

## ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВ ПРИХОДА ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ВЗАИМНО ОРТОГОНАЛЬНЫХ АНТЕНН

Митихин Ю.В. к.ф.-м.н., доцент

Черкасский государственный технологический университет

На основе известных принципов построения систем радиопеленгации рассмотрен новый суммарно-разностный метод измерения вертикальных углов прихода декаметровых радиоволн в амплитудных радиопеленгаторах. Предложенный алгоритм измерения углов прихода декаметровых радиоволн в вертикальной плоскости позволяет повысить эффективность серийных амплитудных радиопеленгаторов типа Р-359.

**Ключевые слова:** ионосферный канал, распространение радиоволн, углы прихода, радиопеленгация, азимут, угол места, траектория распространения, характеристики радиосигнала.

### Введение

Углы прихода радиоволн относятся к числу наиболее важных характеристик при оценке траекторий распространения декаметровых радиоволн в ионосферных каналах. В частности, распределение углов прихода позволяет установить функциональные связи ошибок измерения различных систем радионавигации с параметрами ионосферы, что важно для разработки алгоритмов повышения точности угловых измерений [1-3]. Одним из методов измерения направления прихода высокочастотных радиосигналов является фазовый метод, основанный на измерении разности фаз когерентных сигналов, принятых на две антенны, фазовые центры которых разнесены в пространстве на некоторую базу  $d$  [4].

Но, как известно, фазовые измерения относятся к числу наиболее тонких и сложных, требующих значительных технологических и материальных затрат, что затрудняет их реализацию на практике. По этой причине на практике большее распространение получил другой – амплитудный метод, на основе которого создана большая серия амплитудных радиопеленгаторов типа Р-359, используемых для местопредопределения излучающих станций в декаметровом диапазоне волн.

### Постановка задачи

Существенным ограничением амплитудных радиопеленгаторов является то, что они предназначены для измерения исключительно

азимутальных углов прихода радиоволн и совсем не предназначены для измерения углов места. В этой связи представляется целесообразным дополнить амплитудные радиопеленгаторы возможностью измерения углов прихода в вертикальной плоскости, применив для этого суммарно-разностный метод измерения суммы и разности двух напряжений, снимаемых с одних и тех же разнесенных в пространстве антенн, ориентированных в направлении прихода сигнала.

**Key words:** ionospheric channel, radio-wave propagation, wave angle, direction finding, azimuth, angle of elevation, propagation trajectory, radio signal characteristics.

азимутальных углов прихода радиоволн и совсем не предназначены для измерения углов места. В этой связи представляется целесообразным дополнить амплитудные радиопеленгаторы возможностью измерения углов прихода в вертикальной плоскости, применив для этого суммарно-разностный метод измерения суммы и разности двух напряжений, снимаемых с одних и тех же разнесенных в пространстве антенн, ориентированных в направлении прихода сигнала.

### Методы измерения углов прихода

**Фазовый метод** измерения углов прихода радиоволн становится понятным при рассмотрении двух пар антенн, ортогонально расположенных на земной поверхности  $A_0-A_1$  и  $A_0-A_2$  (антенна  $A_0$  общая) и ориентированных в направлении «север-юг» (С-Ю) и «восток-запад» (В-З), как показано на рис. 1. Рассмотрим основные положения фазового метода.

Представим электромагнитное поле отраженного от ионосферы радиосигнала в свободном полупространстве на нижней границе ионосферного слоя в виде комплексного вектора

$$\vec{E} = Ae^{jf}, \quad (1)$$

где  $A$  и  $f$  – амплитуда и фаза электрической составляющей полного поля сигнала.

Тогда углы прихода можно выразить через проекции фазы полного поля сигнала на поверхность Земли

$$\begin{cases} f_y = k_0 \cos b \cos a, \\ f_x = k_0 \cos b \sin a, \end{cases} \quad (2)$$

где  $k_0 = \frac{2p}{l}$  – волновое число,

$l$  – длина волны;

$b$  – вертикальный угол прихода, отсчитываемый от поверхности Земли в вертикальной плоскости;

$a$  – азимутальный угол прихода, отсчитываемый в горизонтальной плоскости относительно направления С – Ю.

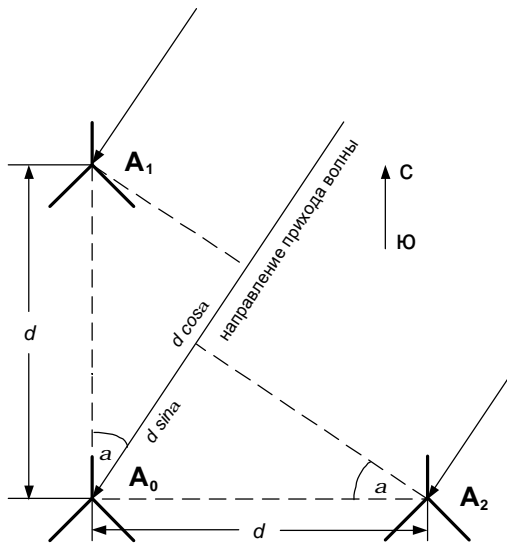


Рис. 1. Схематичное изображение двух пар антенн, ориентированных в направлении С-Ю и В-З

Разность фаз напряжений принимаемого сигнала в приемных антеннах ортогональных пар составляет

$$\begin{cases} \Phi_{01}^{C-Ю} = p \frac{d}{l} \cos a \cos b, \\ \Phi_{02}^{B-З} = p \frac{d}{l} \sin a \cos b, \end{cases} \quad (3)$$

где  $d$  – пространственный разнос антенн;

$l$  – длина волны принимаемого сигнала.

Откуда получаем

$$\begin{cases} a = \arctg \frac{\Phi_{02}^{B-З}}{\Phi_{01}^{C-Ю}}, \\ b = \arccos \frac{1}{p \frac{d}{l}} \sqrt{(\Phi_{02}^{B-З})^2 + (\Phi_{01}^{C-Ю})^2}. \end{cases} \quad (4)$$

Выражение (4) дает истинное значение азимута  $a$  (с точностью до квадранта) и вертикального угла  $b$  при условии:  $d \ll l$ . Это соответствует также условию:  $\Phi_{02}^{B-З}, \Phi_{01}^{C-Ю} \leq p$  и

равенствам  $\Phi_{02}^{B-З} = \gamma^{B-З}, \Phi_{01}^{C-Ю} = \gamma^{C-Ю}$ , где  $\gamma^{B-З}, \gamma^{C-Ю}$  – разности фаз (фазовые углы) напряжений в ортогональных парах антенн (рис. 1), измеренные в пределах  $0-180^\circ$ .

Таким образом, измеряя разность фаз сигналов, принимаемых с двух разнесенных во взаимно-перпендикулярных направлениях пар антенн С–Ю и В–З, можно определять углы прихода радиосигнала в горизонтальной (азимут) и вертикальной (угол места) плоскостях.

**Амплитудный метод** измерения углов прихода радиоволн применяется исключительно для определения направления (азимута) на излучающую станцию и в этой связи во многом аналогичен фазовому методу. Отличие от фазового метода заключается в том, что в разнесенных в пространстве двух пар ортогональных антенн измеряется не разность фаз, а разность напряжений, что значительно проще по техническому исполнению. Информация об азимутальном угле прихода получается из отношения мгновенных значений двух напряжений, снимаемых с двух ортогональных антенных пар [5, 6].

В современных амплитудных радиопеленгаторах измерение углов прихода в горизонтальной плоскости основано на известном принципе работы четырехмачтовых антенных систем с круговой диаграммой направленности и с двухканальным приемоиндикатором [7].

Структурная схема измерения горизонтального угла прихода радиосигнала в точке приема (азимут) показана на рис. 2, а. Из рассмотрения рисунка видно, что выходные напряжения двух каналов приемоиндикатора, к которым подключены две пары ортогональных антенных систем  $A_1$  и  $A_2$ , ориентированных на С–Ю и В–З соответственно, поступают на две пары взаимно перпендикулярных пластин  $D_1$  и  $D_2$  электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) приемоиндикатора, по которой производится отсчет пеленга сигнала – азимута излучающей станции.

Предположим, что принимаемый радиосигнал приходит под углом  $a$  в горизонтальной плоскости к плоскости антенной пары  $A_1$  (рис. 2 а). Если все антенны сбалансированы, т.е. имеют одинаковые размеры и находятся в одинаковых условиях, то наведенные электродвижущие силы (ЭДС) в двух ортогональных парах антенн  $A_1$  и  $A_2$  будут соответственно равны

$$\begin{cases} E_{A_1} = E_0 \cos a, \\ E_{A_2} = E_0 \sin a. \end{cases} \quad (5)$$

Если оба приемных канала приемоиндикатора (горизонтальный и вертикальный) идентичны, т.е. имеют одинаковые усиление и фазовые характеристики, то значения выходных напряжений этих каналов соответственно равны

$$\begin{cases} U_1 = U_0 \cos a, \\ U_2 = U_0 \sin a. \end{cases} \quad (6)$$

При одновременном воздействии напряжений  $U_1$  и  $U_2$  на пару горизонтальных и вертикальных отклоняющих пластин приемоиндикатора на экране ЭЛТ будет высвечиваться прямая линия\*, наклон которой к вертикали равен азимутальному углу прихода в горизонтальной плоскости, поскольку

$$\frac{U_2}{U_1} = \operatorname{tg} a. \quad (7)$$

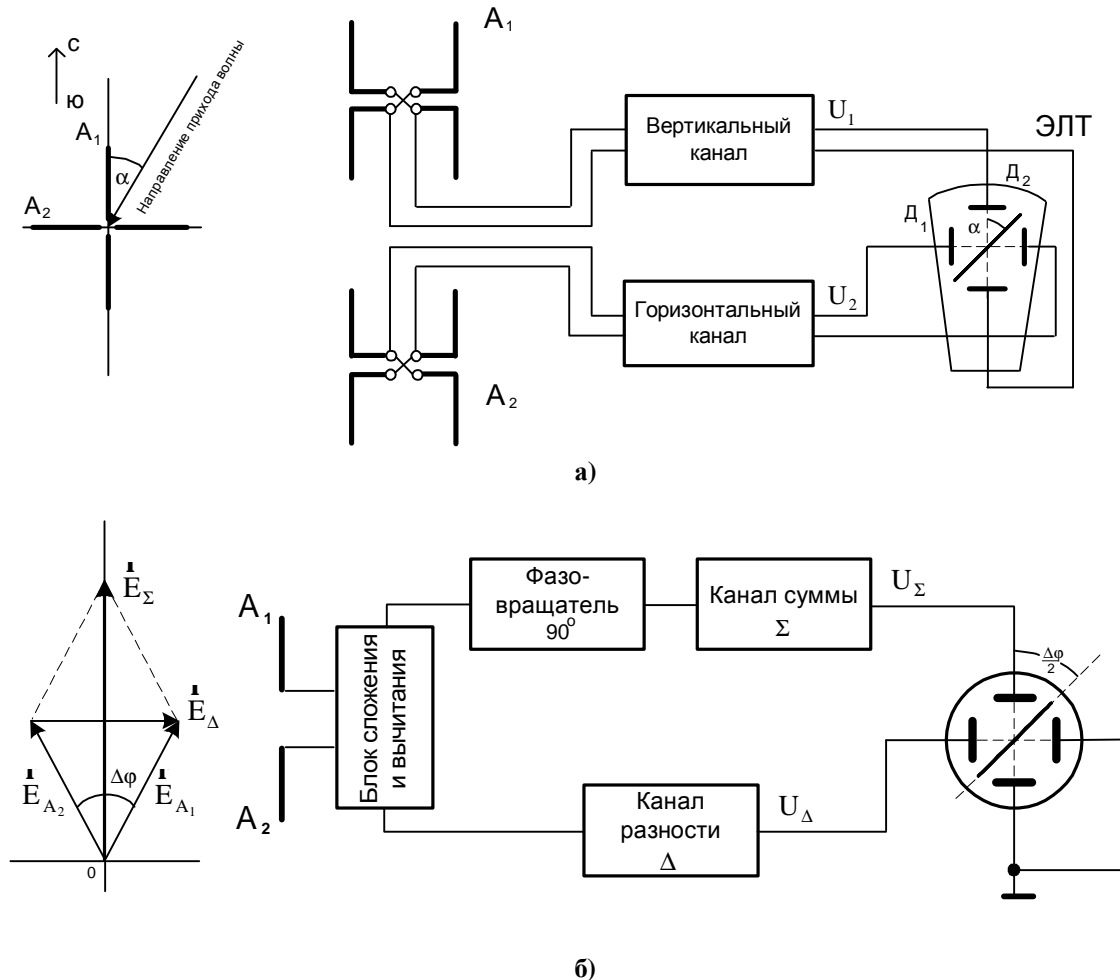


Рис. 2. К пояснению амплитудного метода измерения углов прихода радиоволн: (а) в горизонтальной плоскости; (б) в вертикальной плоскости

**Информация о вертикальном угле прихода  $b$**  в амплитудных радиопеленгаторах заключена в косинусной или синусной составляющей фазы полного поля сигнала выражения (2). Для измерения вертикального угла прихода можно воспользоваться суммарно-разностным методом, принцип которого схематично показан на рис. 2, б. Здесь две приемные антенны  $A_1$  и  $A_2$  разнесены на расстояние  $d$  ( $d \ll l$ ) в направлении азимута пеленгуемой станции. Складывая и вычитая действующие

значения напряжений, поступающих с этих антенн, на выходе суммарно-разностного устройства получим два ортогональных напряжения суммы  $U_S$  и разности  $U_D$ , которые с учетом соотношения (3) равны

$$\begin{cases} U_\Sigma = E_m \cos\left(\frac{pd}{l} \cos b \cos a\right), \\ U_\Delta = E_m \sin\left(\frac{pd}{l} \cos b \cos a\right). \end{cases} \quad (8)$$

\*.) Чаще всего на экране высвечивается не прямая линия, а эллипс, что связано с наличием фазовых сдвигов в наведенных сигналах в приемных антеннах из-за переизлучения от окружающих предметов.

Если подать напряжение суммы  $U_S$  в вертикальный канал приемоиндикатора, а напряжение разности  $U_D$  – в горизонтальный, то на экране ЭЛТ получим изображение прямой линии (или эллипса) под углом  $D\varphi/2$  к вертикали (рис. 2, б)

$$\frac{U_D}{U_S} = \operatorname{tg} \frac{\Delta j}{2}. \quad (9)$$

Принимая во внимание соотношение

$$\frac{U_D}{U_S} = \operatorname{tg} \left( \frac{pd}{l} \cos b \cos a \right), \quad (10)$$

находим

$$\frac{D\varphi}{2} = \frac{pd}{l} \cos b \cos a. \quad (11)$$

Как следует из векторной диаграммы рис. 2 б сложение сигналов приводит к повороту фазы суммарного сигнала относительно разностного на  $90^\circ$ . Поэтому чтобы определить истинную разность фаз напряжения суммы и разности необходимо сделать эти напряжения синфазными. Для этого необходимо в канал суммы (или разности) включить фазосдвигающую цепь на  $90^\circ$  для компенсации «аналитического» сдвига разности фаз.

Таким образом, определив предварительно по классической схеме в штатном ре-

жиме работы радиопеленгатора азимутальный угол прихода сигнала  $a$ , при известной базе антенной системы  $d$  и по измеренному углу  $D\varphi/2$  окончательно находим угол прихода радиосигнала в вертикальной плоскости

$$b = \arccos \frac{l \Delta \varphi}{2pd \cos a}. \quad (12)$$

Для измерения углов места на амплитудных радиопеленгаторах с помощью предложенного суммарно-разностного метода необходимо, как следует из изложенного, несколько провести модернизацию антенной системы стандартного варианта, а именно необходимо дополнительно развернуть цепочку  $n$  приемных антенн, разнесенных на расстояние  $d$ . К примеру, для радиопеленгатора типа Р-359 дополнительные антенны можно установить рядом или вокруг приемной системы штыревых антенн по кругу с радиусом  $d$ , как показано на рис. 3. Радиопеленгаторы типа Р-359, Р-368, Р-700 довольно просто могут быть приспособлены для подобных измерений без значительных затрат на модернизацию, поскольку они, как правило, имеют коммутаторы, схемы сложения и вычитания, которые можно использовать для подключения к дополнительной антенной системе при измерении углов места.

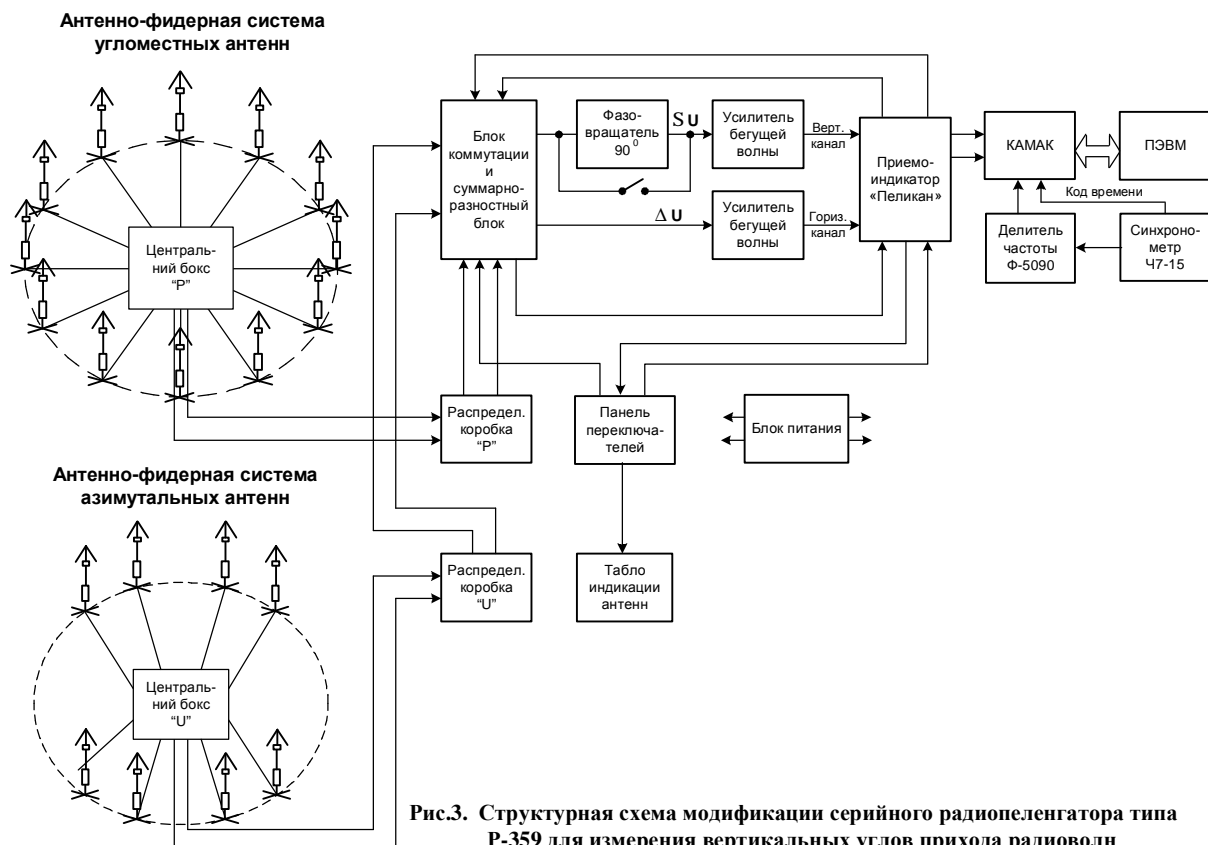


Рис.3. Структурная схема модификации серийного радиопеленгатора типа Р-359 для измерения вертикальных углов прихода радиоволн

**Заключення**

Предложенный в работе суммарно-разностный метод измерения углов прихода радиоволн в вертикальной плоскости может быть реализован на базе серийных амплитудных радиопеленгаторов типа Р-359.

Измерение углов прихода в вертикальной и горизонтальной плоскости одновременно может существенно повысить эффективность использования серийных радиопеленгаторов без значительных материальных затрат на их модернизацию, в том числе и для решения задачи определения координат источников ВЧ радиоизлучения из одной точки. В настоящее время для этой цели, как известно, требуется несколько таких точек измерения с размещением соответствующих пеленгаторных пунктов.

Вместе с тем необходимо отметить, что важной проблемой в радиопеленгации остается исключение многолучевости, характерной для ионосферного распространения радиоволн. Одним из возможных путей решения подобной задачи является разделение ионосферных мод по доплеровскому спектру частот сигнала. Возможность такого разделения основана на том, что каждая мода при распространении через ионосферу получает индивидуальный сдвиг по частоте.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Агарышев А.И., Унучков В.Е. Диапазон изменений углов места для различных способов

распространения декаметровых радиоволн // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. – М.: Наука. – 1987. – Вып. 77. – С. 60–65.

2. Ковалевская Е.М. Влияние горизонтальной неоднородности ионосферы на боковые отклонения траекторий // Исследование распространения коротких радиоволн. – М.: Наука. – 1973. – С. 85–89.
3. Бахметьева Н.В., Игнатъев Ю.А., Митихин Ю.В. и др. Исследование характеристик сигналов наклонного зондирования высокоширотной ионосферы в различных геофизических условиях // Радиофизические исследования высокоширотной ионосферы. Изд. Кольского науч. центра РАН. Апатиты. – 1994. – С. 55–70.
4. Виноцкий А.С. Автономные радиосистемы. – М.: Радио и связь. – 1986. – 335 с.
5. Соненберг Г.Д. Радиолокационные и навигационные системы. / Пер. с англ. – Л.: Судостроение. – 1982. – 397 с.
6. Теоретические основы радиолокации. / Под ред. В.Е. Дулевича. – М.: Сов. радио. – 1978. – 608 с.
7. Митихин Ю.В., Квасников В.П. Аппаратно-программный комплекс исследования ионосферных радиоканалов. // Труды II Междунар. конф. по радиосвязи, звуков. и телевиз. вещанию «УкрТелеКом-95». (Одесса 22–25 сентября) – 1995. – С. 232–236.

**Мітіхін Ю.В.**, к.ф.-м.н., доцент, Черкаський державний технологічний університет.