

УДК.621.396.61

Н.Д. Рысаков, В.В. Куценко, И.Л. Костенко, И.В. Титов, В.Г. Карев

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

## ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМОВ РАБОТЫ КОГЕРЕНТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ И ИЗМЕРИТЕЛЕЙ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ МОНОИМПУЛЬСНОЙ РЛС АВТОСОПРОВОЖДЕНИЯ ПОСАДКИ САМОЛЕТА ПРИ СУММАРНО-РАЗНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ ОТРАЖЕНИЙ

В работе обосновывается возможность определения знака углового отклонения самолета от равносигнального направления антенны с помощью когерентного накопителя моноимпульсной РЛС автосопровождения с суммарно-разностной обработкой отражений в зоне посадки. Уточняется алгоритм работы и особенности построения когерентного накопителя для определения знакового коэффициента, а также алгоритм работы измерителя угловых координат для диаграммы направленности зеркальной антенны. Анализируется методическая ошибка измерителей угловых координат при таких накопителях и антенне.

**Ключевые слова:** моноимпульсная РЛС, автосопровождение, кольцевой мост, равносигнальное направление, диаграмма направленности, когерентный накопитель.

### Вступление

**Постановка проблемы.** Реализация в моноимпульсной РЛС (МРЛС) суммарно-разностной обработки и доплеровской фильтрации отражений выдвигает проблемную задачу по определению знака углового отклонения самолета от равносигнального направления (РСН) антенны. Это связано с тем, что применение когерентных накопителей (КН) обзорных РЛС в МРЛС автосопровождения (АС) приводит к потере информации о полярности амплитуд накопленных импульсов разностного канала, то есть приводит к неоднозначности измерения углов отклонения самолета от РСН.

**Анализ последних публикаций.** В работе [1] обосновывается целесообразность использования для управления посадкой самолетов МРЛС АС с амплитудной или суммарно-разностной обработкой и доплеровской фильтрацией отражений. В работах [2, 3] предложены два варианта (фазовый и амплитудный) устранения неоднозначности измерения угловых координат в МРЛС АС с суммарно-разностной обработкой и доплеровской фильтрацией отраженных импульсов. В работах [1 – 3] излагаются проблемы построения МРЛС АС для идеальной диаграммы направленности (ДН) и в предположении, что КН с достаточной точностью определяет амплитуды накопленных импульсов каждого лепестка ДН. В работе [4] обосновываются особенности работы КН и измерителей координат моноимпульсной РЛС автосопровождения самолета с амплитудной обработкой и для ДН, описываемой выражением для прямоугольной площадки с синусоидальным распределением поля.

**Цель статьи.** В статье обосновывается возможность определения когерентным накопителем полярности разностного лепестка ДН зеркальной

антенны. Уточняются алгоритмы работы и принципы построения такого накопителя, а также алгоритмы работы измерителей угловых координат МРЛС АС с суммарно-разностной обработкой отражений.

### Изложение основного материала

Для осуществления углового АС самолета в зоне посадки [1] в МРЛС формируется парциальная диаграмма направленности (ДН) антенны  $F(\theta)$  в каждой плоскости из двух лепестков  $F_1(\theta)$  и  $F_2(\theta)$ . Для этого облучатели каждого лепестка смещаются в каждой плоскости на угол  $\theta_{см}$ , обеспечивающий совмещение максимума одного лепестка с нулем другого (рис. 1).

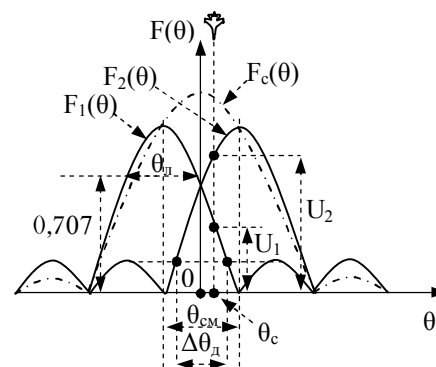


Рис. 1. Принцип смещения лепестков ДН для каждой плоскости автосопровождения

При амплитудной обработке отраженные импульсы, принятые каждым лепестком, обрабатываются отдельным приемником. При этом информация об угле  $\theta_c$  отклонения сопровождаемого самолета содержится в соотношении  $U_1 / U_2$  амплитуд импульсов на выходах двух приемников.

Эта зависимость координаты  $\theta_c$  для определенных пределов  $\Delta\theta_d$  изменения  $\theta_c$ , связанных с уровнем первого бокового лепестка, сохраняется для соотношения амплитуд накопленных импульсов  $U_{н1}/U_{н2}$  на выходах КН этих приемных трактов.

Для идеальной ДН (рис. 1), описываемой выражением:

$$F(\alpha \pm 0,5) = \frac{\sin(\pi(\alpha \pm 0,5))}{\pi(\alpha \pm 0,5)}, \alpha = \frac{\theta_c}{\theta_{см}}, \quad (1)$$

$$\theta_{см} = \lambda/L \approx 1,13 \theta_d,$$

где  $\lambda$  – длина волны;  $L$  – размер раскрыва зеркала в рассматриваемой плоскости;  $\theta_d$  – ширина лепестка ДН зависимость угловой координаты  $\theta_c$  от отношения  $U_{н1}/U_{н2}$  и допустимые пределы изменения этого отношения  $U_{н1}$  описываются выражениями [2]:

$$\theta_c = 0,5\theta_{см} \frac{1 - U_{н1}/U_{н2}}{1 + U_{н1}/U_{н2}}, \quad (2)$$

$$4,4 \geq U_{н1}/U_{н2} \geq 0,227.$$

При этом допустимые пределы  $\Delta\theta_d$  изменения измеряемого угла составляют величину:

$$\Delta\theta_d \approx 0,63\theta_{см}.$$

Очевидно, что точность измерения угла  $\theta_c$  по алгоритму (2) будет существенно зависеть от точности определения накопителем амплитуд накопленных импульсов  $U_{н1}$ ,  $U_{н2}$  и от точности описания реальной ДН выражением (1).

В работе [4] уточнены особенности работы КН для достижения приемлемой точности определения накопителем амплитуд накопленных импульсов  $U_{н1}$  и  $U_{н2}$ , а также предложен алгоритм работы измерителя угловой координаты в каждой плоскости для лепестков ДН, описываемой выражением ДН прямоугольной площадки при косинусоидальном распределении амплитуд [5]:

$$F(\theta_c \pm \frac{\theta_{см}}{2}) = \frac{\cos(1,5\pi(\alpha \pm 0,5))}{1 - (3(\alpha \pm 0,5))^2}. \quad (3)$$

В этом случае угловое  $\theta_{см}$  смещение максимума одного лепестка для совмещения с нулем другого лепестков связано описывается выражением:

$$\theta_{см} = 1,5 \frac{\lambda}{L} \approx 1,27\theta_d. \quad (4)$$

Однако для сохранения алгоритма (2) расчета координаты  $\theta_c$  по значениям амплитуд  $U_{н1}$  и  $U_{н2}$  в работе предложено угол смещения лепестков  $\theta_{см1}$  брать несколько меньше

$$\theta_{см1} = 1,16 \theta_d \approx 1,37 \frac{\lambda}{L} \approx 0,91\theta_{см}. \quad (5)$$

Для такого смещения в работе проанализирована и рассчитана ожидаемая точность измерителей угловых координат для РЛС с амплитудной обработкой отражений. Очевидно, что для реальной ДН трудно с достаточной точностью выполнить смещение (5) облучателей зеркала, удовлетворяющее алгоритму (2) расчета координаты  $\theta_c$ . Поэтому в данной работе будем исходить из смещения облучателей, обеспечивающего совмещение максимума одного лепестка с нулем другого.

Для суммарно-разностной обработки и доплеровской фильтрации отражений зависимость угла отклонения  $\theta_c$  самолета от РСН в одной плоскости для лепестков ДН (1) от соотношения  $U_{\Deltaн}/U_{\Sigmaн}$  амплитуд накопленных в КН импульсов разностного и суммарного приемных трактов [2] описывается выражением:

$$|\theta_c| = 0,5\theta_{см} \frac{U_{\Deltaн}}{U_{\Sigmaн}}, \quad (6)$$

то есть определяется только величина отклонения и не определяется знак (сторона) отклонения от РСН. Для снятия такой неопределенности необходимо в алгоритмы работы накопителей [4] внести изменения – ввести дополнительную операцию по вычислению знакового  $k_{зн}$  коэффициента отклонения самолета от РСН:

$$\theta_c = 0,5\theta_{см} \frac{k_{зн} U_{\Deltaн}}{U_{\Sigmaн}}, \quad (7)$$

где  $k_{зн} = +1$  или  $k_{зн} = -1$  в зависимости от стороны отклонения самолета от РСН.

Исходя из принципов построения МРЛС с суммарно-разностной обработкой отраженных радиоимпульсов [1 – 3] амплитуды импульсов суммарного  $U_{\Sigma}$  и разностного  $U_{\Delta}$  приемных каналов можно описать выражениями:

$$\begin{aligned} U_{\Sigma} &= E_m (F_1(\theta_c) + F_2(\theta_c)) \exp(i2\pi F_d t); \\ U_{\Delta} &= E_m (F_2(\theta_c) - F_1(\theta_c)) \exp(i2\pi F_d t), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $F_d$  – доплеровская добавка частоты;  $E_m$  – амплитуда сигнала для  $\theta_c = \theta_{см}/2$  или  $\theta_c = -\theta_{см}/2$ .

На рис. 2 для ДН (3) иллюстрируются зависимости уровней и полярностей суммарного и разностного лепестков ДН на выходах кольцевых мостов [2] соответствующих приемных каналов локатора: при угле  $\theta_{c1} > 0$  отклонения самолета от РСН суммарный  $F_c(\theta)$  и разностный  $F_p(\theta)$  лепестки положительны, а при  $\theta_{c2} < 0$  разностный  $F_p(\theta)$  лепесток становится отрицательным.

Заметим, что для лепестков ДН, описываемых выражением (3), не удастся получить простого аналитического расчетного выражения для зависимости угла  $\theta$  от отношения уровней накопления импуль-

сов разностного и суммарного лепестков –  $U_{\Delta n}(\theta_c)/U_{\Sigma n}(\theta_c)$ . Однако такое приближенное выражение  $\Psi(U_{\Delta n}(\theta_c)/U_{\Sigma n}(\theta_c))$

$$\alpha = \frac{\theta_c}{\theta_{cm}} \approx k_{3n} \Psi\left(\frac{U_{\Delta n}}{U_{\Sigma n}}\right) \quad (9)$$

можно получить расчетным путем. Методика такого расчета излагается ниже.

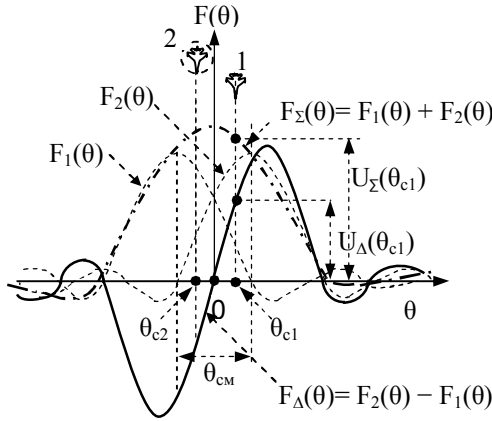


Рис. 2. Иллюстрация зависимости уровней суммарного и разностного лепестков ДН от  $\theta$

Из иллюстраций (рис. 2) видно, что соотношение  $U_{\Delta}(\theta_c)/U_{\Sigma}(\theta_c)$  в пределах углов  $\pm 1,5\theta_{cm}$  принимает положительное или отрицательное значение при положительных или отрицательных углах  $\theta_c$  отклонения самолета от РСН. Поэтому в КН для отношения накопленных импульсов суммарного и разностного сигналов (8) нужно сохранить этот знак, то есть нужно найти значение  $k_{3n}$ .

Алгоритмы весового накопления импульсов напряжения в КН РЛС АС аналогичны алгоритмам работы КН обзорной РЛС. А именно, первоначально осуществляется накопления в  $n$ -х доплеровских фильтрах импульсов косинусного  $U_{\Sigma chn}$  и синусного  $U_{\Sigma shn}$  каналов суммарного сигналов и косинусного  $U_{\Delta chn}$  и синусного  $U_{\Delta shn}$  каналов разностного сигналов:

$$U_{\Sigma chn}(\varphi_d) = \sum_{i=1}^N U_{\Sigma ci} k_i \cos((i-1)(\varphi_d - \varphi_n(n)));$$

$$U_{\Sigma shn}(\varphi_d) = \sum_{i=1}^N U_{\Sigma si} k_i \sin((i-1)(\varphi_d - \varphi_n(n)));$$

$$U_{\Delta chn}(\varphi_d) = \sum_{i=1}^N U_{\Delta ci} k_i \cos((i-1)(\varphi_d - \varphi_n(n)));$$

$$U_{\Delta shn}(\varphi_d) = \sum_{i=1}^N U_{\Delta si} k_i \sin((i-1)(\varphi_d - \varphi_n(n))); \quad (10)$$

$$\varphi_n(n) = \frac{360}{N} n, \quad n = 0, 1, 2, \dots, (N-1),$$

где  $\varphi_d$  – доплеровский набег фаз за период зондирования;  $\varphi_n(n)$  – фаза настройки (вектор поворота)  $n$ -

го фильтра;  $U_{\Sigma ci}$ ,  $U_{\Sigma si}$  и  $U_{\Delta ci}$ ,  $U_{\Delta si}$  – косинусные и синусные составляющие входных сигналов суммарного и разностного каналов в  $i$ -ом периоде накопления;  $k_i$  – весовые коэффициенты;  $N$  – число фильтров в КН.

Как следует из выражений (3) и (8) и иллюстраций (рис. 2) в зависимости от знака угла отклонения  $\theta_c$  амплитуды сигналов суммарного  $U_{\Sigma}$  и разностного  $U_{\Delta}$  приемных каналов имеют одинаковую полярность при  $\theta_c > 0$ , и разную полярность при  $\theta_c < 0$ , а при  $\theta_c = 0$   $U_{\Delta} = 0$  и  $U_{\Sigma}$  принимает максимальное значение. Это же условие сохраняется для квадратурных составляющих накопленных в КН импульсов суммарного и разностного каналов (10).

На рис. 3 иллюстрируется такая зависимость отношения квадратурных составляющих для двух случаев положения самолета относительно РСН (рис. 2):  $\theta_{c1} > 0$  и доплеровский набег фаз  $\varphi_{d1} \approx 50^\circ$  и  $\theta_{c2} < 0$  и  $\varphi_{d2} \approx 115^\circ$ .

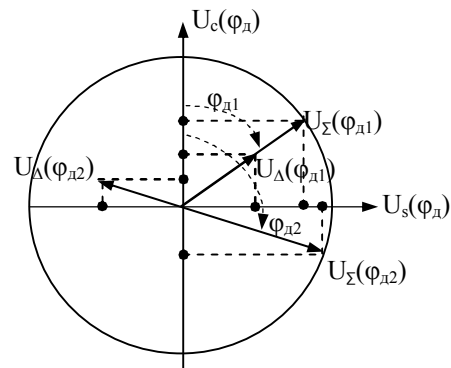


Рис. 3. К принципу нахождения  $k_{3n}$

В общем такую зависимость можно описать выражениями:

$$\frac{U_{\Delta shn}(\varphi_d)}{U_{\Sigma shn}(\varphi_d)} > 0 \text{ и } \frac{U_{\Delta chn}(\varphi_d)}{U_{\Sigma chn}(\varphi_d)} > 0 \text{ при } \theta_c > 0;$$

$$\frac{U_{\Delta shn}(\varphi_d)}{U_{\Sigma shn}(\varphi_d)} < 0 \text{ и } \frac{U_{\Delta chn}(\varphi_d)}{U_{\Sigma chn}(\varphi_d)} < 0 \text{ при } \theta_c < 0; \quad (11)$$

$$U_{\Delta shn}(\varphi_d) = 0 \text{ при } \theta_c = 0.$$

Поэтому в КН сигналов суммарного и разностного приемных каналов до нахождения отношения модулей накопленных импульсов

$$|U_{\Delta n}/U_{\Sigma n}| = \sqrt{U_{\Delta chn}^2 + U_{\Delta shn}^2} / \sqrt{U_{\Sigma chn}^2 + U_{\Sigma shn}^2}, \quad (12)$$

исходя из условий (11) можно найти для выражения (9) значение знакового коэффициента по алгоритму:

$$k_{3n} = \frac{U_{\Delta shn}/U_{\Sigma shn}}{|U_{\Delta shn}/U_{\Sigma shn}|} \text{ при } U_{\Delta shn} \geq U_{\Delta chn};$$

$$k_{3n} = \frac{U_{\Delta chn}/U_{\Sigma chn}}{|U_{\Delta chn}/U_{\Sigma chn}|} \text{ при } U_{\Delta shn} < U_{\Delta chn}. \quad (13)$$

Из иллюстраций (рис. 3) видно, что в первом случае (набег фаз  $\varphi_{д1}$ ) квадратурные составляющие  $U_{\Sigma c}(\varphi_{д1})$ ,  $U_{\Delta c}(\varphi_{д1})$  и  $U_{\Sigma s}(\varphi_{д1})$ ,  $U_{\Delta s}(\varphi_{д1})$  имеют одинаковую полярность, а во втором –  $U_{\Sigma c}(\varphi_{д2})$ ,  $U_{\Delta c}(\varphi_{д2})$  и  $U_{\Sigma s}(\varphi_{д2})$ ,  $U_{\Delta s}(\varphi_{д2})$  имеют разную полярность. Такое соотношение полярностей сохранится для накопленных в КН квадратурных составляющих импульсов. Поэтому по алгоритму (13) можно определять знак коэффициента  $k_{зн}$ : +1 или -1.

Заметим, что другие особенности работы КН локатора автосопровождения при суммарно-разностной обработке отражений по сравнению с КН обзорной РЛС изложены в работе [4]. То есть работа КН рассматриваемого локатора отличается от локатора автосопровождения с амплитудной обработкой выполнением дополнительной операции (13).

Вернемся к выводу приближенного выражения функции  $\Psi(U_{нр}(\theta_c)/U_{нс}(\theta_c))$  в (9) для расчета угла отклонения  $\theta_c$ . Здесь уточним, что ДН зеркальной параболической антенны зависит от распределения поля в плоскости раскрыва, от соотношения  $\lambda/L$  и от соотношения  $L/f_\phi$  размера раскрыва к фокусному расстоянию. Так в соответствии с теорией построения антенн [5] при косинусоидальном распределении поля, когда его амплитуда на краях зеркала на 10 дБ ниже, чем в центре раскрыва, при  $L/f_\phi=2,4$  ДН можно описать аналогичным с (3) выражением:

$$F(\alpha \pm 0,5) \approx \frac{\cos(1,59\pi(\alpha \pm 0,5))}{1 - (3,18(\alpha \pm 0,5))^2}. \quad (14)$$

При этом

$$\theta_{см} = 1,16 \theta_{л} \approx 1,45 \frac{\lambda}{L}. \quad (15)$$

Для вывода приближенного выражения функции  $\Psi(U_{\Delta н}(\theta_c)/U_{\Sigma н}(\theta_c))$  расчетного выражения (9) угла отклонения  $\theta_c$  самолета воспользуемся описанием (14) каждого лепестка ДН. На рис. 4 приведены графики первичных лепестков  $F_1(\alpha)$ ,  $F_2(\alpha)$ , а также разностного  $F_\Delta(\alpha)$  и суммарного  $F_\Sigma(\alpha)$  лепестков

$$\begin{aligned} F_\Delta(\alpha) &= F(\alpha - 0,5) - F(\alpha + 0,5); \\ F_\Sigma(\alpha) &= F(\alpha - 0,5) + F(\alpha + 0,5), \end{aligned} \quad (16)$$

а также график отношения  $R_1(\alpha)$  разностного  $F_\Delta(\alpha)$  и суммарного  $F_\Sigma(\alpha)$  лепестков

$$R_1(\alpha) = \frac{F_\Delta(\alpha)}{F_\Sigma(\alpha)}. \quad (17)$$

Заметим, что отношение (17) при реализации алгоритма оптимальной доплеровской фильтрации

отражений [7] практически совпадает с отношением  $R_2(\alpha)$  амплитуд накопленных импульсов  $n$ -ми фильтрами КН разностного  $U_{\Delta нн}(\alpha)$  и суммарного  $U_{\Sigma нн}(\alpha)$  каналов:

$$R_1(\alpha) \approx R_2(\alpha) = \frac{U_{\Delta нн}(\alpha)}{U_{\Sigma нн}(\alpha)}. \quad (18)$$

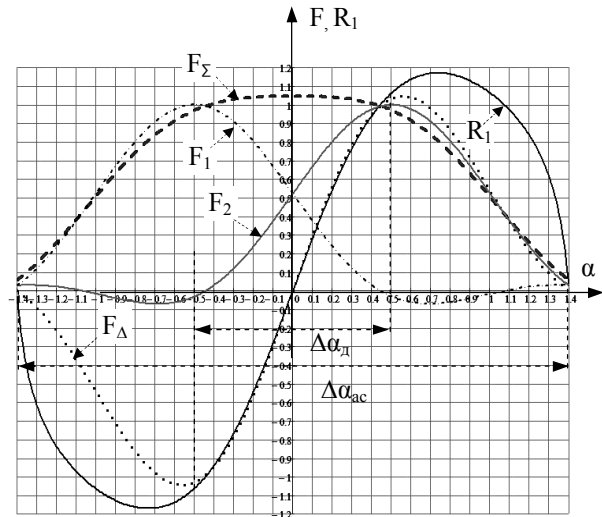


Рис. 4. Графики функций  $F_1(\alpha)$ ,  $F_2(\alpha)$ ,  $F_\Delta(\alpha)$ ,  $F_\Sigma(\alpha)$  и отношения  $R_1(\alpha) = F_\Delta(\alpha)/F_\Sigma(\alpha)$

Из графиков видно, что функции  $F_\Delta(\alpha)$  и  $R_1(\alpha)$  в пределах изменения углов ( $\Delta\alpha_d$  на рис. 4)

$$-0,5 \leq \alpha \leq +0,5 \quad (19)$$

изменяются по закону близкому к линейному. С учетом равенства (18) для пределов (19) можно расчетным путем получить функцию  $\Psi(U_{\Delta н}(\theta_c)/U_{\Sigma н}(\theta_c))$  выражения (9). Для этого представим функцию (9) выражением:

$$\alpha \approx k_1 R_1 + k_2 \sin(0,5\pi R_1) + k_3 \sin(\pi R_1). \quad (20)$$

Тогда для трех значений ( $i=1, 2, 3$ ) угловой координаты  $\alpha_i=0,1; 0,3; 0,45$  в соответствии с выражениями (14), (16) и (17) находим три значения отношения (17):

$$\begin{aligned} R_1(0,1) &\approx 0,2829; \\ R_1(0,3) &\approx 0,7667; \\ R_1(0,45) &\approx 1,0082. \end{aligned} \quad (21)$$

Для определения значений трех коэффициентов  $k_i$  выражения (20) с учетом значений (21) отношения  $R_1(\alpha_i)$  и  $\alpha_i=0,1; 0,3; 0,45$  решаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} 0,1 \approx 0,2829k_1 + 0,4299k_2 + 0,7763k_3; \\ 0,3 \approx 0,7667k_1 + 0,9336k_2 + 0,66905k_3; \\ 0,45 \approx 1,0082k_1 + 0,9999k_2 - 0,02576k_3. \end{cases} \quad (22)$$

В результате решения системы уравнений (22) получаем следующие значения коэффициентов  $k_i$  выражения (20):

$$k_1 \approx 0,827; \quad k_2 \approx -0,388; \quad k_3 \approx 0,042. \quad (23)$$

Расчеты по алгоритму (20) при значениях коэффициентов  $k_i$  (23) показали, что максимальная методическая ошибка на краях предела (19) имеет значения  $\pm 0,015 \theta_{см}$ , а ее среднеквадратическое значение составляет величину  $0,006 \theta_{см}$ .

Тогда с учетом выражения (18) расчетное выражение (20) измеренной координаты  $\theta_c$  по соотношению амплитуд накопленных импульсов в  $n$ -ом фильтре КН разностного  $U_{\Delta nn}$  и суммарного  $U_{\Sigma nn}$  каналов для ДН, описываемых выражением (14) принимает вид:

$$R_2 = U_{\Delta nn} / U_{\Sigma nn};$$

$$\theta_{и} \approx \theta_{см} (0,827R_2 - 0,388\sin(0,5\pi R_2) + 0,042\sin(\pi R_2)). \quad (24)$$

Последовательность выражений (16), (17), (18), (20) отражает алгоритм получения расчетного выражения (24) координаты  $\theta_c$  по соотношению амплитуд  $U_{\Delta nn}$  и  $U_{\Sigma nn}$  для реальной ДН, полученной в заводских условиях экспериментальным путем.

Как показано в работе [4] полученные среднеквадратические значения методической ошибки ( $\sigma_{м0} \leq 0,006 \theta_{см}$ ) измерения координат  $\theta_c$  по алгоритму (24) и оптимизация алгоритмов работы когерентных накопителей позволят осуществлять гарантированный вывод самолета в зону допустимых отклонений до высот принятия решения  $h_{пр} = 60м$ , или  $h_{пр} = 30м$  (I и II категории метеоминимума). При этом пределы измерения углов  $\Delta\theta_{и}$  соизмеримы с углом смещения лепестков

$$\Delta\alpha_{д} \Delta\theta_{и} / \theta_{см} = 1, \quad (25)$$

а зона автосопровождения  $\Delta\theta_{ас}$  (рис. 4) в 2,8 раз больше угла смещения

$$\Delta\alpha_{ас} = \Delta\theta_{ас} / \theta_{см} = 2,8. \quad (26)$$

Для анализа возможности вычисления текущей координаты  $\theta_c$  по амплитудам накопленных импульсов  $U_{н1}$ ,  $U_{н2}$  первичных лепестков  $F_1(\alpha)$ ,  $F_2(\alpha)$  в МРЛС АС с амплитудной обработкой для лепестков (14) и для их взаимного смещения (15) получим аналогичный с (24) алгоритм. При этом достаточно учесть, что амплитуды  $U_{н1}$ ,  $U_{н2}$  будут пропорциональны модулям  $|F_1(\alpha)|$ ,  $|F_2(\alpha)|$  этих лепестков:

$$\alpha \approx \Psi\left(\frac{U_{н2} - U_{н1}}{U_{н2} + U_{н1}}\right) = \Psi\left(\frac{|F_2(\alpha)| - |F_1(\alpha)|}{|F_2(\alpha)| + |F_1(\alpha)|}\right). \quad (27)$$

На рис. 5 приведены графики функций  $|F_1(\alpha)|$ ,  $|F_2(\alpha)|$ . В этом случае измеритель угловых координат вычисляет разницу и сумму накопленных  $U_{н1}$ ,  $U_{н2}$ , что эквивалентно вычислению разницы  $F_{\Delta a}(\alpha)$  и суммы  $F_{\Sigma a}(\alpha)$  модулей  $|F_1(\alpha)|$ ,  $|F_2(\alpha)|$  этих лепестков:

$$F_{\Delta a}(\alpha) = |F(\alpha - 0,5)| - |F(\alpha + 0,5)|;$$

$$F_{\Sigma a}(\alpha) = |F(\alpha - 0,5)| + |F(\alpha + 0,5)|. \quad (28)$$

На рис. 5 приведены графики функций (27) и их отношения:

$$R_2(\alpha) = \frac{F_{\Delta a}(\alpha)}{F_{\Sigma a}(\alpha)}. \quad (29)$$

Из анализа графиков, представленных на рис. 4 и 5, видно, что графики аналогичных функций в двух случаях (суммарно-разностная и амплитудная обработка) в пределах углов

$$-0,45 \leq \alpha \leq +0,45 \quad (30)$$

полностью идентичны.

За этими пределами, когда появляются боковые лепестки ДН, значения функций  $F_{\Delta a}(\alpha)$ ,  $F_{\Sigma a}(\alpha)$  отличаются от  $F_{\Delta}(\alpha)$ ,  $F_{\Sigma}(\alpha)$  и существенно отличается функция  $R_2(\alpha)$  от  $R_1(\alpha)$ .

При этом наличие в пределах углов  $+0,45 \leq \alpha \leq +1,75$  и  $-1,75 \leq \alpha \leq -0,45$  “провалов” функции  $R_2(\alpha)$  свидетельствует о том, что пределы измерения углов  $\Delta\alpha_{д}$  по сравнению с (25) в 1,5 раза меньше (рис. 5)

$$\Delta\alpha_{д} = \frac{\Delta\theta_{и}}{\theta_{см}} \approx 0,66. \quad (31)$$

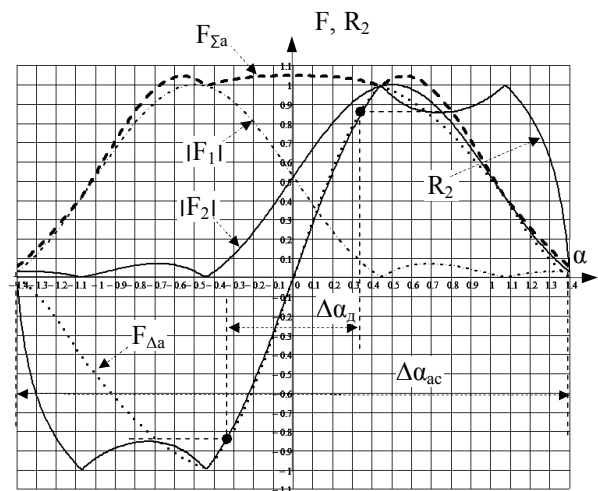


Рис. 5. Графики функций  $|F_1(\alpha)|$ ,  $|F_2(\alpha)|$ ,  $F_{\Delta a}(\alpha)$ ,  $F_{\Sigma a}(\alpha)$  и отношения  $R_2(\alpha) = F_{\Delta a}(\alpha) / F_{\Sigma a}(\alpha)$

Исходя же из принципов автосопровождения локатором самолета (РСН перемещается в сторону сопровождаемого самолета) вытекает, что зоны автосопровождения в этих двух случаях (амплитудная и суммарно-разностная обработка) одинаковы (26).

При этом для пределов (30) можно получить более простое, чем (24) выражение и добиться уменьшения среднеквадратического значения методической ошибки в 3,5 раза. Для лепестков, описываемых выражением (14) такое выражение имеет вид:

$$\alpha \approx 0,623R_2 - 0,204 \sin(0,43\pi R_2). \quad (32)$$

При этом из расчетов по алгоритму (32) следует, что максимальная методическая ошибка не превышает значения  $\pm 0,003 \theta_{\text{см}}$ , а ее среднеквадратическое значение составляет величину  $0,0017 \theta_{\text{см}}$ .

## Выводы

1. Алгоритм работы когерентных накопителей МРЛС с суммарно-разностной обработкой отличается от МРЛС с амплитудной обработкой вычислением знакового коэффициента по алгоритму (13).

2. Для зеркальной антенны с приемлемой точностью можно подобрать алгоритмы расчета угловых координат по значениям амплитуд накопленных импульсов как для суммарно-разностной обработки (19) так и алгоритм для амплитудной обработки – (22), (23), (24) и (27).

3. Допустимые пределы измеряемых углов (26) при амплитудной обработке в 1,5 раза меньше пределов (20) при суммарно-разностной обработке. Однако в силу более простой схемы построения приемопередающей аппаратуры МРЛС с амплитудной обработкой им можно отдать предпочтение для решения задачи автосопровождения самолетов в зоне посадки.

## Список литературы

1. Особенности построения радиолокационного посадочного комплекса для автоматизированного управления посадкой самолета / Н.Д. Рысаков, И.В. Титов, В.В. Куценко, А.П. Кулик // Наука і техніка ПС ЗСУ: наук. ж. – Х.: ХУПС, 2011. – № 2(6). – С. 115-120.

2. Фазовый метод устранения неоднозначности измерения угловых координат в моноимпульсной РЛС автосопровождения самолета в зоне посадки с реализацией амплитудного способа пеленгации, суммарно-разностной обработки и доплеровской фильтрации отражений / Н.Д. Рысаков, С.А. Макаров, В.В. Куценко, А.П. Кулик // Системи управління, навігації та зв'язку. – К., 2012. – Вип. 2(22). – С. 30-35.

3. Амплитудный метод устранения неоднозначности измерения угловых координат в МРЛС АС самолета с реализацией амплитудного способа пеленгации, суммарно-разностной обработки и доплеровской фильтрации отражений / Н.Д. Рысаков, С.А. Макаров, В.В. Куценко, И.В. Титов // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2013. – Вип. 1(34). – С. 92-97.

4. Алгоритмы работы когерентных накопителей и измерителей координат в составе МРЛС автосопровождения самолета с амплитудной обработкой отражений в зоне посадки / Н.Д. Рысаков, В.В. Куценко, И.В. Титов, С.М. Рот, Ю.Н. Добрышкин, С.Ю. Гогоняц // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 3(40). – С. 76-84.

5. Дабкин А.Л. Антенно-фидерные устройства. Изд. 2-е, доп. и переработ. / А.Л. Дабкин, В.Л. Зузенко, А.Г. Кислов. – М.: Сов. радио, 1974. – 536 с.

6. Алгоритм и условия оптимальной доплеровской фильтрации отражений в когерентном накопителе с любым числом фильтров для РЛС автосопровождения посадки самолета / Н.Д. Рысаков, В.В. Куценко, И.Л. Костенко, И.В. Титов, А.П. Кулик // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 1(37). – С. 211-216.

Поступила в редколлегию 25.12.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. П.Ю. Костенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ОСОБЛИВОСТІ АЛГОРИТМУ РОБОТИ КОГЕРЕНТНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ І ВИМІРЮВАЧІВ КУТОВИХ КООРДИНАТ МОНОІМПУЛЬСНОЇ РЛС АВТОСУПРОВОДЖЕННЯ ПОСАДКИ ЛІТАКА ПРИ СУМАРНО-РІЗНИЦЕВІЙ ОБРОБЦІ ВІДЗЕРКАЛЕНЬ

М.Д. Рысаков, В.В. Куценко, І.Л. Костенко, І.В. Тітов, В.Г. Карев

У роботі обґрунтовується можливість визначення знака кутового відхилення літака від рівносиғнального напрямку антени за допомогою когерентного накопичувача моноімпульсної РЛС автосупроводження з сумарно-різницевою обробкою віддзеркалень від літака в зоні посадки. Уточнюється алгоритм роботи та особливості побудови когерентного накопичувача для визначення знакового коефіцієнта, а також алгоритм роботи вимірювача кутових координат для діаграми спрямованості дзеркальної антени. Аналізується методична помилка вимірювачів кутових координат при таких накопичувачах і антени.

**Ключові слова:** моноімпульсна РЛС, автосупроводження, кільцевий міст, рівносиғнальний напрямок, діаграма спрямованості, когерентний накопичувач.

## ALGORITHM FEATURES OF COHERENT DRIVES AND MEASURERS ANGULAR COORDINATES OF MONOPULSE RADAR STATION AUTOFOLLOW AIRCRAFT LANDING AT A TOTAL-DIFFERENCE ECHO PROCESSING

N.D. Rysakov, V.V. Kutsenko, I.L. Kostenko, I.V. Titov, V.G. Karev

In the work substantiates the possibility of determining the sign of the angular deviation of the aircraft from the equisignal antenna direction by means of coherent monopulse radar station drive auto-tracking with a sum-difference processing a return in the landing zone. Specified algorithm and features the construction of a coherent drive for the determination of the sign of the coefficient, and the algorithm of the measuring instrument of angular coordinates for the radiation patterns a reflector antenna. Analyzes the methodological errors meters of angular coordinates with such drives and antenna.

**Keywords:** monopulse radar station, tracking of, annular bridge, equisignal direction, radiation pattern, coherent drive.