

Н.Д. Рысаков, И.В. Титов, В.Г. Карев, В.А. Дорощук

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ УГЛА МЕСТА ЦЕЛИ В ОБЗОРНОЙ РЛС С ФАР

Для ослабления влияния ошибок дискретизации, присущих методу интервалов наблюдения соседних лепестков парциальной диаграммы направленности (ПДН), на точность измерения угла места цели (УМЦ) в обзорной радиолокационной станции (РЛС) с фазированной антенной решеткой (ФАР), в работе предложен комбинированный метод измерения угла места цели. Сущность метода состоит в использовании при измерении угла места цели информации, заложенной в размерах пачек импульсов (метод интервалов наблюдения) и в соотношении амплитуд сигналов (амплитудный метод) соседних лепестков ПДН.

**Ключевые слова:** угол места цели, парциальная диаграмма направленности, лепесток ПДН, азимутальная ширина пачек (АШП) импульсов, эффективная отражающая поверхность (ЭОП) цели, частота сигнала облучения, фазированная антенная решетка, равносигнальное направление (РСН).

### Введение

**Постановка проблемы.** В РЛС с ПДН для измерения УМЦ  $\epsilon_{ц}$  обычно реализуется метод интервалов наблюдения, при котором используется информация, заложенная в АШП импульсов соседних лепестков. Для таких измерений  $\epsilon_{ц}$  характерны ошибки дискретизации, которые могут принимать существенные значения при когерентном накоплении отраженных импульсов. В случае реализации ПДН с помощью ФАР (при одночастотном зондирующем сигнале) для измерения  $\epsilon_{ц}$  можно реализовывать амплитудный метод, при котором используется информация, заложенная в соотношении амплитуд сигналов соседних лепестков. Однако для такого метода измерения  $\epsilon_{ц}$  характерны методические ошибки. Возникает необходимость поиска путей исключения таких ошибок или их существенного уменьшения.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работе [1] предложен комбинированный метод измерения  $\epsilon_{ц}$  для реализации в РЛС с ПДН, лепестки которой формируются на разных частотах [2]. В этом случае такому методу присущи ошибки, обусловленные влиянием отличий амплитуд ЭОП цели (из-за отличий частот облучения) на амплитуду и ширину пачек импульсов соседних лепестков. В работе [3] приведены результаты анализа и расчета таких ошибок. Такие ошибки на дальностях более 100 км могут быть соизмеримы с высотой полета низколетящих летательных аппаратов, что неприемлемо для решения задач военной авиацией. Кроме этого предложенный алгоритм комбинированного метода не является оптимальным для реализации в РЛС с ФАР, ввиду возможности использования более точных расчетных выражений для реализации, как амплитудного метода, так и метода интервалов наблюдения. В статье [4] получено уточненное расчетное выражение для реализации метода интервалов наблюдения, а также предложен амплитудный

метод измерения УМЦ и охарактеризованы условия его реализации в обзорной РЛС с ФАР.

**Целью статьи** является разработка алгоритма работы цифрового измерителя  $\epsilon_{ц}$  в РЛС с ФАР, реализующего комбинированный метод измерения УМЦ на основе измерений размеров пачек импульсов и соотношения амплитуд импульсов пачек соседних лепестков ПДН.

### Изложение основного материала

Для обзорных РЛС с ПДН, реализующих метод интервалов наблюдения для измерения  $\epsilon_{ц}$ , характерны ошибки дискретизации, обусловленные импульсным режимом работы РЛС. В статье [4] показано, что среднеквадратические значения таких ошибок  $\sigma_{ед}$  являются наибольшими в направлении РСН, уменьшаются с увеличением отклонения цели от РСН пары лепестков и увеличиваются с уменьшением относительного порога ограничения  $u_{п}$  импульсов пачки, то есть с уменьшением дальности до цели. При этом максимальные и минимальные значения ошибок дискретизации составляют 19% и 13% углового смещения соседних лепестков при  $u_{п} = 0,1$  и уменьшаются до 8% и 5% при  $u_{п} = 0,7$ . Здесь уместно уточнить, что такие ошибки имеют место лишь в секторе совместного облучения цели парой лепестков. С ростом  $u_{п}$  такой сектор уменьшается, что и обуславливает уменьшение среднеквадратической ошибки дискретизации. Полученные значения ошибок  $\sigma_{ед}$  свидетельствуют о необходимости поиска путей их уменьшения. В статье [4] предложен амплитудный метод измерения  $\epsilon_{ц}$ , у которого ошибки дискретизации отсутствуют. Однако такому методу присущи методические ошибки.

Наличие у метода интервалов наблюдения ошибок дискретизации, а у амплитудного метода - методических ошибок при измерении  $\epsilon_{ц}$  в РЛС с ФАР обуславливает целесообразность реализации комби-

нированного метода, сочетающего два названных метода. Иллюстрация сущности метода и зависимость измеряемых параметров отраженных импульсов соседних лепестков ПДН ( $\beta_{п1}$ ,  $\beta_{п2}$ ,  $u_1$ ,  $u_2$ ) от размеров лепестков ( $\beta_{л}$ ,  $\varepsilon_{л1}$ ,  $\varepsilon_{л2}$ ), а также от пространственного положения цели ( $\beta_{ц}$ ,  $\varepsilon_{ц}$ ) и пары лепестков ПДН ( $\beta_a$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ) приведены на рис. 1.

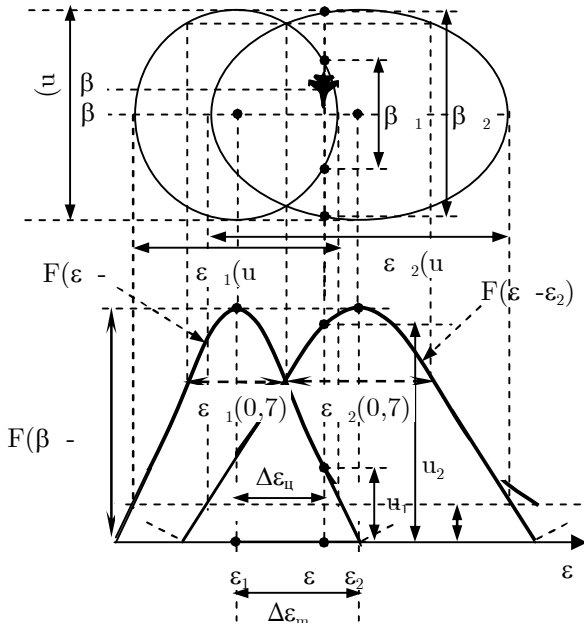


Рис. 1. Иллюстрация комбинированного метода

При описании алгоритма работы цифрового измерителя  $\varepsilon_{ц}$ , реализующего комбинированный метод, воспользуемся расчетными выражениями, полученными в работе [4]. Так расчетное выражение для измерения  $\varepsilon_{ц}$  методом интервалов наблюдения (по размерам пачек импульсов) имеет вид:

$$\Delta\varepsilon_{ц} \approx \frac{k_{л}^2 k_{\varepsilon}}{8\Delta\varepsilon_m} (\beta_{п2}^2 - \beta_{п1}^2 + 12T_0 V_a (\beta_{п2} - \beta_{п1})) + \frac{\Delta\varepsilon_m}{k_{\varepsilon} + 1}, \quad (1)$$

где  $\Delta\varepsilon_m = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$ ;  $k_{л} = \varepsilon_{л1} / \beta_{л}$ ;  $k_{\varepsilon} = \varepsilon_{л2} / \varepsilon_{л1}$ ;  $T_0$  – период следования обработанных импульсов пачек;  $V_a$  – скорость вращения антенны РЛС, об/мин.

В зависимости от соотношения угловых размеров  $k_{\varepsilon} = \varepsilon_{л2} / \varepsilon_{л1}$  и от углового смещения  $k_{\Delta} = \varepsilon_{лм} / \varepsilon_{л1}$  по  $\varepsilon$  соседних лепестков ПДН были получены разные расчетные выражения для измерения  $\varepsilon_{ц}$  амплитудным методом (по соотношению амплитуд  $u_2 / u_1$  импульсов).

Так для равновеликой пары лепестков ( $k_{\varepsilon} = 1$ ) с взаимным смещением по  $\varepsilon$  на ширину лепестка ( $k_{\Delta} = 1$ ) расчетное выражение имеет вид:

$$\Delta\varepsilon_{ц} (u_2 / u_1) = (u_2 / u_1) / ((u_2 / u_1) + 1). \quad (2)$$

В случае разновеликой пары ( $k_{\varepsilon} \neq 1$ ) соседних лепестков (рис. 1) и неединичного взаимного смещения по  $\varepsilon$  ( $k_{\Delta} \neq 1$ ) в общем виде расчетное выра-

жение можно представить в форме:

$$\Delta\varepsilon_{ц} (u_2 / u_1, k_{\varepsilon}, k_{\Delta}) \approx (u_2 / u_1) / ((u_2 / u_1) + k_{\varepsilon}) - k_{\varepsilon} / k_{\Delta} + 1 + \Phi(u_2 / u_1, k_{\varepsilon}, k_{\Delta}), \quad (3)$$

где  $\Phi(u_2 / u_1, k_{\varepsilon}, k_{\Delta})$  – функция аппроксимации.

При этом выражение функции аппроксимации подбирается исходя из значений  $k_{\varepsilon}$  и  $k_{\Delta}$  каждой пары лепестков. При  $k_{\varepsilon} = 1$  и  $k_{\Delta} = 1$  выражение (3) принимает вид (2).

Для условий  $k_{\Delta} = 1$ ,  $k_{\varepsilon} > 1$  и  $k_{\varepsilon} = 1$  и  $k_{\Delta} \neq 1$  в работе [4] были получены соответствующие выражения функции аппроксимации:

$$\Phi(u_2 / u_1, k_{\varepsilon}, k_{\Delta}) \approx 1,15(k_{\varepsilon} - 1) \times (1 - \exp(-2,035 \exp(1,081 \ln(u_2 / u_1)))). \quad (4)$$

$$\Phi(u_2 / u_1, k_{\varepsilon}, k_{\Delta}) \approx 1,73(1 / k_{\Delta} - 1) \times (1 - \exp(-2,887 \exp(1,235 \ln(u_2 / u_1)))). \quad (5)$$

При этом ошибки расчета  $\varepsilon_{ц}$  по формуле (3) составляют менее 2% от  $\Delta\varepsilon_m$ . Однако, для условий  $k_{\varepsilon} > 1$  и  $k_{\Delta} \neq 1$  не удалось подобрать приемлемое общее выражение функции приближения. В этом случае для каждого сочетания значений  $k_{\varepsilon} > 1$  и  $k_{\Delta} \neq 1$  можно подбирать отдельное выражение такой функции. Так для  $k_{\varepsilon} = 1,25$ ,  $k_{\Delta} = 0,75$  и пределов изменения аргумента  $u_2 / u_1 = 0,2 \div 5$  было получено следующее приемлемое (методическая ошибка не более 1%) выражение функции приближения:

$$\Phi\left(\frac{u_2}{u_1}\right) \approx 1 - \exp\left(-17,01 \exp\left(0,125 \ln \frac{u_2}{u_1}\right) + 2,882 \frac{u_2}{u_1} - 20,48 \exp\left(0,5 \ln \frac{u_2}{u_1}\right) + 33,484 \exp\left(0,25 \ln \frac{u_2}{u_1}\right)\right). \quad (6)$$

В этом случае, при  $u_2 / u_1 < 0,2$  или  $u_2 / u_1 > 5$  необходимо предусмотреть исключение результатов расчета координаты  $\Delta\varepsilon_{ц}$  по соотношению  $u_2 / u_1$  данной пары лепестков ПДН. Действительно, в этих случаях при  $u_2 / u_1 < 0,2$  цель одновременно наблюдается нижней парой, а при  $u_2 / u_1 > 5$  – верхней парой лепестков и имеется возможность оценить значение  $\Delta\varepsilon_{ца}$  по соотношению  $u_2 / u_1$  этих пар без существенных ошибок.

Структурная схема цифрового вычислителя  $\varepsilon_{ц}$ , которая отражает предлагаемый алгоритм его работы, представлена на рис. 2. В общем виде предлагаемый алгоритм измерения  $\varepsilon_{ц}$  можно характеризовать следующим образом:

1. Для измерения  $\varepsilon_{ц} = \varepsilon_1 + \Delta\varepsilon_{ц}$  (рис. 1) необходимо знать угловое расположение и размеры каждой пары лепестков ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{л1}, \varepsilon_{л2}, \beta_{л}, \Delta\varepsilon_m$ ), текущее азимутальное положение антенны  $\beta_a$ , измерять АПП

импульсов  $\beta_{п1,2}$  и среднее за время совместного облучения цели парой лепестков ПДН соотношения амплитуд  $u_2/u_1$  сигналов на выходах приемных трактов (на выходах когерентных накопителей (КН) [2].

2. Для снижения влияния на точность измерения соотношения  $u_2/u_1$  собственных шумов приемных трактов необходимо вычислять среднее за время  $\Delta T_0$  совместного облучения цели парой лепестков значение этого отношения, а при измерении в каждом периоде  $T_0$  значений  $u_2$  и  $u_1$  учитывать порог ограничения импульсов на входе обнаружителя импульсов пачки каждого лепестка.

3. Время  $\Delta T_0$  можно определять путем логического умножения временных интервалов АШП импульсов  $\beta_{п1}$  и  $\beta_{п2}$ .

4. Для компенсации смещения оценки  $\Delta \epsilon_{ц}$  (математического ожидания) по ширине пачек импульсов целесообразно пользоваться выражением (1), которое учитывает такое смещение из-за того, что АШП пачки практически всегда меньше интервала наблюдения.

Для краткости изложения алгоритма при характеристике обработки цифровых кодов сигналов вычислителем будем использовать аналоговые термины: импульс, амплитуда импульса, напряжение, сигнал. На рис. 2 введены следующие обозначения: ФАП 1,2 – формирователи адаптивных порогов формируют адаптивные к шумам ( $u_{ш1,2}$ ) пороги  $u_{п1,2}$  ограничения смеси  $u_{1,2} + u_{ш1,2}$  накопленных в КН импульсов цели и шумов; СС1, 2 – схемы сравнения выделяют амплитуды импульсов целей  $u_{ц1,2}$ , то есть амплитуды импульсов, превысившие пороги  $u_{п1,2}$ ;  $\Sigma_{1,2}$  – сумматоры напряжений  $u_{ц1,2} + u_{п1,2} = u_{в1,2}$  “восстанавливают” амплитуду импульсов целей; “к/п”1,2 – измерители АШП  $\beta_{п1}$ ,  $\beta_{п2}$  осуществляют критерийную обработку импульсов пачки по критерию “к/п”; “И” – формирователь азимутально-го строба  $\beta_{п} \equiv \Delta T_0$  для измерения  $u_{в2}/u_{в1}$ ; “ $u_{в2}/u_{в1}$ ” – вычислитель соотношения “восстановленных” амплитуд импульсов; “ $u_{в2}/u_{в1}$ ” – вычислитель среднего значения отношения  $u_{в2}/u_{в1}$  за время облучения  $\Delta T_0$  цели двумя лепестками ПДН; “ $\Delta \epsilon_{цп}$ ” – вычислитель  $\Delta \epsilon_{ц}$  по ширине пачек импульсов  $\beta_{п1}$ ,  $\beta_{п2}$ ; “ $\Delta \epsilon_{ца}$ ” – вы-

числитель  $\Delta \epsilon_{ц}$  по соотношению  $u_{в2}/u_{в1}$ ; “ $k_{л}$ ,  $k_{\Delta}$ ,  $\Delta \epsilon_{м}$ ,  $k_{\epsilon}$ ” – вычислитель фиксированных параметров  $k_{л}$ ,  $k_{\Delta}$ ,  $\Delta \epsilon_{м}$ ,  $k_{\epsilon}$ ; “ $\epsilon_{ц}$ ” – вычислитель  $\epsilon_{ц}$  за текущее облучение цели.

Уточним алгоритм работы вычислителя  $\epsilon_{ц}$ .

На вход вычислителя  $\epsilon_{ц}$  каждой пары лепестков ПДН с выходов КН приемных трактов пары лепестков поступает смесь импульсов целей  $u_{цi}$  с шумами  $u_{шi}$ . Каждый формирователь ФАП 1,2 оценивает среднее значение  $\overline{u_{шi}}$  напряжения шума  $u_{шi}$  ( $i = 1,2$ ) и формирует пороговое напряжение  $u_{пi}$ , превышающие  $\overline{u_{шi}}$  в  $k_{п} > 1$  раз.

Схемы СС-1 и СС-2 выделяют импульсы целей  $u_{ц1,2}$  исходя из следующих условий:

$$u_{цi} = \begin{cases} 0, & \text{если } u_i + u_{шi} < u_{пi}; \\ u_i + u_{шi} - u_{пi}, & \text{если } u_i + u_{шi} > u_{пi}. \end{cases}$$

Эти импульсы подвергаются критерийной обработке “к/п” с целью фиксации начала  $t_{н1,2}$  и конца  $t_{к1,2}$  времени облучения цели каждым лепестком. При этом размеры пачек импульсов  $\beta_{п1,2}$  по значениям азимутального положения антенны  $\beta_a(t)$  находятся по принципу:

$$\beta_{п1,2} = \beta_a(t_{к1,2}) - \beta_a(t_{н1,2}).$$

Формирователь азимутального строба  $\beta_{п}$  представляет собой логическую схему “И” двух стробов  $\beta_{п1}$  и  $\beta_{п2}$ . В течение этого строба и осуществляется измерение соотношения амплитуд импульсов пачек соседних лепестков.

Сумматоры  $\Sigma_{1,2}$  «восстанавливают» значения амплитуд («потерянных» в СС-1,2 при пороговом ограничении входного сигнала) импульсов целей таким образом:

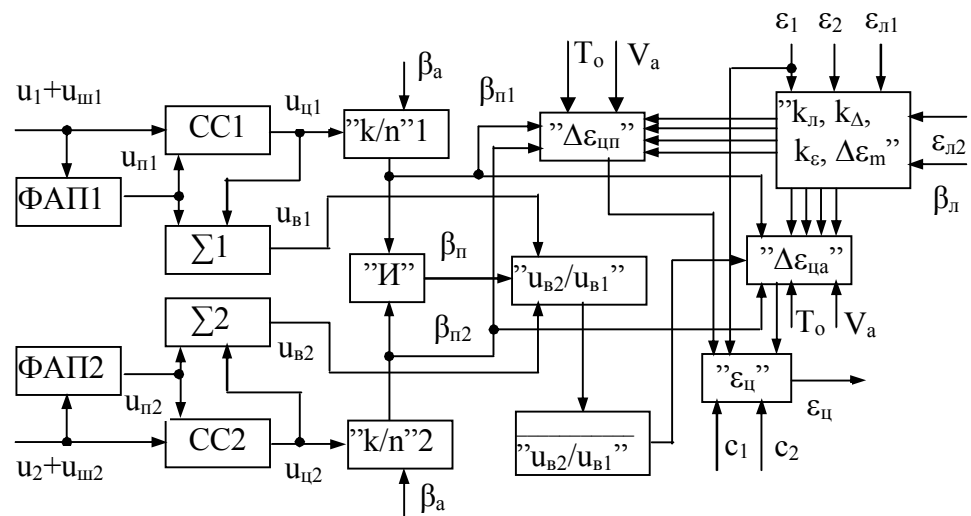


Рис. 2. Структурная схема цифрового вычислителя  $\epsilon_{ц}$

$$u_{Bi} = \begin{cases} 0, & \text{если } u_{\text{ци}} = 0; \\ u_{\text{ци}} + u_{\text{ни}}, & \text{если } u_{\text{ци}} > 0. \end{cases}$$

Вычислитель "  $u_{B2} / u_{B1}$  " в течении строка  $\beta_n$  работает по алгоритму:

$$u_{B2} / u_{B1} = \begin{cases} u_{B2} / u_{B1}, & \text{если } u_{B2} \geq 0 \text{ и } u_{B1} > 0; \\ 0, & \text{если } u_{B1} = 0 \text{ и } u_{B2} > 0. \\ \text{или } u_{B2} = 0 \text{ и } u_{B1} > 0. \end{cases}$$

Вычислитель «  $\overline{u_{B2} / u_{B1}}$  » определяет среднее значение  $u_{B2} / u_{B1}$  за время  $\Delta T_0$  совместного облучения цели двумя лепестками по принципу:

$$\overline{u_{B2} / u_{B1}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (u_{B2} / u_{B1})_j.$$

При этом учитываются лишь те (m)-периоды  $T_0$ , в которых на выходе вычислителя "  $u_{B2} / u_{B1}$  " передавалось ненулевое значение отношения  $u_{B2} / u_{B1}$ .

Измеритель "  $\Delta \varepsilon_{\text{цп}}$  " по измеренным значениям АШП  $\beta_{n2}$ ,  $\beta_{n1}$  в соответствии с выражением (1) вычисляет отклонение цели от  $\varepsilon_1$ . При этом, если  $\beta_{n2} > 0$ ,  $\beta_{n1} = 0$  или  $\beta_{n2} = 0$ ,  $\beta_{n1} > 0$  измеритель принимает решение  $\Delta \varepsilon_{\text{цп}} = 0$  или  $\Delta \varepsilon_{\text{цп}} = \Delta \varepsilon_m$  соответственно.

Измеритель "  $\Delta \varepsilon_{\text{ца}}$  " вычисляет отклонение цели от  $\varepsilon_1$  на основе измеренных значений соотношения  $\overline{u_{B2} / u_{B1}}$  по соответствующим формулам (2) или (3).

При этом, если  $\overline{u_{B2} / u_{B1}} = 0$  и  $\beta_{n2} > 0$ ,  $\beta_{n1} = 0$  или  $\beta_{n2} = 0$ ,  $\beta_{n1} > 0$  измеритель принимает решение  $\Delta \varepsilon_{\text{ца}} = 0$  или  $\Delta \varepsilon_{\text{ца}} = \Delta \varepsilon_m$  соответственно.

Измеритель "  $\varepsilon_{\text{ц}}$  " путем весового суммирования ( $c_1 > 0$ ,  $c_2 > 0$ ,  $c_1 + c_2 = 1$ ) вычислений измерителями "  $\Delta \varepsilon_{\text{цп}}$  " и "  $\Delta \varepsilon_{\text{ца}}$  " вычисляет  $\varepsilon_{\text{ц}}$  по алгоритму:

$$\varepsilon_{\text{ц}} = \varepsilon_1 + c_1 \Delta \varepsilon_{\text{цп}} + c_2 \Delta \varepsilon_{\text{ца}}.$$

## Выводы

По мнению авторов реализация предложенного комбинированного метода измерения третьей координаты цели в обзорной РЛС с ФАР позволит существенно повысить точность измерений  $\varepsilon_{\text{ц}}$  в целом и особенно в нижней зоне углов места действия РЛС, что имеет важное значение для радиолокационного обеспечения фронтовой авиации и поэтому может заинтересовать разработчиков современных РЛС.

## Список литературы

1. Рысаков Н.Д. Алгоритм комбинированного амплитудного метода измерения угла места цели в обзорной РЛС с парциальной диаграммой направленности / Н.Д. Рысаков, В.И. Василюшин, А.Ф. Катасонов // *Радіотехніка: Всеукр. Між від. наук.-техн. зб.* – Х.: ХНУРЕ, 2008. – Вып. № 153. – С. 28-32.
2. *Озброєння та військова техніка РТВ. Побудова РЛС 19Ж6: навчальний посібник. Частина 1* / [Гриб Д.А., Голованів В.П., Климченко В.І. та ін.]. – Х.: ХУПС, 2007. – 300 с.
3. Точность измерения угла места цели в РЛС по азимутальным интервалам наблюдения соседних лепестков парциальной диаграммой направленности, формируемых на разных частотах / Н.Д. Рысаков, И.В. Титов, В.Г. Карев, А.П. Кулик // *Системи управління, навігації та зв'язку.* – К.: ЦНДІ НіУ, 2010. – Вып. 3 (15). – С. 65-70.
4. Рысаков Н.Д. Принципы и условия измерения угла места цели в РЛС с ФАР по соотношению амплитуд сигналов соседних лепестков ПДН / Н.Д. Рысаков, И.В. Титов, С.А. Макаров // *Збірник наукових праць ХУПС.* – Х.: ХУПС, 2010. – Вып. 4 (26). – С. 86-89.

Поступила в редколлегию 3.02.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.В. Барышев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

## КОМБІНОВАНИЙ МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ КУТА МІСЦЯ ЦІЛІ В ОГЛЯДОВІЙ РЛС З ФАР

М.Д. Рысаков, І.В. Тітов, В.Г. Карев, В.А. Дорошчук

Для послаблення впливу помилок дискретизації, властивих методу інтервалів спостереження сусідніх пелюсток парціальної діаграми спрямованості (ПДС), на точність вимірювання кута місця цілі (КМЦ) в об'зорній радіолокаційній станції (РЛС) з фазованою антенною решіткою (ФАР), в роботі запропонований комбінований метод вимірювання кута місця цілі. Сутність методу складається у використанні при вимірюванні кута місця цілі інформації, закладеної в розмірах пачок імпульсів (метод інтервалів спостереження) і у співвідношенні амплітуд сигналів (амплітудний метод) сусідніх пелюсток ПДС.

**Ключові слова:** кут місця цілі, парціальна діаграма спрямованості, пелюстка ПДС, азимутальна ширина пачок імпульсів, ефективна поверхня відбиття цілі, частота сигналу опромінення, фазована антенна решітка.

## COMBINED METHOD FOR MEASURING THE ANGLE OF PLACES GOALS SURVEILLANCE RADARS WITH PHASED ARRAY

N.D. Risakov, I.V. Titov, V.G. Karev, V.A. Doroshchuk

To mitigate the impact of sampling error inherent in the method of observation intervals of adjacent lobes of the partial radiation pattern, the measurement elevation targets in the survey radar with a phased array, we have proposed a combined method for measuring the elevation of your target. The method consists in the use in measuring elevation target information stored in the size of burst (method of observation intervals) and in the ratio of signal amplitudes (amplitude method) of adjacent lobes.

**Keywords:** elevation of purpose, the partial radiation pattern, petal PP, the azimuthal width of the burst, the effective reflecting surface of the target, the frequency of the signal radiation, phased array antenna, equisignal direction.