

## ИССЛЕДОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

А. А. Симонян, С. Н. Замуруев

**В** настоящее время актуальной задачей является определение координат источника радиоизлучения пассивными методами в сложной радиолокационной обстановке. Представлен сравнительный анализ современных методов по определению угловых координат источника радиоизлучения. Отмечено, что определение угловых координат источника радиоизлучения выполняется навесным оборудованием летательных аппаратов. Рассмотрены методы амплитудной и фазовой пеленгации. Отмечены их особенности, в том числе конструктивные при проектировании.

**Ключевые слова:** амплитудный пеленгатор, фазовый пеленгатор, угловая погрешность, точность измерения фазы, база, неоднозначность измерений, метод максимума, метод минимума, пеленгационная характеристика.

### Введение

В современном мире остро стоит задача определения координат источника радиоизлучения пассивными методами в сложной радиолокационной обстановке [1, 2]. Радиопеленгация как раз позволяет определить координаты радиоизлучения и при этом сохранить максимально возможные маскирующие свойства станции. В эпоху быстро развивающихся технологий остро стоит задача определения наличия факта радиоизлучения, идентификации сигнала и нахождения угловых координат источника радиоизлучения (ИРИ). Стоит отметить, что на качество обнаружения влияет очень много факторов. Понятие самого качества обнаружения уже является оценочной величиной. Задача обнаружения появляется только тогда, когда, во-первых, есть сигнал, который необходимо обнаружить, а во-вторых есть шум или помеховое воздействие на фоне которого стоит задача обнаружить направление на ИРИ. Только при выполнении одновременно вышеуказанных условий будет смысл в задаче обнаружения. Ведь от того насколько точно мы определим местоположение источника радиоизлучения будет зависеть скорость принятия ответных мер.

**Постановка задачи.** Будем полагать, что система для определения координат размещается на летательном аппарате (ЛА), в связи с чем сразу возникает ряд ограничений. Масса, энергопотребление, надежность конструкции, скорость обработки. Рассмотрим несколько вариантов проектировки комплекса. В первую очередь рассмотрим метод построения комплекса по определению координат источника радиоизлучения на основе классической фазовой пеленгации.

### 1. Фазовый метод определения координат источника радиоизлучения

Угловое положение объекта излучения в пространстве задается двумя угловыми координатами. Обычно это азимут  $\theta$  и угол места  $\psi$ , либо направля-

ющие косинусы  $\cos\alpha$ ,  $\cos\beta$ ,  $\cos\gamma$  относительно осей прямоугольной декартовой системы координат.

Пусть сектор приема сигналов по азимуту составляет минус  $45 \dots 45^\circ$ , по углу места – минус  $60 \dots 30^\circ$ . Конструктивно антенная решетка (АР) принимает сигналы в рабочем секторе  $\pm 45^\circ$ . Поэтому в крыле ЛА АР располагается с отрицательным наклоном в  $15^\circ$ , что обеспечивает сектор приема сигналов. Из рис. Рис. видно, что приняв за точку отсчета плоскость АР, сектор приема сигналов по горизонтали меняется в пределах  $45 \dots 135^\circ$ , по вертикали –  $45 \dots 135^\circ$ .

Чтобы выразить связь амплитудного и фазового пеленгаторов необходимо получить зависимости между азимутом, углом места и направляющими косинусами в соответствии с рис. Рис. :

$$\begin{aligned} \cos\beta &= \frac{OB}{OC} = \frac{OB}{OD} \frac{OD}{OC} = \sin\theta \cos\psi; \\ \cos\gamma &= \frac{CD}{OC} = \sin\psi; \\ \sin\theta &= \frac{AD}{OD} = \frac{AD}{OC} \frac{OC}{OD} = \frac{\cos\beta}{\sin\gamma} = \frac{\cos\beta}{\sqrt{1 - \cos^2\gamma}}; \\ \cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma &= 1. \end{aligned}$$

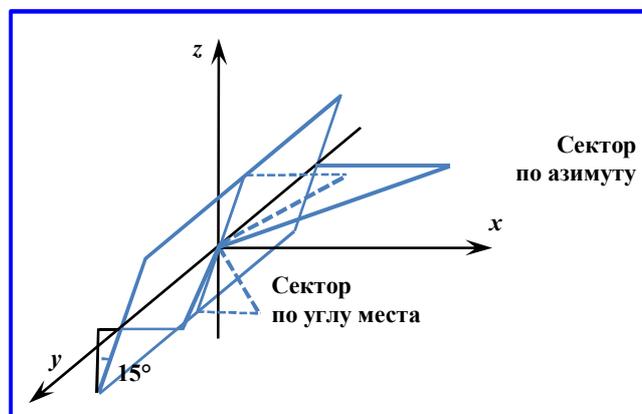


Рис. 1. Положение антенной решетки относительно плоскости самолета

Рассмотрим случай, когда полотно АР совпадает с плоскостью  $yz$ , источник сигнала находится в точке  $C$ , фронт волны – плоский,  $\vec{v} = (\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma)$  – единичный вектор направления на объект излучения, а пеленгация – вычисление направления на объект излучения  $\vec{v}$ .

Выделим три элемента решетки  $O(0, 0, 0)$ ,  $A_1(x_1, y_1, z_1)$ ,  $A_2(x_2, y_2, z_2)$ , причем  $x_1, x_2 = 0$  (рис. ).

Пусть измерение фазы производится на базах  $\vec{s}_1 = \vec{OA}_1$  и  $\vec{s}_2 = \vec{OA}_2$ . Тогда задержка сигнала  $\tau_1$  или  $\tau_2$ , поступающего на антенну  $A_1$  или  $A_2$  относительно антенны  $O$ , выражается как отношение проекции вектора базы на вектор направления прихода плоской волны к скорости распространения электромагнитной волны.

Представим проекцию одного вектора на другой через скалярное произведение:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{\text{ПР}_{\vec{v}} \vec{s}_1}{c} = \frac{1}{c} \frac{(\vec{s}_1, \vec{v})}{|\vec{v}|} = \\ &= \frac{1}{c} \frac{x_1 \cos \alpha + y_1 \cos \beta + z_1 \cos \gamma}{\sqrt{\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma}} = \\ &= \frac{1}{c} (x_1, y_1, z_1) \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \cos \beta \\ \cos \gamma \end{pmatrix}; \\ \Rightarrow \tau_1 &= \frac{\vec{s}_1 \vec{v}^T}{c}; \quad \tau_2 = \frac{\vec{s}_2 \vec{v}^T}{c}; \quad \tau = \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix} = \frac{S \vec{v}^T}{c}, \end{aligned}$$

где строки матрицы  $S$  составляют векторы фазометрических баз  $\vec{s}_1$  и  $\vec{s}_2$ .

Фаза электромагнитной волны определяется как  $\varphi = \frac{2\pi c}{\lambda} \tau$ , где  $\omega = \frac{2\pi c}{\lambda}$ .

Тогда полная разность фаз сигналов, наведенных на элементах решетки, в матричном виде определяется следующим равенством:

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} S \vec{v}^T.$$

Нетрудно заметить, что при выборе баз  $\vec{s}_1$  и  $\vec{s}_2$  пропорционально длине волны в формуле  $\lambda$  сокращается, а разность фаз сигнала  $\Phi$ , наведенного с одного и того же источника, на произвольной  $f$  и верхней  $f_B$  частотах рабочего диапазона будет отличаться в  $f/f_B$  раз, что позволяет упростить алгоритм вычисления направления в зависимости от частоты:

$$\frac{\Phi_f}{\Phi_{f_B}} = \frac{2\pi f}{c} \vec{s} \vec{v}^T / \frac{2\pi f_B}{c} \vec{s} \vec{v}^T = \frac{f}{f_B}.$$

Представим разность фаз сигналов на базах  $\vec{s}_1$  и  $\vec{s}_2$  в виде линейной системы уравнений [3]:

$$\begin{cases} 0 \cdot \cos \alpha + y_1 \cos \beta + z_1 \cos \gamma = \frac{\Phi_1}{2\pi}; \\ 0 \cdot \cos \alpha + y_2 \cos \beta + z_2 \cos \gamma = \frac{\Phi_2}{2\pi}. \end{cases}$$

По правилу Крамера данная линейная система из двух уравнений с двумя неизвестными имеет решение в виде:

$$\begin{cases} \cos \beta = \frac{1}{2\pi} \frac{\Phi_1 z_2 - \Phi_2 z_1}{y_1 z_2 - y_2 z_1}; \\ \cos \gamma = \frac{1}{2\pi} \frac{\Phi_2 y_1 - \Phi_1 y_2}{y_1 z_2 - y_2 z_1}. \end{cases}$$

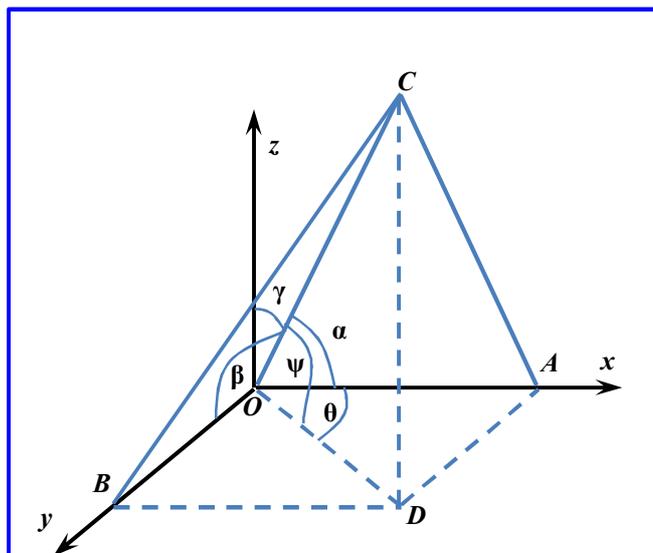


Рис. 2. Угловое положение объекта в пространстве

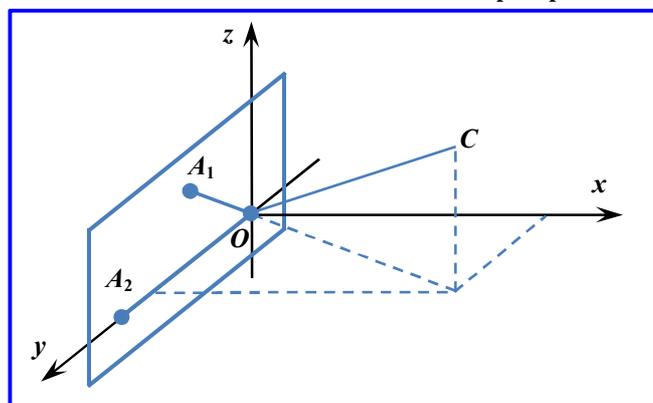


Рис. 3. Двухбазовый фазовый пеленгатор

В представлении через азимут  $\theta$  и угол места  $\psi$ :

$$\begin{cases} \sin \theta = \frac{1}{2\pi} \frac{\Phi_1 z_2 - \Phi_2 z_1}{y_1 z_2 - y_2 z_1} \left[ 1 - \left( \frac{1}{2\pi} \frac{\Phi_2 y_1 - \Phi_1 y_2}{y_1 z_2 - y_2 z_1} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}; \\ \sin \psi = \frac{1}{2\pi} \frac{\Phi_2 y_1 - \Phi_1 y_2}{y_1 z_2 - y_2 z_1}. \end{cases}$$

Таким образом, из полученной системы уравнений определяется направление на объект излучения двухбазовым (двухкоординатным) фазовым пеленгатором с решеткой, расположенной в вертикальной плоскости  $yz$ .

Разность фаз  $\varphi$ , измеряемая фазометром, определена лишь на одном периоде волны, т. е.  $\varphi \in [-\pi; \pi]$ . Определим связь полной и измеренной фаз:

$$\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\bar{s}_1, \bar{v}) = \frac{2\pi}{\lambda} |\bar{s}| |\bar{v}| \cos(\widehat{\bar{s} \bar{v}}) = \frac{2\pi s}{\lambda} \cos(\widehat{\bar{s} \bar{v}}).$$

На элементы антенной решетки сигнал может наводиться с любого фронтального направления, поэтому косинус угла между фазометрической базой и направлением на объект принимает значения в пределах от минус 1 до 1.

$$\begin{aligned} \Phi_{\min} &= -\frac{2s}{\lambda} \pi, \text{ при } \cos(\widehat{\bar{s} \bar{v}}) = -1; \\ \Phi_{\max} &= \frac{2s}{\lambda} \pi, \text{ при } \cos(\widehat{\bar{s} \bar{v}}) = 1; \\ \Delta\Phi &= \frac{4\pi s}{\lambda}; \quad \Delta\varphi = 2\pi; \quad \frac{\Delta\Phi}{\Delta\varphi} = \frac{2s}{\lambda} = k_\Phi, \end{aligned}$$

где  $k_\Phi$  – коэффициент пропорциональности.

При однозначной пеленгации фазовым методом, когда измеренной фазе соответствует единственное направление на объект,  $k_\Phi \leq 1$ ,  $s \leq \lambda/2$ . Полная разность фаз сигналов  $\Phi$  полностью превосходит период волны, если  $k_\Phi > 1$  и  $s > \lambda/2$ . При  $k_\Phi = 1$ ,  $s = \lambda/2$ ,  $\Phi \in [-\pi; \pi]$ .

При работе пеленгатора в диапазоне частот требование однозначности пеленгации должно выполняться для сигналов с максимальной частотой, так  $k_\Phi$  прямо пропорционален частоте.

Разность фаз на антеннах  $\Phi$  представима через измеренное фазометром значение  $\varphi$  в виде:

$$\Phi = \varphi + 2\pi k,$$

где  $k$  – число полных периодов разности фаз, утраченных при измерениях в силу периодичности. Нетрудно заметить, что при  $k_\Phi \leq 1$ ,  $k = 0$ ;  $1 < k_\Phi \leq 3$ ,

$k = -1, 0, 1$ ;  $3 < k_\Phi \leq 5$ ,  $k = -2, \dots, 2$ ;  $5 < k_\Phi \leq 7$ ,  $k = -3, \dots, 3$ . Таким образом, подставляя последовательно целые значения  $k$ , мы получим все возможные значения вектора направления  $\bar{v}$ .

## 2. Амплитудный метод определения координат источника радиоизлучения

Рассмотрим принцип построения пеленгатора, построенного на базе метода амплитудной пеленгации, при определении угловой координаты состоит из амплитудного углового датчика, преобразователя информации и дискриминатора. Схема пеленгатора представлена на рис. 4.

Пеленгатор усиливает принятый антеннами сигнал, селективирует по частоте, оцифровывает, вычисляет основные характеристики радиотехнических средств, такие как: несущая частота, длительность импульсов, период следования, мощность. Полученная информация позволяет идентифицировать радиотехнические средства. Основными оцениваемыми параметрами являются несущая частота, длительность импульсов, период следования, мощность и направление на ИРИ.

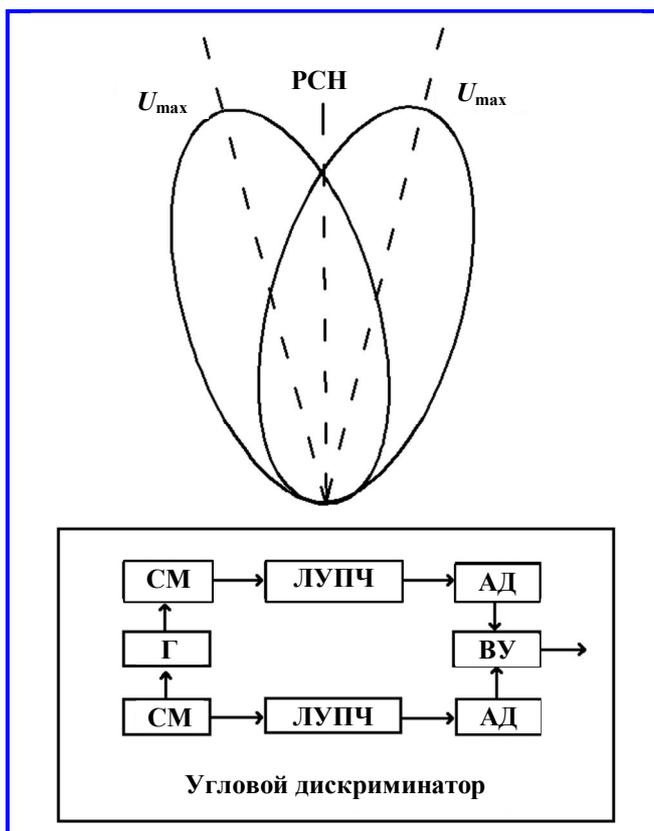


Рис. 4. Схема амплитудно-амплитудного моноимпульсного пеленгатора, где АД – амплитудный детектор; ВУ – вычитающее устройство; СМ – смеситель; Г – гетеродин; РСН – равносигнальное направление

Влияние одной антенны на другую необходимо учитывать. С этой целью в современных пеленгаторах существует канал калибровки, позволяющий выровнять тракт относительно друг друга

В свою очередь дискриминатор содержит два приемных канала, в тракте усилителя промежуточной частоты (УПЧ) которых применены усилители с логарифмическими амплитудными характеристиками (ЛУПЧ). Поэтому на выходе вычитающего устройства формируется дискриминационная (пеленгационная) характеристика вида:

$$U(\theta_p) = \ln \left[ f_a(\theta_0 + \theta_p) / f_a(\theta_0 - \theta_p) \right],$$

где  $\theta_p$  – угол между направлением на цель и равносигнальным направлением;  $f_a(\theta_0 \pm \theta_p)$  – значение нормированной диаграммы направленности антенны (ДНА), соответствующее углу  $\theta_p$ .

Логарифмические усилители служат для нормировки принятых сигналов в дискриминаторе, т. е. для формирования их отношения. При такой нормировке выходной сигнал дискриминатора  $U_{\text{вых}}$  не зависит от дальности до цели, величины  $S_0$  и амплитудных флуктуации принимаемых сигналов (при изменении амплитуды сигнала, одновременно принимаемого по двум ДНА, отношение  $f_a(\theta_0 + \theta_p) / f_a(\theta_0 - \theta_p)$  остается постоянным). Тем самым повышается точность определения угловых координат (рис. 5).

За счет калибровки коэффициентов усиления приемных каналов тестовыми сигналами на практике удается добиться среднеквадратичного отклонения порядка  $0,1\beta_\Delta$ .

Для обеспечения мгновенного обзора 90-градусного сектора амплитудный пеленгатор необходимо выполнять многоканальным.

Развёртка ожидаемой ДНА в азимутальной плоскости проиллюстрирована на рис. 6. Здесь максимум  $i$ -го лепестка ДНА развернут в пространстве относительно соседнего на величину, примерно равную половине ширины луча, за счёт введения линейного фазового сдвига в элементы решётки. Принцип работы такой системы основан на сравнении выходных сигналов, наведённых на антенну. Оценка осуществляется по разности мощности сигнала двух соседних лучей (рис. 7).

Точность такого пеленгатора определяется крутизной  $K$  дискриминационной характеристики  $G_d(\theta)$ :

$$K = \frac{G_i - G'_i}{\theta_i - \theta_{i-1}},$$

где  $G_i$  – коэффициент усиления антенны в максимуме  $i$ -го лепестка;  $G'_i$  – коэффициент усиления  $i$ -го лепестка антенны в точке его пересечения с осью  $(i - 1)$ -го;  $\theta_i$  – угол отклонения  $i$ -го лепестка АР относительно нормали к ней.

Пеленгатор тем точнее, чем шире разностная диаграмма АР по мощности  $G_d(\theta)$  и уже лучи.

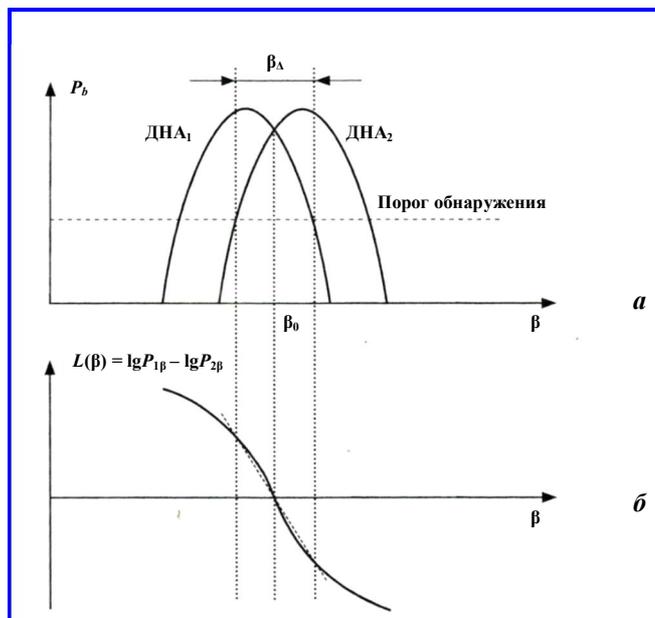


Рис. 5. Размещение антенн радиопеленгатора по угловым координатам (а); зависимость пеленгационной характеристики от угла сканирования (б)

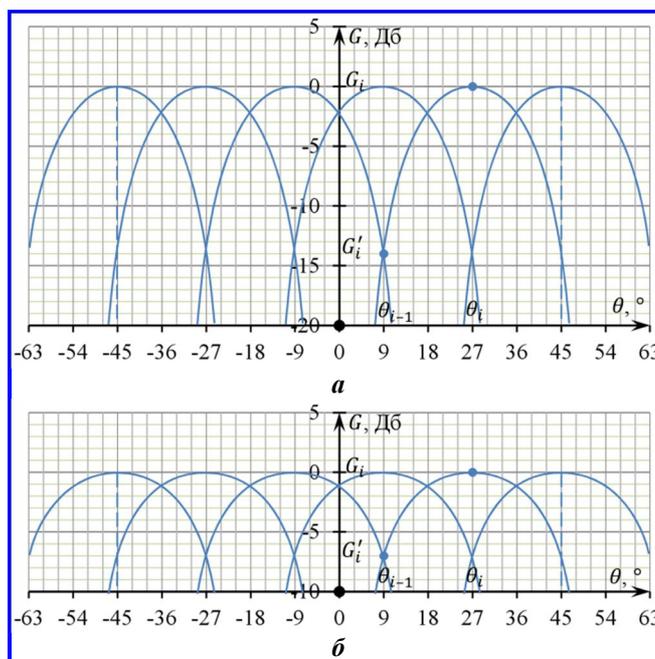


Рис. 6. Развёртка ожидаемой ДНА по мощности в азимутальной плоскости: а – на верхней частоте; б – на нижней

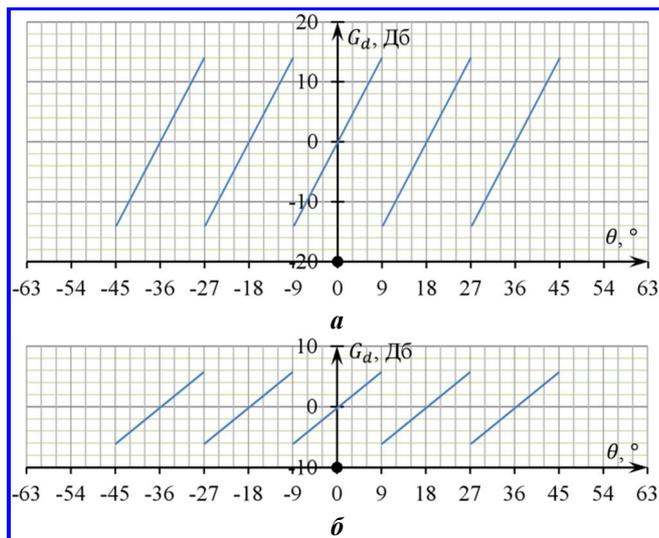


Рис. 7. Ожидаемая дискриминационная характеристика пеленгатора: *a* – на верхней частоте; *b* – на нижней

Из рис. 7, *a*, видно, что крутизна  $K_{f_v} = 28/18 = 1,56 \text{ Дб/}^\circ$ ;  $K_{f_n} = 14/18 = 0,78 \text{ Дб/}^\circ$ . Точность цифрового измерителя мощности составляет 1 Дб, что теоретически даёт дискрет измерения азимута  $0,64^\circ$  на  $f_v$  и  $1,28^\circ$  на  $f_n$ . Однако реально ДНА по мощности отличается от приведённой на рисунке выше, что приводит к систематической ошибке. Снятие пеленгационной характеристики ДНА позволяет её учесть и скомпенсировать.

Таким образом, данный шестиканальный амплитудный пеленгатор позволяет проводить измерения азимута в рабочем секторе с ошибкой менее  $1^\circ$  на верхней частоте и менее  $1,5^\circ$  на нижней.

### Заключение

Исходя из вышеизложенного можно сделать следующий вывод, что фазовые пеленгаторы имеют как положительные качества, так и отрицательные. К отрицательным можно отнести тот факт, что фазовые пеленгаторы очень критичны к идентичности приемных трактов. Это в свою очередь накладывает определенные аппаратные ограничения на калибровку трактов. Также стоит отметить, что одно из важнейших достоинств фазового пеленгатора заключается в том, что при фиксированной фазовой погрешности, угловая погрешность может быть сделана сколько угодно малой, если отношение базы к длине волны очень большое. Понятно, что уменьшать длину волны нецелесообразно, так как зачастую длина волны задается в техническом задании фиксированным значением и нам остается варьировать лишь длиной базы. Но и здесь есть свои ограничения. Так увеличение

длины базы в двухканальных пеленгаторах приведет к появлению неоднозначности фазовых измерений [4, 5]. Именно поэтому необходимо строить многобазовые системы пеленгации [6], в которых измерения происходят от более грубых шкал (с длинной базой) до более точных (с короткой базой) шкал. В свою очередь применение амплитудной пеленгации позволяет значительно упростить конструкцию построения пеленгатора на ЛА. И фазовый, и амплитудный методы пеленгования имеют как достоинства, так и недостатки. Необходимо исходя из тактико-технических характеристик выбирать любой из рассмотренных методов, а в некоторых случаях целесообразно использовать комбинированный метод пеленгации.

Сравнивая рассмотренные методы можно прийти к следующим выводам: и амплитудный, и фазовый пеленгатор показывают хорошие точностные характеристики при определенных допущениях. Так стоит отметить, что в реальных условиях зачастую существует не чистое синусоидальное колебание с постоянной амплитудой, а аддитивная смесь сигнала и шума. Чем выше отношение сигнал/шум соответственно, тем точнее определяется направление источника радиоизлучения в классическом амплитудном методе [7]. В данной работе мы пока не затрагиваем вероятностные характеристики обнаружения. Но применяя комбинированную схему пеленгатора (амплитуда и фаза) можно добиться хороших практических результатов, даже при маленьком отношении сигнал/шум.

### Литература

1. Золотарёв И. Д. Фазовые пеленгаторы в условиях радиоэлектронной борьбы / И. Д. Золотарёв, В. А. Березовский // Омский научный вестник. – 2009. – № 3 (83). – С. 264–268.
2. Дятлов А. П. Амплитудный пеленгатор с повышенной помехозащищённостью / А. П. Дятлов, П. А. Дятлов, Б. Х. Кульбикаян // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2004. – № 2. – С. 46–49.
3. Бакулев П. А. Радионавигационные системы / П. А. Бакулев, А. А. Сосновский. – Москва : Радиотехника, 2005. – 225 с.
4. Денисов В. П. Исследование работы фазового пеленгатора с квазиоптимальным устранением неоднозначности на наземных трассах / В. П. Денисов, Д. В. Дубинин, М. В. Крутиков [и др.] // Доклады ТУСУРа. – 2011. – № 2 (24). – Часть 1. – С. 7–15.
5. Lipsky Stephen E. Microwave passive direction finding / Stephen E. Lipsky. – Raleigh, USA : SciTech Publishing, Inc., 2004. – 320 p.
6. Денисов В. П. Фазовые радиопеленгаторы / В. П. Денисов, Д. В. Дубинин. – Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2002. – 251 с.
7. Об интеграции методов формирования и исследования

изображений объектов на фоне шумов и помех / Russian Technological Journal. – 2020. – 8 (2). – P. 33–42. – М. Т. Нгуен, В. И. Нефедов, Н. С. Чекалкин [и др.] // DOI : 10.32362/2500-316X-2020-8-2-33-42.

Поступила в редакцию 02.12.2022

*Арарат Артурович Симонян, преподаватель кафедры РЭСК, e-mail: simonyan2206@ya.ru.  
Сергей Николаевич Замуруев, доктор технических наук, заведующий кафедрой РЭСК,  
e-mail: zamuruevsn@mail.ru.  
Т. +7 (499) 215-65-65 # 2015.  
(МИРЭА – Российский технологический университет).*

## RESEARCH AND COMPARATIVE ANALYSIS OF MODERN METHODS FOR DETERMINING THE ANGULAR COORDINATES OF A RADIO SOURCE

**A. A. Simonyan, S. N. Zamuruev**

**At present, the task of determining the coordinates of the radio emission source by passive methods in a complex radar environment is urgent. The work presents a comparative analysis of modern methods to determine the angular coordinates of the radio emission source. It is noted that the determination of angular coordinates of the radio emission source is performed by mounted equipment of aircraft. The methods of amplitude and phase direction finding are considered. Their peculiarities, including constructive in their design, are noted. Keywords: amplitude direction finding, phase direction finder, angular error, the accuracy of the phase measurement, the base, the un-certainty in the measurements, maximum method, minimum method, direction finding characteristic.**

### References

1. Zolotarev I. D. Phase Direction Finders Under Conditions of Electronic Warfare / I. D. Zolotarev, V. A. Berezovskii // Omsk Scientific Bulletin. – 2009. – No. 3 (83). – P. 264–268.
2. Diatlov A. P. Amplitude Direction Finder with Increased Noise Immunity / A. P. Diatlov, P. A. Diatlov, B. Kh. Kulbikaian // University News. North Caucasian Region. Series: Technical Sciences. – 2004. – No. 2. – P. 46–49.
3. Bakulev P. A. Radionavigation systems / P. A. Bakulev, A. A. Sosnovskii. Moscow : Radiotekhnika, 2005. – p. 225.
4. Denisov V. P. Quasi-Optimal Method to Avoid the Ambiguity of Bearing Estimation by Terrestrial Finder / V. P. Denisov, D. V. Dubinin, M. V. Krutikov [et. al] // Proceedings of TUSUR University. – 2011. – No. 2 (24). – Part 1. – P. 7–15.
5. Lipsky Stephen E. Microwave Passive Direction Finding / Stephen E. Lipsky. – Raleigh, USA : SciTech Publishing, Inc., 2004. – p. 320.
6. Denisov V. P. Phase Direction Finders / V. P. Denisov, D. V. Dubinin. – Tomsk : Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 2002. – p. 251.
7. On the Integration of Methods of Generation and Study of Object Images with Background Noise and Interferences / M. T. Nguyen, V. I. Nefedov, N. S. Chekalin [et. al] // Russian Technological Journal. – 2020. – 8 (2). – P. 33–42. – DOI : 10.32362/2500-316X-2020-8-2-33-42.

*Ararat Arturovich Simonyan, Lecturer at the Department of RSC, e-mail: simonyan2206@ya.ru.  
Sergey Nikolaevich Zamuruev, Doctor of Technical Sciences, Head of Department of RSC, e-mail: zamuruevsn@mail.ru.  
Tel. +7 (499) 215-65-65 # 2015.  
(MIREA – Russian Technological University).*