

**ПОКАЗАТЕЛИ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
УГЛОВЫХ И ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ  
РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СРЕДСТВАМИ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО КОНТРОЛЯ  
В УСЛОВИЯХ ДАЛЬНОГО ТРОПОСФЕРНОГО  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН**

д.т.н., проф. А.В. Кобзев, А.Н. Бовкун

*Проводится сравнительный анализ показателей точности амплитудных пеленгаторов в условиях дальнего тропосферного распространения (ДТР) радиоволн. Также для условий ДТР приводится сравнительная оценка показателей точности измерения пространственных координат источников радиоизлучения (ИРИ) пеленгационным и разностно-дальномерным способами.*

**Постановка задачи.** Одной из задач средств радиоэлектронного контроля (РЭК) является определение пространственных координат ИРИ. Эту задачу решают многопозиционные средства РЭК, которые в качестве первичных координатных параметров обычно используют пеленги ИРИ или разность дальностей. Разностно-дальномерный метод измерения пространственных координат ИРИ характеризуется высокой точностью измерения пространственных координат ИРИ и пропускной способностью относительно пеленгационного метода [8]. При реализации разностно-дальномерного метода обычно используется беспоисковый метод обзора пространства в пределах заданного сектора, что достигается применением антенн с шириной диаграммы направленности (ДН) по азимуту  $\Delta\beta$  порядка  $100 \dots 120^\circ$  и коэффициентом усиления антенн  $G = 8 \dots 16$  дБ [8]. Указанные причины ограничивают рабочую зону разностно-дальномерных комплексов дальностью прямой видимости.

Необходимость радиоэлектронного контроля ИРИ, находящихся за радиогоризонтом, обусловила применение средств контроля, работающих с использованием эффекта ДТР радиоволн. Первичными координатными параметрами в этих средствах являются угловые координаты ИРИ. Для их измерения обычно используют различные разновидности амплитудного метода, которые характеризуются своими положительными и отрицательными свойствами. Поэтому сравнение показателей точности

различных амплитудных пеленгаторов в условиях ДТР является важной научно-технической задачей.

Учитывая высокие показатели точности разностно-дальномерного метода измерения пространственных координат в условиях прямой видимости, возникает задача сравнения точности измерения пространственных координат ИРИ пеленгационным и разностно-дальномерным способами при ДТР радиоволн.

**Анализ литературы.** С целью уменьшения аппаратных ошибок измерения угловых координат ИРИ, обусловленных неидентичностью амплитудных и частотных характеристик приемных каналов моноимпульсных пеленгаторов, в средствах РЭК нашли применение различные методы. В частности, широко используется последовательная коммутация сигналов, принятых левым и правым лучами пеленгационной антенны (левым и правым пространственным каналом) на единственное приемное устройство. Скорость коммутации может быть разной. В настоящее время, в средствах РЭК широко используется черезпериодная коммутация пространственных каналов на входе приемного устройства (частота коммутации выбирается близкой к частоте повторения принимаемых импульсов). В [3] описывается способ быстрой (внутриимпульсной) коммутации пространственных каналов на входе приемного устройства. Этот способ заключается в многократном последовательном подключении пространственных каналов к приемному устройству в течении действия принимаемого импульса, т.е. осуществляется временное уплотнение сигналов, принятых различными пространственными каналами, после чего осуществляется совместная обработка группового сигнала.

Использование коммутации пространственных каналов в амплитудных пеленгаторах в условиях ДТР, когда наблюдаются быстрые флуктуации сигналов [1, 4], должно снизить показатели точности измерения угловых координат ИРИ относительно классического моноимпульсного пеленгатора.

**Цель статьи.** 1. Сравнительный анализ показателей точности измерения угловых координат ИРИ в условиях ДТР пеленгаторов трех типов. Первый – традиционный амплитудный моноимпульсный. Второй – пеленгатор с черезпериодной коммутацией пространственных каналов на входе приемного устройства. Третий – пеленгатор с внутриимпульсной коммутацией.

2. Сравнительный анализ потенциальных показателей точности пеленгационных и разностно-дальномерных многопозиционных систем РЭК в условиях ДТР.

**Влияние фазовых флуктуаций поля в раскрыве антенны на точность определения угловых ИРИ амплитудным моноимпульсным**

**пеленгатором.** При дальнем тропосферном распространении радиоволн, мгновенные диаграммы направленности антенн отличаются от диаграмм направленности антенн в свободном пространстве [7]. Эти отличия тесно связаны с характером флуктуаций поля в апертуре антенны и заключаются в увеличении уровня боковых лепестков, искажении формы главного лепестка, отклонении направления главного максимума и т.д. [7]. В той же работе получено выражение для СКО определения азимута амплитудной моноимпульсной системой определения угловых координат методом равносигнальной зоны

$$\sigma_{\text{мон}} = \sigma_{\varphi} \frac{\psi_1^2 \sqrt{I(c, 0, 0) \cdot (I(c, \psi_1, \psi_1) - I(c, \psi_1, -\psi_1))}}{4\sqrt{2}(\sin \psi_1 - \psi_1 \cos \psi_1)}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\varphi}$  – СКО фазы падающей волны в раскрыве антенны;  $\psi = \frac{\pi L}{\lambda} \sin \Theta$  – обобщенный угол;  $\Theta$  – угол между направлением на ИРИ и нормалью к

раскрыву антенны;  $I(c, \psi, \pm \psi_1) = \int_{-1}^1 \int e^{-\frac{(x-x_1)^2}{c^2} + j\psi x \mp j\psi_1 x_1} dx dx_1$ ;  $x, x_1$  – относительные координаты, равные:  $x = 2l/L$ ,  $l$  – линейная координата,  $L$  – длина

на стороны раскрыва;  $\psi_1 = \frac{k \cdot L \cdot y'}{2\phi}$ ,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $y'$  – вынос облучателя из фокуса,  $\phi$  – фокусное расстояние;  $c = 2l_0/L$ ,  $l_0$  – нормированный радиус корреляции показателя преломления турбулентной среды (средний размер турбулентных неоднородностей в тропосфере).

Известно, что для получения наибольшей крутизны пеленгационной характеристики, диаграммы направленности пеленгационной антенны пересекаются по уровню – 3 дБ. Тогда (1) преобразуется к виду

$$\sigma_{\text{мон}} \approx 0,436 \sigma_{\varphi} \sqrt{I(c; 0; 0) \cdot \left( I\left(c; \frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right) - I\left(c; \frac{\pi}{2}; -\frac{\pi}{2}\right) \right)}. \quad (2)$$

В дальнейшем величину  $\sigma_{\text{мон}}$  будем считать эталонной (потенциальной) точностью определения координат двухканальным амплитудным моноимпульсным пеленгатором в условиях ДТР и все полученные в дальнейшем результаты будем сравнивать с ней.

**Точностные характеристики измерения угловых координат амплитудным пеленгатором с коммутацией двух пространственных каналов с учетом пространственных и временных флуктуаций поля в раскрыве антенны.** Известно [7], что в случае ДТР поле в раскрыве антенны подвержено непрерывным колебаниям во времени. Причем ча-

стога этих колебаний может достигать десятков и даже сотен герц [1, 4], что приводит к дополнительным ошибкам измерения угловых координат

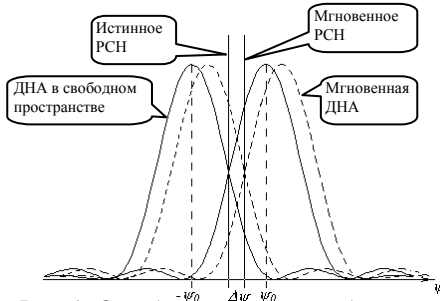


Рис. 1. Ошибки пеленгации, обусловленные пространственно-временными флуктуациями поля

ИРИ в пеленгаторах с коммутацией пространственных каналов. Проиллюстрируем влияние пространственно-временных флуктуаций поля в раскрыве антенны на ошибки измерения угловых координат ИРИ. Пусть ИРИ находится на равносигнальном направлении пеленгационной антенны станции РЭК (рис. 1). Наличие флуктуаций поля в падающей на раскрыв антенны волне по пространству и

времени ведет к случайному смещению мгновенной ДН [7], показанной на рис. 1 пунктиром, и, следовательно, к смещению мгновенного равносигнального направления. В результате, угловые координаты ИРИ определяются с ошибкой  $\Delta\psi$ , которую можно найти из выражения [7]:

$$\Delta\psi = \frac{P_1(t_1, y, 0) - P_2(t_2, y, 0)}{2P_0 G'(-\psi_0)}, \quad (3)$$

где  $P_1(t_1, y, 0)$  и  $P_2(t_2, y, 0)$  – мощность сигнала на выходах 1 и 2 антенны;  $\Delta\psi$  – отклонение мгновенного равносигнального направления от истинного значения (рис. 1);  $G'(\psi)$  – производная диаграммы направленности в свободном пространстве при облучателе, находящемся в фокусе;  $\psi_0$  – смещение максимума диаграммы направленности относительно равносигнального направления;  $P_0 = \frac{A_0^2 L^4}{\lambda^2 \phi^2}$  – интенсивность поля в фокусе при падении на антенну плоской волны.

Таким образом, из-за наличия временных и пространственных флуктуаций в падающей волне, мощность сигналов  $P_1(t_1, y', 0)$  и  $P_2(t_2, -y', 0)$  в облучателях 1 и 2 в фиксированные моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , соответственно, оказывается неравной даже при нахождении цели на нормали к апертуре пеленгационной антенны. Разность мощностей  $P_1$  и  $P_2$  определяет в соответствии с (3) ошибку определения координат, причем с течением времени она меняется случайным образом [7], т.к. случайными являются характеристики поля, падающего на раскрыв антенны. После возведения в квадрат выражения (3) и последующего усреднения правой части выражения по всем возможным реализациям, найдем дисперсию ошибки определения координат

$$\sigma_{\text{ком}}^2(t_1, t_2) = \langle (P_1(t_1) - P_2(t_2))^2 \rangle / (4P_0^2 G'(-\psi_0)^2). \quad (4)$$

После проведения ряда вычислений с использованием корреляционных функций поля по времени  $R_{\text{вр}} = \exp(-t^2/\tau_0^2)$  и по пространству  $R_{\text{пр}}(y, z) = \exp(-((y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2)/l_0)$ , найдем выражение для СКО измерения угловых координат ИРИ при последовательной коммутации парциальных лучей ДН, пересекающихся по уровню  $-3$  дБ, на вход одного приемника

$$\sigma_{\text{ком}} \approx 0,436 \sigma_{\varphi} \sqrt{I(c; 0; 0) \cdot \left( I\left(c; \frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right) - \exp\left(\frac{4\Delta t^2 D^2 v^2}{\lambda^2 R_{\text{эКВ}}^2}\right) I\left(c; \frac{\pi}{2}; -\frac{\pi}{2}\right) \right)}. \quad (5)$$

В дальнейшем, выражение (5) будем использовать как расчетное для оценки СКО измерения угловых координат ИРИ пеленгаторами с коммутацией пространственных каналов в каждом частотном канале.

**Сравнительный анализ показателей точности амплитудных пеленгаторов с коммутацией пространственных каналов при совместном учете параметров тропосферы и внутреннего шума приемного устройства.** Основным показателем, характеризующим качество измерения угловых координат пеленгаторами, является среднеквадратическая ошибка измерения угловых координат ИРИ [6]. Следовательно, для того, чтобы сравнить точностные характеристики пеленгатора с внутриимпульсной коммутацией и пеленгатора с черезпериодной коммутацией, достаточно сравнить потери в СКО измерений угловых координат указанными пеленгаторами относительно классического амплитудного моноимпульсного пеленгатора. Учитывая независимость ошибок, обусловленных средой распространения сигнала и внутренним шумом приемного устройства, результирующую СКО, найдем из выражения

$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\text{тр}}^2 + \sigma_{\text{ш}}^2}$ , где  $\sigma_{\text{тр}}^2$  – дисперсия измерения угловых координат ИРИ обусловленная флуктуацией поля на апертуре. Для амплитудного моноимпульсного пеленгатора и пеленгатора с внутриимпульсной коммутацией  $\sigma_{\text{тр}}$  определяется выражением (2), а для пеленгатора с черезпериодной коммутацией выражением (5),  $\sigma_{\text{ш}}^2$  – дисперсия измерения угловых координат ИРИ обусловленная внутренним шумом.  $\sigma_{\text{ш}}^2$  для традиционного моноимпульсного пеленгатора и пеленгатора с черезпериодной коммутацией определяются выражением [3]  $\sigma_{\text{ш}}^2 = \frac{0,25 P_{\text{ш}} \lambda^2}{P_c L^2}$ , а для пеленгатора с внутриимпульсной коммутацией, авторами получено выражение

$$\sigma_{\text{ш}}^2 = (0,25P_{\text{ш}}\lambda^2) / (P_c L^2),$$

где  $P_{\text{ш}}$  – мощность шума приемного устройства, пересчитанная на его вход;  $P_c$  – мощность сигнала;  $M$  – число коммутируемых пространственных каналов.

Для вычисления  $\sigma_{\text{тр}}$ , рассмотрим СКО фазы падающей волны в раскрыве антенны  $\sigma_{\varphi}^2$ . Как показано в [7], величина  $\sigma_{\varphi}^2$  равна

$$\sigma_{\varphi}^2 = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot C_{\varepsilon}^2 \cdot k^2 \cdot D \cdot l_0^{5/3}, \quad (6)$$

где  $C_{\varepsilon}^2 = 2 \cdot \langle \Delta n^2 \rangle / l_0^{2/3}$  – структурная характеристика диэлектрической проницаемости, равная  $10^{-18} \dots 10^{-13} \text{ см}^{-2/3}$  [1, 4];  $\sqrt{\langle \Delta n^2 \rangle}$  – СКО флуктуаций показателя преломления тропосферы, равная  $(0,5 \dots 3) \cdot 10^{-6}$  [1, 4];  $l_0$  – радиус корреляции показателя преломления среды. Его размеры колеблются от десятков метров до нескольких километров [4].

Используя теперь (2), (5) и (6), находим для среднеквадратической ошибки определения координат амплитудным моноимпульсным пеленгатором, пеленгатором с внутриимпульсной коммутацией и пеленгатором с черезпериодной коммутацией, соответственно:

$$\sigma_{\text{мон}} = \sqrt{0,19\alpha \langle \Delta n^2 \rangle k^2 l_0 D I(c; 0; 0) \cdot \left( I\left(c; \frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right) - I\left(c; \frac{\pi}{2}; -\frac{\pi}{2}\right) \right) + \frac{0,25P_{\text{ш}}\lambda^2}{P_c L^2}}; \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{БК}}(M) = \sqrt{0,19\alpha \langle \Delta n^2 \rangle k^2 l_0 D I(c; 0; 0) \cdot \left( I\left(c; \frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right) - I\left(c; \frac{\pi}{2}; -\frac{\pi}{2}\right) \right) + \frac{0,25M P_{\text{ш}}\lambda^2}{P_c L^2}}; \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{чк}}(T) = \sqrt{0,19\alpha \langle \Delta n^2 \rangle k^2 l_0 D I(c; 0; 0) \cdot \left( I\left(c; \frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right) - \exp\left(\frac{4\Delta t^2 D^2 v^2}{\lambda^2 R_{\text{ЭКВ}}^2}\right) I\left(c; \frac{\pi}{2}; -\frac{\pi}{2}\right) \right) + \frac{0,25P_{\text{ш}}\lambda^2}{P_c L^2}}. \quad (9)$$

Известно [4, 7], что СКО флуктуаций показателя преломления тропосферы является величиной случайной со средним значением  $(0,5 \dots 3) \cdot 10^{-6}$  и максимальным значением, равным  $5 \cdot 10^{-5}$ . Такой большой разброс значений

$\sqrt{\langle \Delta n^2 \rangle}$  ведет к тому, что выделить какая ошибка преобладает (шумовая либо ошибка, вызванная флуктуациями поля на апертуре) нельзя. В зависимости от времени суток, года, погодных условий и т. д. преобладающую роль во

вкладе в результирующую СКО будет вносить то  $\sigma_{\text{тр}}^2$ , то  $\sigma_{\text{ш}}^2$ . Графики зависимости  $\sigma_{\text{вк}}/\sigma_{\text{чк}}$  для  $M = 2, 3$  и  $4$ ,  $T = 3$  мс,  $P_{\text{с}}/P_{\text{ш}} = 5$ ,  $D = 300$  км,  $l_0 = 100$  м от длины волны принимаемого сигнала показаны на рис. 2, а, для  $\sqrt{\langle \Delta n^2 \rangle} = 0,5 \cdot 10^{-6}$ , и для  $\sqrt{\langle \Delta n^2 \rangle} = 5 \cdot 10^{-6}$  на рис. 2, б.

Зависимости, приведенные на рис. 2, показывают, что потери в СКО измерения угловых координат пеленгатора с внутриимпульсной коммутацией пространственных каналов и пеленгатора с черезпериодной коммутацией сильно зависят от длины волны принимаемого сигнала. Причем в пеленгаторе с внутриимпульсной коммутацией, чем меньше длина волны принимаемого сигнала, тем меньше потери, в пеленгаторе с черезпериодной коммутацией – наоборот. Такой ход кривых потерь

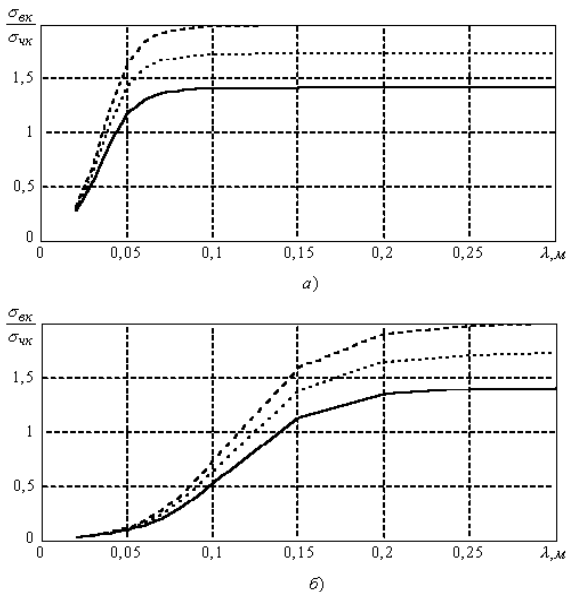


Рис. 2. Потери в СКО измерения угловых координат ИРИ

обусловлен тем, что в сантиметровом диапазоне длин волн преобладает ошибка измерения угловых координат, обусловленная флуктуацией поля в раскрыве антенны. В дециметровом диапазоне длин волн ошибка измерения угловых координат в основном обусловлена действием внутренних шумов. При этом точность измерения в сантиметровом диапазоне длин волн выше у пеленгатора с внутриимпульсной коммутацией, а в дециметровом у пеленгатора с черезпериодной коммутацией пространственных каналов.

Таким образом, ошибка измерения угловых координат амплитудными пеленгаторами с внутриимпульсной коммутацией и черезпериодной коммутацией каналов зависит от состояния тропосферы. В условиях, когда параметры тропосферы более стабильны, точность определения угловых координат выше у пеленгатора с черезпериодной коммутацией, чем у пеленгатора с внутриимпульсной коммутацией, и наоборот. Следовательно, нельзя однозначно ответить какой из приемников с коммутацией про-

странственных каналов обладает лучшими показателями точности.

**Сравнительный анализ потенциальных показателей точности измерения плоскостных координат пеленгационным и разностно-дальномерным методом.** Наиболее полно потенциальные показатели точности удобно оценивать потенциальными рабочими зонами многопозиционных систем РЭК.

В [5, 6] предложена общая методика построения рабочих зон для многопозиционных систем РЭК. На основании общего подхода, предложенного в указанной методике, рассчитаем рабочие зоны разностно-дальномерной системы измерения плоскостных декартовых координат ИРИ в условиях ДТР радиоволн. При проведении расчетов примем, что пеленгационная и разностно-дальномерная система состоят из трех разнесенных по пространству пунктов, причем для простоты анализа будем считать, что центральный приемный пункт совмещен с началом координат. Остальные периферийные пункты вынесены от центрального на величину  $J_1$  и  $J_2$ , которые в дальнейшем будем называть базами.

Как показано в [6], для любой системы измерения пространственных координат ИРИ дисперсия определяется выражением

$$\sigma_{\text{изм}}^2 = \text{tr} \left( \left( \mathbf{H}_{\text{ст}}^T \mathbf{R}_{\sigma}^{-1} \mathbf{H}_{\text{ст}} \right)^{-1} \right), \quad (10)$$

где  $\text{tr}$  – след матрицы;  $\mathbf{H}_{\text{ст}}$  – статическая матрица пересчета;  $\mathbf{R}_{\sigma}$  – матрица ошибок, при измерении плоскостных координат ИРИ пеленгационным методом она имеет размерность  $3 \times 3$ , при разностно-дальномерном методе  $2 \times 2$ . В состав элементов матрицы  $\mathbf{R}_{\sigma}$  входят дисперсии измерения первичных координатных параметров.

Дисперсия измерения разности дальностей однозначно выражается через дисперсию измерения разности времен прихода сигнала на центральный и периферийный пункты. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только дисперсию измерения разности времени прихода сигнала. Для среднего значения абсолютного отклонения времени прихода сигнала на приемный пункт при ДТР радиоволн в работах [1, 4] приведено выражение

$$\sigma_{\tau,i}^2 = 0,15 \frac{D^2 \Delta\beta}{c_{\text{св}} \cdot R_{\text{экв}}}, \quad (11)$$

где  $c_{\text{св}}$  – скорость света;  $R_{\text{экв}}$  – эквивалентный радиус Земли.

Так как флуктуации группового времени запаздывания на центральном и периферийных пунктах независимы, в силу того, что расстояние между ними составляет несколько десятков километров, а радиус корреляции сигналов при пространственном разнесе примерно равен  $100\lambda$  [1, 4], то, произведя замену дальности трассы ДТР  $D$  в (11) на соответ-



ствующие значения  $\gamma_0$  и  $\gamma_1$  и считая размеры антенн на всех трех приемных пунктах одинаковыми, найдем значение СКО измерения разности времени прихода сигнала при ДТР радиоволн

$$\sigma_{\Delta\tau,i} = \frac{0,15\Delta\beta}{c_{св} \cdot R_{экр}} \sqrt{\gamma_0^4 + \gamma_1^4}. \quad (12)$$

Заметим, что в выражения для  $\sigma_{\Delta\tau,i}$  значение несущей частоты не входит в явном виде, однако, при фиксированном размере апертур приемных антенн ширина диаграмм направленности  $\Delta\beta$  будет зависеть от несущей частоты, следовательно  $\sigma_{\Delta\tau,i}$  будет зависеть от несущей частоты принимаемых сигналов. Поэтому, в разностно-дальномерной системе измерения пространственных координат следует ожидать различные точности измерения координат ИРИ в пределах рабочего диапазона частот. На нижней границе диапазона точность должна быть наихудшей, а на верхней наилучшей.

Представляет интерес сравнить рабочие зоны разностно-дальномерных и пеленгационных систем измерения пространственных координат. Рабочие зоны пеленгационных систем строятся по той же методике. Отличие заключается только в статической матрице пересчета  $N_{ст}$  и матрице ошибок измерения наблюдаемых параметров  $R_{ст}$ . Одним из основных факторов, ограничивающих точность измерения координат ИРИ системами РЭК, являются размеры баз. При расчетах воспользуемся стандартными размерами баз для разностно-дальномерных систем  $J_1 = J_2 = 30$  км, для пеленгационных систем  $J_1 = J_2 = 150$  км.

На рис. 3 приведены рабочие зоны разностно-дальномерных и пеленгационных систем измерения пространственных координат ИРИ в условиях ДТР радиоволн. Рабочие зоны построены для требуемой СКО измерения координат, равной 5 км, радиус раскрытия приемной антенны выбран равным 1.4 м, приемные пункты комплексов расположены на одной прямой, средний размер неоднородностей коэффици-

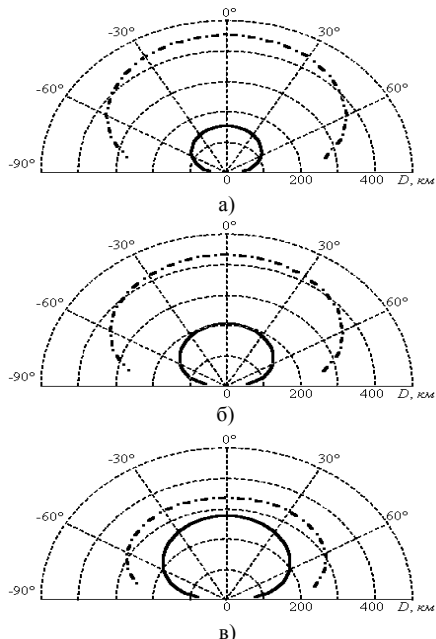


Рис. 3. Рабочие зоны многопозиционных систем РЭК

ента преломления равен 100 м,  $\sqrt{\langle \Delta n^2 \rangle} = 0,5 \cdot 10^{-6}$  [1, 4]. На рис. 3, а показаны рабочие зоны для длины волны 30 см, на рис. 3, б – для длины волны 10 см и на рис. 3, в – для  $\lambda = 3$  см. Рабочие зоны разностно-дальномерных систем показаны сплошной линией, а пеленгационных систем штрихпунктиром. Из анализа рабочих зон разностно-дальномерного комплекса РТР, показанных на рис. 3 сплошными линиями, видно, что точность измерения плоскостных координат ИРИ увеличивается с уменьшением длины волны принимаемого сигнала. Это объясняется тем, что при фиксированном значении апертур приемных антенн с ростом частоты ширина диаграмм направленности уменьшается, следовательно, уменьшается и тропосферный объем переизлучения и дисперсия группового времени запаздывания.

При анализе рабочих зон пеленгационных систем измерения плоскостных координат, изображенных на рис. 3 штрихпунктирной линией, необходимо обратить внимание на то, что чем короче длина волны принимаемых сигналов, тем хуже точность измерения плоскостных координат ИРИ, хотя при фиксированном значении апертуры антенны ширина диаграммы направленности антенны уменьшается. Этот парадоксальный на первый взгляд факт объясняется тем, что дисперсия флуктуаций фазы падающей волны в раскрыве антенны с уменьшением длины волны увеличивается, причем эта зависимость квадратичная, а зависимость ширины диаграммы направленности от длины волны принимаемого сигнала – линейная.

Сравнительный анализ потенциальных рабочих зон, приведенных на рис. 3, показывает, что разностно-дальномерный метод определения координат ИРИ условиях ДТР проигрывает пеленгационному в 1,21 раза при  $\lambda = 3$  см, в 2,12 раза при  $\lambda = 10$  см и почти в 3 раза при  $\lambda = 30$  см. Следовательно, использование разностно-дальномерных систем измерения пространственных координат ИРИ в условиях ДТР радиоволн ведет к ухудшению показателей точности системы радиоэлектронного контроля. С целью подтверждения полученных теоретических результатов было проведено имитационное моделирование разностно-дальномерных и пеленгационных систем измерения плоскостных координат на основе имитационной модели канала ДТР [2]. Результаты имитационного моделирования подтверждают результаты теоретических исследований.

**Выводы.** Сравнительный анализ потерь в СКО измерения угловых координат ИРИ пеленгаторами с черезпериодной и внутриимпульсной коммутацией пространственных каналов на входе приемного устройства относительно традиционного моноимпульсного пеленгатора показал, что характер потерь точности измерения азимута ИРИ у этих пеленгаторов разный. Если в пеленгаторе с черезпериодной коммутацией простран-

ственных каналов основной вклад в снижение точности вносит нестабильность тропосферного канала распространения радиоволн во времени, то в пеленгаторе с внутриимпульсной коммутацией потери точности обусловлены шумовыми свойствами, которые хуже чем у моноимпульсного пеленгатора. Однако, при их сравнении между собой в условиях ДТР, пеленгатор с внутриимпульсной коммутацией пространственных каналов обладает лучшими показателями точности. Еще одним положительным моментом этого пеленгатора является то, что временные затраты на измерение азимута ИРИ у него сравнимы с моноимпульсным пеленгатором.

Сравнительный анализ разностно-дальномерных и пеленгационных систем измерения плоскостных координат ИРИ в условиях ДТР позволяет сделать вывод о том, что показатели точности разностно-дальномерных систем РТР в условиях ДТР радиоволн хуже, чем у пеленгационного. Причем наибольший проигрыш в точности измерения координат разностно-дальномерной системой относительно пеленгационной, при условии фиксированных апертур приемных антенн, наблюдается на нижней границе рабочего диапазона частот, что обусловлено зависимостью группового времени запаздывания от ширины диаграммы направленности. Однако окончательный ответ о целесообразности применения разностно-дальномерного метода в условиях ДТР можно дать только после серии натурных экспериментов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Дальнее тропосферное распространение ультракоротких радиоволн / Арманд Н.А., Введенский Б.А., Гусятинский И.А. и др. / Под ред. Б.А. Введенского, М.А. Колосова, А.И. Калинина, Я.С. Шифрина. – М.: Сов. радио, 1965. – 415 с.*
2. *Кобзев А.В., Бовкун А.Н. Имитационная модель многолучевого канала дальнего тропосферного распространения радиоволн // Збірник наукових праць. – Х.: ХВУ. – 2001. – Вип. 7(37). – С. 41 – 43.*
3. *Леонов А.И., Фомичёв К.И. Моноимпульсная радиолокация. – М.: Сов. радио, 1970. – 392 с.*
4. *Рудаков В.И. Тропосферные системы связи с адаптивными антеннами. – К.: Авионика, 1999. – 292 с.*
5. *Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.*
6. *Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.*
7. *Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. – М.: Сов. радио, 1970. – 384 с.*
8. *Chlost O., Hakl P., Howland P., Moc J. PSS VERA and its integration into the Czech Air C2 System // Sensor&Electronics Technology Panel. – Warsaw, Poland, April 2001.*

Поступила 30.06.2003

**КОБЗЕВ Анатолий Васильевич**, доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры ХВУ. Область научных интересов – радиоэлектронный контроль.

**БОВКУН Александр Николаевич**, преподаватель кафедры ХВУ. Область научных интересов – радиоэлектронный контроль.

---