

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Денисов В.П.

**Антенные системы фазовых радиопеленгаторов**

Методические рекомендации по выполнению расчетного задания по курсу  
«Основы теории систем и комплексов радиоэлектронной борьбы»

Томск, 2019

## 1. Принципы построения фазовых пеленгаторов

Простейший фазовый пеленгатор содержит две одинаковые антенны, разнесенные в пространстве на известное расстояние, называемое обычно базой, а также устройства для усиления принятых сигналов и измерения разности фаз между ними. Структурная схема пеленгатора изображена на рис. 1.

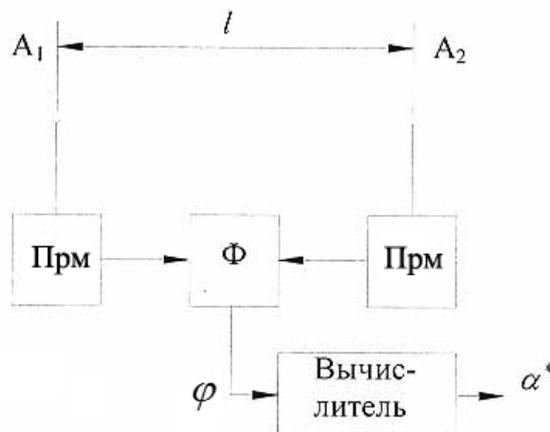


Рис.1.1 Структурная схема простейшего фазового пеленгатора

На схеме обозначено:

Прм – приемные устройства с ограничителями амплитуд принимаемых сигналов,

Ф – фазометр.

Амплитудные диаграммы направленности антенн не имеют принципиального значения.

Приемные устройства фазовых пеленгаторов имеют ряд особенностей, следующих из того, что вносимые ими фазовые сдвиги должны быть одинаковыми при изменении частоты входных сигналов в рабочем диапазоне, амплитуды, в пределах, определяемых изменением расстояния до источника излучения и вариацией его мощности, а также при изменении климатических факторов и механических воздействиях. В ряде случаев применяются специальные схемы для переноса измеряемой разности фаз на строго фиксированную частоту с целью уменьшения инструментальных ошибок фазометров. Фазометры в настоящее время выполняются преимущественно цифровыми.

Предположим, что расстояние от пеленгатора до источника сигнала намного больше базы  $l$ . Тогда падающую на антенную систему волну можно считать плоской.

Задержка сигнала, поступающего на антенну  $A_1$ , относительно сигнала, поступающего на антенну  $A_2$  (см. рис. 2) выражается формулой

$$\tau_3 = \frac{l \cos \alpha_x}{c}, \quad (1.1)$$

где  $\tau_3$  – задержка сигнала,  $c$  – скорость распространения радиоволн,  $\alpha_x$  – угол прихода волны, отсчитанный относительно оси X, на которой расположены фазовые центры антенн  $A_1, A_2$ .

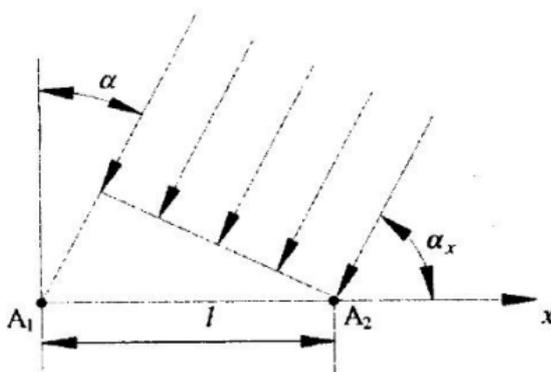


Рис.1.2 Геометрические соотношения на плоскости

Фазовый сдвиг сигналов, соответствующий задержке  $\tau_3$ , определяется формулой

$$\Phi = 2\pi \cdot \frac{l}{\lambda} \cdot \cos \alpha_x, \quad (1.2)$$

где  $\Phi$  – фазовый сдвиг в радианах,  $\lambda$  – длина волны.

Часто удобно угол прихода волны отсчитывать не от координатной оси X, а от нормали к ней. На рис.1.2 он обозначен буквой  $\alpha$ . Из (1.2) следует, что

$$\alpha = \arcsin \frac{\Phi \cdot \lambda}{2\pi \cdot l}. \quad (1.3)$$

Формула (1.3) является основой для определения угла  $\alpha$  по результатам измерения разности фаз сигналов  $\Phi$ .

Как всякая измерительная система фазовый пеленгатор характеризуется точностью и разрешающей способностью. Поскольку термин «разрешающая способность» в различных работах истолковывается по-разному, дадим ему определение для данной работы.

Под разрешающей способностью будем понимать минимальный угол между источниками сигналов, при котором каждый из них может быть запеленгован. Такой подход называется разрешением-измерением. Очевидно, простейший фазовый пеленгатор со схемой рис. 1.1 вовсе не обладает угловой разрешающей способностью.

Действительно, при наличии в диаграммах направленности антенн  $A_1$ ,  $A_2$  двух и более одновременно излучающих источников сигналов, на выходах антенн будем иметь результат их интерференции. Фазометр измеряет разность фаз между результирующими сигналами, зависящую от углов прихода и амплитуд интерферирующих волн. В результате единичного измерения пеленга  $\alpha$ , рассчитанный по формуле (1.3), не будет соответствовать угловому положению ни одной из целей.

Источниками погрешностей определения пеленга  $\alpha$  являются следующие факторы.

1) Неидеальность среды распространения радиоволн: рефракция радиоволн в атмосфере, которая может иметь регулярный или случайный характер; отражения радиоволн от подстилающей поверхности и местных предметов, приводящие к искривлению их фазовых фронтов; дифракция радиоволн на неровностях земной поверхности, кромках лесных массивов и т.п.

2) Неидентичность приемно-усилительных трактов от антенн до фазометров и наличие вследствие этого неучтенных фазовых сдвигов.

3) Влияние внутренних шумов аппаратуры и организованных внешних помех.

4) Неидеальность фазоизмерительной аппаратуры, в частности наличие шумов квантования при ее цифровой реализации.

Можно считать, что совокупность перечисленных факторов приводит к случайной погрешности измерения разности фаз  $\Phi$ . Предположим, что среднеквадратичное значение этой погрешности  $\sigma_\varphi$ . Из формулы (1.3) получим выражение для среднеквадратичной погрешности пеленгования

$$\sigma_{\alpha^*} = \frac{\sigma_\varphi}{2\pi \cdot \frac{l}{\lambda} \cos \alpha}. \quad (1.4)$$

Из формулы (1.4) видно, что угловая погрешность при фиксированной фазовой ошибке  $\sigma_\varphi$  обратно пропорциональна  $\cos \alpha$ . Эта зависимость характерна для всех пеленгаторов, основанных на использовании неподвижных антенных решеток. Поэтому такие пеленгаторы обычно работают в секторе, не превышающем  $\pm 60^\circ$  относительно нормали к антенной системе.

В дальнейшем будет удобно рассматривать не погрешность измерения угла  $\alpha$ , а погрешность измерения  $v = \sin \alpha = \cos \alpha_x$  – направляющего косинуса приходящей волны по отношению к координатной оси X.

Из (1.2) имеем

$$\sigma_{\nu^*} = \frac{\sigma_{\varphi}}{2\pi \cdot \frac{l}{\lambda}}, \quad (1.5)$$

где  $\sigma_{\nu^*}$  – среднеквадратичная ошибка оценки измерения направляющего косинуса.

Можно считать также, что  $\sigma_{\nu^*}$  – среднеквадратичная ошибка пеленгования объекта, находящегося вблизи нормали к антенной системе пеленгатора, выраженная в радианах.

Формула (1.4) выявляет одно из важнейших достоинств фазового пеленгатора: при фиксированной фазовой погрешности  $\sigma_{\varphi}$  угловая погрешность  $\sigma_{\alpha^*}$  может быть сделана сколь угодно малой, если отношение  $l/\lambda$  достаточно велико.

Препятствием к увеличению антенной базы  $l$  в двухканальных пеленгаторах является неоднозначность фазовых измерений. Действительно, разность фаз  $\varphi$  двух гармонических колебаний с частотой  $f_0$  определена лишь на периоде  $T = l/f_0$ , а разность времени прихода сигналов на различные антенны  $\tau_3$  в формуле (1.1) может значительно превосходить период, если  $l > \lambda/2$ . Поэтому, разность фаз сигналов  $\Phi$  (1.2) на антеннах должна быть представлена в виде

$$\Phi = \varphi + 2\pi k, \quad (1.6)$$

где  $\varphi$  – разность фаз, измеренная фазометром,

$k$  – полное число периодов разности фаз, утраченное при измерениях в силу периодичности сигналов.

Ликвидация неоднозначности измерений заключается в восстановлении  $k$  тем или иным способом.

Измеряемая разность фаз  $\varphi$  в зависимости от назначения пеленгатора и типа измерителя может находиться в интервалах  $0 \leq \varphi < 2\pi$ ,  $-\pi \leq \varphi < \pi$  или иных пределах. Изменению  $\varphi$  в заданных пределах при фиксированном  $k$  соответствует некоторый угловой сектор – сектор однозначности. Границы секторов однозначности для фиксированных  $k$  определяются формулой (1.3) при подстановке в нее  $\Phi = \varphi + 2\pi k$  и изменении  $\varphi$  в пределах показаний фазометра. На рис. 1.3 показаны секторы однозначности для пеленгатора с базой  $l = 2\lambda$  при измерении разности фаз в пределах от  $-\pi$  до  $\pi$  в секторе углов  $-\pi/2 < \alpha < \pi/2$ .

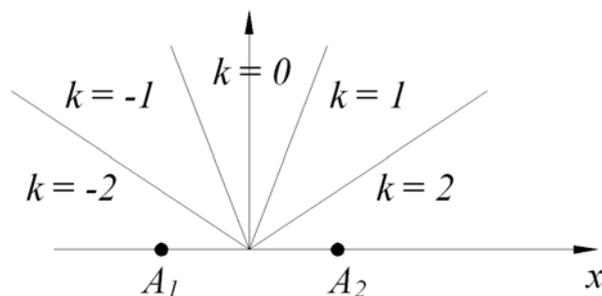


Рис 1.3 Секторы однозначного пеленгования для пеленгатора с базой  $l = 2\lambda$

Из формулы (1.3) следует, что величина углового сектора однозначности зависит от соответствующего ему целого числа  $k$ . Рис.1.3 иллюстрирует наличие указанной зависимости на примере. В теоретических выкладках наличие этой зависимости является неудобным, поэтому рассматривают интервалы однозначности направляющего косинуса  $v = \sin \alpha = \cos \alpha_x$ .

Из (1.2), (1.6) имеем

$$\Delta v_{\text{одн}} = \frac{\lambda}{l}, \quad (1.7)$$

где  $\Delta v_{\text{одн}}$  – интервал однозначного измерения направляющего косинуса.

Очевидно, при больших  $l/\lambda$  интервал однозначного измерения направляющего косинуса  $\Delta v_{\text{одн}}$  равен угловому сектору однозначности при  $k = 0$ , выраженному в радианах. Ликвидацию неоднозначности можно рассматривать как выбор сектора однозначности, в котором находится источник сигнала.

В следящих фазовых пеленгаторах, осуществляющих угловое сопровождение объекта наблюдения, устранение неоднозначности производится за счет использования направленных свойств антенн: сектору однозначности  $k = 0$  соответствует нахождение цели в главном лепестке диаграммы направленности [1]. Для согласования ширины главного лепестка диаграммы, равного приблизительно  $\lambda/L$ , где  $L$  – размер антенны в плоскости пеленгования, с сектором однозначности размер антенны  $L$  выбирается равным базе  $l$ .

В обзорных фазовых пеленгаторах устранение неоднозначности производится с помощью применения дополнительных более грубых измерителей с меньшими базами. Известный подход к построению пеленгатора, получивший название «метода уточнений», основан на включении в его состав грубого измерителя с базой  $l_1$ , обеспечивающего однозначный, но недостаточно точный пеленг в заданном секторе углов, а также одного или более измерителей с базами  $l_i$  ( $i = 2, 3, \dots, n, l_{i+1} > l_i$ ), обеспечивающих последовательное уточнение пеленга при сужении сектора

однозначности. При этом, устранение неоднозначности на  $i$ -ой базе производится на основании измерений на  $(i-1)$ -ой [1].

Рассмотрим алгоритм последовательного раскрытия неоднозначности.

Предположим, что ошибки фазовых измерений отсутствуют. На базе  $l_1$  производится однозначный отсчет,

$$\varphi_1 = 2\pi \cdot \frac{l_1}{\lambda} \cdot \sin \alpha.$$

Полная разность фаз  $\Phi_2$  на неоднозначной базе  $l_2$ ,

$$\Phi_2 = \varphi_2 + 2\pi \cdot \frac{l_2}{\lambda} \cdot \sin \alpha.$$

Здесь  $|\varphi_2| \leq \pi$ ,  $k_2$  – число полных периодов разности фаз  $\Phi_2$ , утраченных при измерениях.

Приравнивая  $\varphi_1$  и  $\Phi_2$ , находим  $k_2$

$$k_2 = \frac{1}{2\pi} \cdot \left( \varphi_1 \cdot \frac{l_2}{l_1} - \varphi_2 \right).$$

Так как реально разности фаз  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  измеряются с ошибками, правая часть этого соотношения не является целым числом. Поэтому  $k_2$  определяют, округляя ее до ближайшего целого. Определив  $k_2$ , можно затем таким же путем найти  $k_3$  и т.д.

$$k_i = \left[ \frac{1}{2\pi} \cdot \left( \varphi_{i-1} \cdot \frac{l_i}{l_{i-1}} - \varphi_i \right) \right], \quad (1.8)$$

где  $[\cdot]$  – операция округления до ближайшего целого.

На рис. 1.4 приведена схема устройства, реализующего алгоритм (1.8), для двухбазового пеленгатора. Схема может быть выполнена как на дискретных, так и на аналоговых элементах.

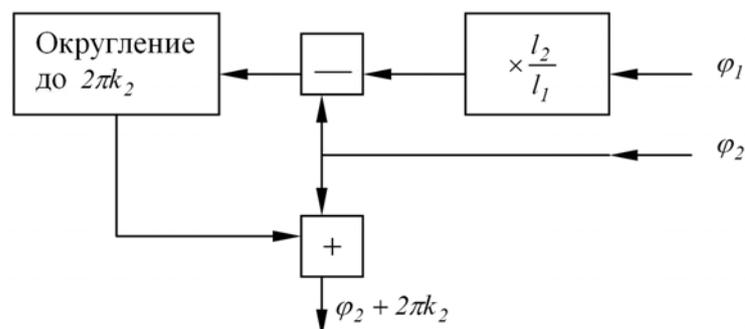


Рис. 1.4 Устройство последовательного устранения неоднозначности

На рис. 1.5 изображена упрощенная структурная схема фазового пеленгатора, работающего по «методу уточнений».

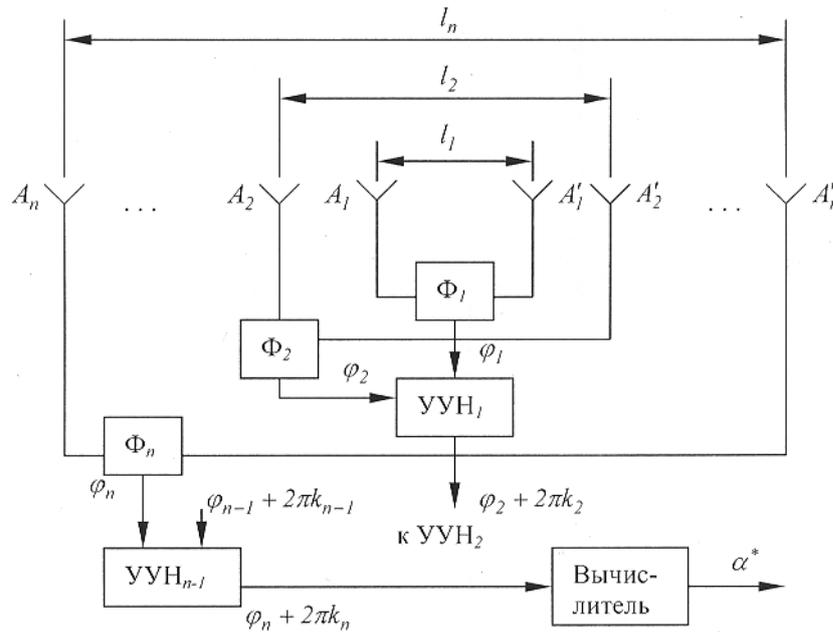


Рис.1.5 Укрупненная структурная схема пеленгатора, работающего по «методу уточнений»

На схеме  $\Phi_i$  – фазометры, УУН – устройства устранения неоднозначности. Приемные устройства не показаны. Вычислитель выдает оценку пеленга  $\alpha^*$  в соответствии с формулой (1.3), где  $\Phi = \Phi_n$  – полная разность фаз на самой большой базе пеленгатора  $l_n$ . Совокупность антенн пеленгатора образует линейную антенную решетку.

Качество устранения неоднозначности характеризуется вероятностью того, что она устранена правильно, то есть вычисленное значение  $k$  соответствует минимальной погрешности пеленгования (в переводной литературе «вероятность успеха»). Из (1.8) следует, что при переходе от базы  $l_{i-1}$  к  $l_i$  условие правильного определения  $k$  заключается в том, чтобы стоящее в квадратных скобках выражение отличалось от истинного целочисленного значения не более чем на 0,5.

Представим измеренные разности фаз в виде

$$\varphi_i = \varphi_{0i} + \delta_i, \quad (1.9)$$

где  $\varphi_{0i}$  – разность фаз, точно соответствующая углу прихода волны,

$\delta_i$  – ошибка измерений.

Тогда на основании (1.8) условие правильного устранения неоднозначности при переходе от базы  $l_{i-1}$  к  $l_i$  запишется в виде

$$|\eta_i| \leq \pi, \quad (1.10)$$

где

$$\eta_i = \left( \delta_i - 1 \frac{l_i}{l_{i-1}} - \delta_i \right). \quad (1.11)$$

Для выяснения физического смысла соотношения (1.10) запишем его в виде

$$\left( \frac{\delta_{i-1} \cdot \lambda}{2\pi \cdot l_{i-1}} - \frac{\delta_i \cdot \lambda}{2\pi \cdot l_i} \right) < \frac{\lambda}{2 \cdot l_i}. \quad (1.12)$$

Поскольку  $\delta_i \lambda / 2\pi l_i$  – погрешность измерения направляющего косинуса  $\nu$  на  $i$ -ой базе, а  $\lambda / l_i$  – сектор однозначности на той же базе, условие правильного устранения неоднозначности заключается в том, что разность погрешностей измерений на «грубой» базе  $l_{i-1}$  и «точной» базе  $l_i$  не превосходит половины сектора однозначности по «точной» базе. Если же  $l_i / l_{i-1} \gg 1$ , угловая погрешность на «точной» базе в левой части (1.12) не существенна по сравнению с погрешностью пеленгования на грубой. И условие правильного устранения неоднозначности сводится к тому, что погрешность измерения на «грубой» базе не превышает половины сектора однозначности на «точной».

Предположим, что погрешности фазовых измерений  $\delta_i$  – случайные величины, распределенные по нормальному закону с нулевыми средними значениями. Тогда  $\eta_i$  – также случайные величины, распределенные по нормальному закону с нулевыми средними значениями. Вероятность правильного устранения неоднозначности при переходе от  $(i-1)$ -ой базы к  $i$ -ой можно вычислить по формуле

$$P_0 = \Phi \left( \frac{\pi}{\sqrt{2} \sigma_{\eta_i}} \right), \quad (1.13)$$

где

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \text{ – интеграл вероятности,}$$

$\sigma_{\eta_i}$  – среднеквадратическое значение случайной величины  $\eta_i$  (1.11).

Правильным разрешением (устранением) неоднозначности мы называем ситуацию, когда найденное по формуле (1.8) значение  $k$  не приводит к аномально большим ошибкам пеленгования.

Условие правильного устранения неоднозначности в  $n$ -базовом пеленгаторе описывается совокупностью  $(n-1)$  неравенств вида (1.10), где  $i = 2, 3, \dots, n$ .

В соответствии с этим условием вероятность правильного устранения неоднозначности можно вычислить по формуле

$$P_0 = \int_{-\pi}^{\pi} \dots \int_{-\pi}^{\pi} W_{n-1}(y_2, \dots, y_n) \cdot dy_2 \dots dy_n, \quad (1.14)$$

где  $W_{n-1}(y_2, \dots, y_n)$  – плотность распределения вероятностей случайных величин  $\eta_i$  (1.11).

Случайные величины  $\eta_i, \eta_{i\pm 1}$  коррелированы между собой даже в том случае, если фазовые погрешности  $\delta_i$  независимы. Поэтому в общем случае вероятность  $P_0$  (1.14) не равна произведению вероятностей правильного устранения неоднозначности при переходе от  $i$ -ой базы к  $(i+1)$ ,  $i=1, 2, \dots, (n-1)$ . Действительно, пусть  $\delta_i$  – независимые случайные величины с нулевыми средними и равными дисперсиями  $\sigma_\phi^2$ . Тогда дисперсии случайных величин  $\eta_i$  равны

$$\sigma_{\eta_i}^2 = \frac{\sigma_\phi^2}{(2\pi)^2} \cdot \left( 1 + \left( \frac{l_i}{l_{i-1}} \right)^2 \right), \quad (1.15)$$

а коэффициенты корреляции между ними

$$r_{i,(i+1)} = - \left( \sqrt{\left( \left( 1 + \left( \frac{l_i}{l_{i-1}} \right)^2 \right) \cdot \left( 1 + \left( \frac{l_i}{l_{i+1}} \right)^2 \right) \right)} \right)^{-1}. \quad (1.16)$$

Отсюда следует, что корреляция действительно имеет место, однако при большом отношении баз  $l_i/l_{i-1}$  она становится несущественной.

В данной расчетной работе мы не будем учитывать тонкости, связанные с корреляцией случайных величин  $\eta_i$ , так что будем рассчитывать вероятность правильного разрешения в  $n$ -базовом пеленгаторе по формуле

$$P_0 = P_{01} \dots P_{0i} \dots P_{0n}, \quad (1.17)$$

где  $P_{0i}$  – вероятность правильного устранения неоднозначности при переходе от  $i$ -ой базы к  $(i+1)$ -ой.

Особенностью пеленгатора, построенного по схеме рис. 1.5, является то, что точность пеленгования определяется самой большой базой, а все остальные служат только для определения сектора однозначности, в котором лежит истинный пеленг. Часть информации о пеленге, заложенная в измерениях, выполненных на этих базах, при этом теряется. Это относится ко всем схемам последовательной обработки сигналов в многобазовых пеленгаторах, в частности, основанных на известных

алгоритмах, отличающихся от рассмотренного. Последовательное устранение неоднозначности не претендует на статистическую оптимальность.

Другой подход к построению многобазовых фазовых пеленгаторов основан на статистической оптимизации алгоритма отыскания направляющего косинуса  $\nu$  по совокупности всех измеренных разностей фаз  $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ , включая и устранение неоднозначности [2]. В данной работе он не рассматривается.

Далее будем считать, что погрешности фазовых измерений вызываются двумя факторами: внутренними шумами приемника и пространственными искажениями фазового фронта радиоволн, излучаемых объектом пеленгования, на трассе распространения. Будем считать также, что фазовые погрешности  $\delta_i$  могут быть представлены суммой соответствующих составляющих

$$\delta_i = \delta_{i_{\text{ш}}} + \delta_{i_{\text{ррв}}}, \quad (1.18)$$

где  $\delta_{i_{\text{ш}}}$  – составляющая фазовой погрешности, обусловленная шумами приемных устройств,

$\delta_{i_{\text{ррв}}}$  – составляющая фазовой погрешности, обусловленная флуктуациями фазового фронта радиоволн.

Случайные величины  $\delta_{i_{\text{ш}}}$  и  $\delta_{i_{\text{ррв}}}$  независимы, так как они имеют различное происхождение. Шумы в приемных каналах также будем считать взаимно независимыми и имеющими равные мощности  $P_{\text{ш}}$ . Тогда дисперсия шумовой составляющей фазовой погрешности может быть вычислена по формуле

$$\sigma_{\varphi_{\text{ш}}}^2 = \frac{P_{\text{ш}}}{P_c}, \quad (1.19)$$

где  $P_c$  – мощность сигнала в каждом из каналов пеленгатора.

Для выяснения роли составляющей фазовой погрешности, связанной с распространением радиоволн, предположим что флуктуации фазы сигнала  $\psi(x)$  вдоль оси  $x$ , на которой расположены фазовые центры антенн пеленгатора, представляют собой стационарный по пространству случайный процесс. Такой процесс полностью характеризуется пространственной корреляционной функцией

$$R_{\psi}(\Delta x) = m_1 \{ \psi(x) \psi(x + \Delta x) \} = \sigma_{\psi}^2 r_{\psi}(\Delta x), \quad (1.20)$$

где  $\sigma_{\psi}^2$  – дисперсия флуктуаций фазы в каждой точке оси  $x$ ,

$R_{\psi}(\Delta x)$  – корреляционная функция фазы,

$r_\psi(\Delta x)$  – нормированная корреляционная функция фазы (коэффициент корреляции),

знак  $m_1 \{ \bullet \}$  означает статистическое усреднение.

Флуктуации разности фаз сигналов в точках, разнесенных на базу  $l$ , найдем как

$$\delta_{i\text{ppв}}(l) = \psi(x) - \psi(x+l),$$

а их дисперсию

$$\sigma_\varphi^2(l) = m_1 \left\{ [\psi(x) - \psi(x+l)]^2 \right\} = 2\sigma_\psi^2 (1 - r_\psi(l)). \quad (1.21)$$

Дисперсия разности фаз на базе  $l$  при учете как внутренних шумов, так и пространственных флуктуаций радиоволн равна

$$\sigma_\varphi^2(l) = \sigma_{\varphi\text{ppв}}^2(l) + \sigma_{\varphi\text{ш}}^2 = 2\sigma_\psi^2 (1 - r_\psi(l)) + \frac{P_{\text{ш}}}{P_{\text{с}}}. \quad (1.22)$$

Дисперсия случайной величины  $\eta_i$ , определяющей вероятность правильного разрешения неоднозначности при переходе от базы  $(l-1)$  к  $l_i$  находится как

$$\sigma_{\eta_i}^2 = m_1 \left\{ \left[ \left( \delta_{(i-1)\text{ш}} + \delta_{(i-1)\text{ppв}} \right) \frac{l_i}{l_{i-1}} - \left( \delta_{i\text{ш}} + \delta_{i\text{ppв}} \right) \right]^2 \right\}. \quad (1.23)$$

Возводя квадратную скобку в квадрат, и почленно усредняя, получим, положив  $i = 2$ , что соответствует переходу от первой базы ко второй,

$$\begin{aligned} \sigma_{\eta_i}^2 = & \frac{P_{\text{ш}}}{P_{\text{с}}} \left[ \left( \frac{l_2}{l_1} \right)^2 + 1 \right] + \\ & + 2\sigma_\psi^2 \left\{ \left( \frac{l_2}{l_1} \right)^2 (1 - r_\psi(l_1)) + (1 - r_\psi(l_2)) - 2 \left[ \frac{l_2}{l_1} \left( r_\psi \left( \frac{l_2 - l_1}{2} \right) - r_\psi \left( \frac{l_2 + l_1}{2} \right) \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (1.24)$$

## 2. ЗАДАНИЕ НА РАБОТУ

Студентам предлагается рассчитать (спроектировать) антенную систему фазового радиопеленгатора по заданным техническим требованиям. Считать, что источниками фазовых погрешностей являются внутренние шумы приемных устройств и пространственные флуктуации фазового фронта радиоволн, возникшие на трассе распространения. Пространственная корреляционная функция фазы имеет вид

$$R_\psi(\Delta x) = \sigma_\psi^2 e^{-\left(\frac{\Delta x}{l_0}\right)},$$

где  $\sigma_\psi^2$  – дисперсия флуктуаций фазы,

$l_0$  – интервал пространственной корреляции флуктуаций фазы по уровню 0,37.

Дисперсия флуктуаций фазы и интервал пространственной корреляции флуктуаций фазы задаются для каждого расчетного задания индивидуально.

#### Технические требования к пеленгатору

Сектор однозначного пеленгования  $\Delta\alpha_{\text{одн}}$  – не менее .....

Вероятность правильного разрешения неоднозначности измерений .....  
– не менее.....

Среднеквадратическая погрешность пеленгования при условии правильного разрешения неоднозначности ..... не более .....

Отношение сигнал-шум по мощности в приемных каналах пеленгатора ..... не менее.....

Диапазон рабочих частот .....  $f_{\text{min}} - f_{\text{max}}$ .

### 3. Рекомендации по выполнению задания

1. Начать расчет рекомендуется с нахождения самой большой базы пеленгатора. Она находится, исходя из заданной точности пеленгования. Расчет выполняется с использованием формулы (1.4), в которой надо положить  $\alpha = 0,5\Delta\alpha_{\text{одн}}$ . Входящая в формулу среднеквадратическая фазовая погрешность  $\sigma_\varphi$  зависит от отношения сигнал-шум и пространственных флуктуаций фазового фронта радиоволн и рассчитывается по формуле (1.22). Поскольку она зависит от базы  $l$  нелинейно, аналитического решения для  $l_{\text{max}}$  не существует. Задачу можно решить, построив график зависимости  $\sigma_\alpha = f(l)$ . Используя его, по заданному  $\sigma_\alpha$  найти  $l_{\text{max}}$ . Как видно из формулы (1.4), погрешность пеленгования тем больше, чем больше длина волны. Поэтому расчет надо выполнять для низшей частоты заданного диапазона  $f_{\text{min}}$ .

2. Далее следует найти минимальную базу пеленгатора  $l_{\text{min}}$ . Она находится из условия обеспечения заданного сектора однозначного пеленгования. Расчет ведется по формуле (1.7), в которой надо положить  $\Delta\nu_{\text{одн}} = 2 \sin 0,5\Delta\alpha_{\text{одн}}$ . Поскольку сектор однозначности тем меньше, чем меньше длина волны, расчет надо выполнять для самой высокой частоты заданного диапазона  $f_{\text{max}}$ .

3. Далее следует проверить, выполняется ли требование по вероятности правильного разрешения неоднозначности  $P_0$  при полученных  $l_{\text{max}}$ ,  $l_{\text{min}}$ . Расчет  $P_0$

вести по формуле (1.13). Для вычисления входящей в нее величины  $\sigma_\eta$  воспользоваться формулой (1.24), положив в ней  $l_1 = l_{\min}, l_2 = l_{\max}$ . Если получится, что рассчитанная величина  $P_0$  не меньше, чем заданная, расчет на этом заканчивается. Если это условие не выполняется, расчет (проектирование антенной системы) следует продолжить. Для выполнения требований по  $P_0$  следует применить промежуточные базы (между самой большой и самой малой) как показано на рис. 1.5. Расчет результирующей вероятности  $P_0$  вести по формуле (1.17). Расчет  $P_{0i}$  при переходе от одной промежуточной базы к другой вести по тем же формулам, что и сделанный ранее для  $l_{\max}, l_{\min}$ , подставляя в них новые значения баз. К сожалению, аналитический метод расчета количества и оптимальных значений промежуточных баз автору данной работы не известен. Приходится находить их подбором.

В заключение авторы расчетных заданий должны начертить структурную схему пеленгатора рис. 1.5, указав в ней полученные расстояния между антеннами.

#### Литература

1. Денисов В.П. Радиотехнические системы: учебное пособие/ В.П. Денисов, Б.П. Дудко. Томск: ТУСУР, 2006. – 253 с.
2. Денисов В.П. Фазовые радиопеленгаторы: Монография: Томск, ТУСУР, 2002. – 251 с.