИИ ТОЧНОСТИ НАВИГАЦИОННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЕТОВ ПИЛОТИРУЕМЫХ И БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**В. А. Завьялов, А. М. Максимов, С. Г. Петухов, В. А. Сеницын**

*АО «Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры»  
Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова*

Точность средств радионавигации выражается статистической мерой погрешности системы и указывается как:

1. прогнозируемая – точность местоположения летательного аппарата (ЛА) относительно земных географических или геодезических координат;