Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное агентство по образованию Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова Кафедра радиофизики

В.А. Тимофеев

Амплитудные и фазовые методы определения углового положения источника электромагнитных волн

Методические указания по выполнению лабораторной работы

Рекомендовано Научно-методическим советом университета для студентов специальности Радиофизика и электроника и направления подготовки Телекоммуникации

Ярославль 2006

Рекомендовано

Редакционно-издательским советом университета в качестве учебного издания. План 2006 года

Рецензент кафедра радиофизики ЯрГУ

Тимофеев, В.А. Амплитудные и фазовые методы определения углового положения источника электромагнитных Т 41 волн : метод. указания по выполнению лабораторной работы / В.А. Тимофеев; Яросл. гос. ун-т. – Ярославль : ЯрГУ, 2006. – 56 с.

Методические указания посвящены основным физическим принципам определения углового местоположения источников электромагнитного излучения. Приводятся общие положения амплитудных и фазовых методов радиопеленгации. Рассмотрены их основные параметры и характеристики. Кратко представлены структурные схемы обработки сигналов в зависимости от выбранного метода анализа.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальности 013800 Радиофизика и электроника и направлению подготовки 550400 Телекоммуникации (курс "Физика волновых процессов" и "Электромагнитные поля и волны", блоки ОПД, ДС), очной и заочной форм обучения в качестве руководства при выполнении лабораторной работы.

> УДК 530.145.6 ББК 3 840я73

© Ярославский государственный университет, 2006 © В.А. Тимофеев, 2006

Введение

Задача определения углового положения источника радиоизлучения (*радиопеленгация*) имеет большое практическое значение, поскольку она является достаточно типичной для многих практических приложений. В радиолокации, включая пассивную радиотеплолокацию, – это определение направления на объект в обзорных системах, слежение и сопровождение объекта (так называемые радиосекстанты); в системах связи – определение местоположения и опознавание мешающего передатчика, нахождение источника вредных приему помех, таких как электрическое оборудование, поврежденные изоляторы на линиях электропередачи и т.д., определение местоположения несанкционированного передатчика; в навигации – определение собственного местоположения относительно известных радиомаяков, нахождение местоположения передатчика в случае бедствия, спутниковая радионавигация и ряд других.

Радиопеленгатор – это чувствительный элемент, определяющий направление прихода или азимут электромагнитной волны относительно опорного направления. Для определения пеленга на источник радиосигнала (углового местоположения излучающего объекта) все радиопеленгаторы используют разность задержки сигнала на апертуре антенной системы. Некоторые системы, такие как фазовые интерферометры, измеряют разность задержки непосредственно, в то время как другие, например вращающиеся рамочные антенные системы или расположенные по кругу антенные решетки (системы Вулленвебера, антенные решетки Эдкока), измеряют функцию задержки, которая отражается в амплитудной диаграмме направленности. Общая для всех пеленгаторов функциональная архитектура включает антенную систему, приемный блок и устройство обработки (угловой дискриминатор).

Современные радиопеленгаторы можно ориентировочно разбить на четыре категории [1 – 3]: амплитудные радиопеленгаторы, фазовые радиопеленгаторы, радиопеленгаторы с вектором, коррелированным по фазе и амплитуде, и радиопеленгаторы со сверхразрешением. Метод получения информации может быть параллельным или последовательным. Если метод параллельный, то измерения производятся почти мгновенно, и вводится столько приемных каналов, сколько сигналов поступает от антенн. При последовательном методе результат получается только после завершения последовательности необходимых радиочастотных переключений либо на антеннах, либо после фазового и/или амплитудного взвешивания антенных сигналов.

Выбор системы радиопеленгования всегда сложен, поскольку он представляет собой компромисс между характеристиками и конкретной эксплуатационной ситуацией. Существует ряд характерных особенностей, которыми пеленгатор должен обладать независимо от используемого принципа определения углового местоположения источника. Эксплуатационные и конструктивные особенности оборудования (метод отображения, эксплуатационная концепция, возможность дистанционного управления, температурные пределы, механическая прочность, форма, вес, потребляемая мощность и т.д.) должны отвечать требованиям конкретной области применения. Основные эксплуатационные и конструктивные особенности пеленгатора: точность, чувствительность, невосприимчивость к искажениям фронта волны, нечувствительность к деполяризации, влиянию помех в совмещенном канале и быстрая реакция.

Несмотря на существенное различие конкретных решаемых задач и практических схем реализаций радиопеленгаторов, всех их объединяет одно – общность радиофизических методов определения углового положения источника радиоизлучения.

Основы радиопеленгации

Измерение угловых координат источников радиоизлучения может производиться путем измерения амплитуды или фазы приходящих сигналов. Поэтому соответствующие методы радиопеленгации носят название амплитудных и фазовых методов. При частотной модуляции сигнала возможно использование и частотного метода определения направления, который иногда применяется совместно с амплитудным для повышения точности и разрешающей способности радиопеленгации по угловым координатам.

При перемещении антенны по угловой координате относительно направления на источник (рис. 1) амплитуда сигнала на линейном выходе антенны будет пропорциональна амплитудной диаграмме направленности. Направление на источник соответствует положению максимума диаграммы в момент приема максимального сигнала. Для импульсных систем, например, сигнал на выходе будет определяться огибающей последовательности или пачки импульсов, центр тяжести которой и соответствует измеряемому направлению. Точность измерений координат этим способом, называемым методом максимума, однако, невелика.



Рис. 1. Схема сканирования лучом

Для повышения точности измерений в системах с амплитудной пеленгацией для определения угловой координаты в одной плоскости формируются две перекрещивающиеся диаграммы направленности антенны, разнесенные на углы $\pm \theta_0$ от равносигнального направления (рис. 2a). При отклонении источника излучения (цели) на угол θ от равносигнального направления (объект находится в точке A) сигнал, принятый по нижней диаграмме, больше сигнала, принятого по верхней диаграмме. Разность амплитуд принятых сигналов определяет угол отклонения источника излучения сигналов определяет угол отклонения источника излучения от равносигнального направления. Знак этой разности характеризует направление смещения равносигнального направления относительно объекта. Когда равносигнальное направление совмещается с целью, амплитуды сигналов, принятых по обеим диаграммам, равны, а их разность обращается в нуль.



Рис. 2. Виды парциальных диаграмм направленности и сравнение сигналов в системах с амплитудной (*a*), фазовой (*б*) и комплексной (*в*) пеленгацией

В системах с фазовой пеленгацией направление на источник в одной координатной плоскости определяется сравнением фаз сигналов, принимаемых двумя антеннами. В дальней зоне исходящие от источника сигналы практически одинаковы по амплитуде, но различаются по фазе. На рис. 2б показано, как происходит сравнение по фазе в системе, имеющей две антенны, отстоящие одна от другой на расстоянии *l*.

Линия визирования источника образует угол θ с осью, перпендикулярной к линии, соединяющей обе антенны, т.е. с равносигнальным направлением. Расстояние между первой антенной и целью составляет

$$R_1 = R + (l/2)Sin\theta, \qquad (1)$$

а расстояние между второй антенной и целью

$$R_2 = R - (l/2)Sin\theta.$$
⁽²⁾

Разность расстояний от цели до антенн

$$\Delta R = R_1 - R_2 = lSin\theta \tag{3}$$

даст разность фаз

$$\Delta \phi = 2\pi \Delta R / \lambda = 2\pi l Sin \theta / \lambda, \qquad (4)$$

где λ — длина волны.

Это позволяет определить угол прихода θ по измеренной величине фазовых сдвигов сигнала, принимаемых на две разнесенные антенны.

Выражение (3) показывает, что фазовый сдвиг сигналов обращается в ноль не только при $\theta = 0$, но также и при других углах рассогласования, соответствующих условию

$$\theta = Arc\sin(2\pi n/kl), \tag{5}$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

В результате так называемая пеленгационная характеристика получается знакопеременной и имеет наряду с основным направлением много ложных равносигнальных направлений. В этом причина неоднозначности измерений фазовым методом. Однако неоднозначность не является серьезным недостатком, если ложные равносигнальные направления находятся за пределами главного лепестка диаграммы направленности, а для этого расстояние между центрами приемных антенн должно быть не больше диаметра каждой из них. Такая система может быть выполнена, например, в виде двух расположенных рядом антенн.

В системах, использующих амплитудно-фазовый (комплексный) метод пеленгования, угловые координаты определяют сравнением амплитуд и фаз сигналов, принимаемых двумя антеннами (рис. 2в).

В качестве источника угловой информации в рассмотренных системах соответственно используются амплитудные, фазовые и амплитудно-фазовые соотношения сигналов, принимаемых независимыми каналами. Различия в способах извлечения угловой информации, в свою очередь, порождают определенные различия в обработке принимаемых сигналов и, следовательно, в структуре пеленгационных систем в целом.

Характеристики антенных систем

Поскольку одной из основных компонент любого метода радиопеленгации является антенная система, поэтому прежде чем рассматривать эти методы, целесообразно ввести несколько характеристик, которые описывают свойства антенн.

Поскольку точечный источник (ненаправленная антенна) излучает сферическую волну, напряженность электрического поля в

произвольной точке пространства (вакуум) на расстоянии R в момент времени t может быть представлена в комплексной форме как

$$\dot{E}(R) = E_m \frac{\exp(i(\omega t - kR))}{R}, \qquad (6)$$

где E_m – амплитуда, ω – циклическая частота.

Реальные антенны излучают энергию в пространстве неравномерно. Обычно излучение концентрируется в определенном направлении. Степень концентрации мощности, излучаемой антенной, называют коэффициентом направленного действия D. Обычно он определяется в направлении максимума. Напряженность поля, создаваемая антенной в других направлениях, характеризуется *диаграммой направленности*. В общем случае диаграмма направленности антенны является комплексной величиной $\dot{f}(\theta, \varphi)$, и поэтому выражение для мгновенного значения напряженности электрического поля имеет вид:

$$\dot{E}(R) = E_m \dot{f}(\theta, \varphi) \frac{\exp(i(\omega t - kR))}{R}.$$
(7)

Различают *амплитудную* $F(\theta, \phi)$ и *фазовую* $\Phi(\theta, \phi)$ диаграммы направленности

$$\dot{f}(\theta,\phi) = F(\theta,\phi) \cdot \exp(i\Phi(\theta,\phi)).$$
 (8)

Очевидно, что амплитудная диаграмма может быть определена как

$$F(\theta,\varphi) = \left| \dot{f}(\theta,\varphi) \right| = E_m(\theta,\varphi) / E_m(0,0) \le 1,$$
(9)

Кроме того, очень часто используют и диаграмму направленности по мощности:

$$G(\theta,\phi) = \dot{f}(\theta,\varphi) \cdot \dot{f}^*(\theta,\varphi) = F^2(\theta,\varphi).$$
(10)

Диаграммы направленности обычно задаются в двух главных сечениях – горизонтальной и вертикальной плоскостях.

$$\dot{f}(\theta,\varphi) = \dot{f}_h(\theta) \cdot \dot{f}_v(\varphi).$$
(11)

Ширина диаграммы – это угол в пределах главного лепестка по определенному уровню. Как правило, это угол по первым нулям

диаграммы, по половинной мощности, по уровням 3 дБ, 10 дБ, 20 дБ или по уровню боковых лепестков.

При приеме излучения важными характеристиками антенных систем являются эффективная поверхность антенны S_e , определяемая отношением максимальной мощности, которая может быть отдана в согласованную нагрузку, к плотности потока мощности в плоской волне, и коэффициент использования площади q_a – отношение эффективной площади к геометрической площади раскрыва S_{nn}

$$q_a = \frac{S_e}{S_{n\pi}}.$$
 (12)

Величина D для апертурных антенн определяется через площадь раскрыва S и q_a как

$$D = \frac{4\pi S_{n\pi}}{\lambda^2} q_a.$$
(13)

Поскольку эффективная поверхность антенны S_e связана с диаграммой направленности антенны и определяется соотношением [2,4]

$$S_e = \lambda^2 G / (4\pi), \qquad (14)$$

мощность на выходе антенны *Р* вычисляется следующим образом:

$$P = S_e \Pi = S_e E^2 / Z_0 = \lambda^2 G E^2 / (480\pi^2), \qquad (15)$$

где Π – плотность потока мощности, Z_0 – волновое сопротивление свободного пространства. Напряжение на выходе антенны, нагруженной на сопротивление Z_{μ} , определяется выражением:

$$u = \sqrt{PZ_{H}} = E \lambda / (2\pi) \cdot \sqrt{G \cdot Z_{H} / 120} .$$
(16)

В другом, более удобном в данном случае виде, напряжение на выходе антенны можно записать как

$$u = \operatorname{Re}(C\dot{E}(t)\dot{f}(\theta, \varphi)), \qquad (17)$$

где С – константа преобразования.

Основные методы радиопеленгации

Рассмотрим кратко методы пеленгования, для упрощения предполагая, что источник сигнала и антенна приемника находятся в одной (например, горизонтальной) плоскости.

Одна из основных характеристик измерителя углового положения источника радиоизлучения является *пеленгационная характеристика*, которая определяется как

$$g(\theta) = u_{Bblx}(\widetilde{\theta} - \theta)/u_{\max}$$
, (18)

где $u_{gblx}(\theta)$ – зависимость сигнала на выходе пеленгатора от углового положения объекта относительно некоторого (опорного) значения $\tilde{\theta}$, u_{max} – его максимальное значение. Еще одна важная характеристика измерителя углового положения источника – *пеленгационная чувствительность*. Под пеленгационной чувствительностью понимается зависимость

$$S(\theta') = \frac{1}{u_{\max}} \left[\frac{\partial u_{Bblx}(\theta)}{\partial \theta} \right]_{\theta = \theta'},$$
 (19)

где θ' – значение угловой координаты в точке определения пеленгационной чувствительности. Ясно, что *S* характеризует крутизну пеленгационной характеристики и связь между ними имеет следующий вид:

$$S(\theta') = \left[\frac{\partial g(\theta)}{\partial \theta}\right]_{\theta=\theta'}.$$
 (20)

Очевидно, что пеленгационная характеристика должна указывать на величину и знак угла прихода принятых сигналов, т.е. должна являться нечетной действительной функцией угла прихода сигналов. Исходные данные об угле прихода образуются при приеме их антенной системой, которую называют также угловым датчиком. В соответствии с этим над принятыми сигналами должны быть произведены такие операции, чтобы можно было получить функцию, вещественная часть которой удовлетворяла бы требованиям, предъявляемым к пеленгационным характеристикам. Рассмотрим характеристики *амплитудных методов* пеленгации. В качестве функции, описывающей диаграмму направленности антенны, возьмем гауссовскую зависимость

$$F(\theta) = \exp\left(-2\ln 2\left(\theta/\theta_{0,5}\right)^2\right),\tag{21}$$

где $\theta_{0,5}$ – ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности. Функция (21) очень часто используется для аппроксимации диаграмм направленности в области главного лепестка [2]. На рис. 3 представлены результаты расчетов по формуле (21) и функции *Sin*(*x*)/*x* (диаграмма направленности плоского раскрыва при равномерном облучении [2] в одной из ортогональных плоскосстей). Погрешность превышает 15% только при $x = \theta/\theta_{0.5} > 0.8$.



Рис. 3. Сравнение диаграмм направленности

Следует отметить, что пеленгационные характеристики оцениваются главным образом в центральной части диаграмм, в данном случае они ограничены сектором углов от равносигнального направления $\theta = \pm (0.8\theta_{0,5} - \theta_0)$. При анализе пеленгационных характеристик в области углов, соответствующих большим отклонениям от равносигнального направления, например, для обзорных радиолокационных станций, систем поиска источников помех, в том числе для окрестности границы зоны захвата следящих систем, указанным приближением пользоваться нельзя. Приближение (21) оказывается полезным и для оценки ряда энергетических характеристик антенн, поскольку дает удовлетворительную формулу для расчета коэффициента направленного действия.

Напряженность поля в точке приема в комплексной форме можно записать как функцию времени *t*:

 $\dot{E}(t) = E_m \exp(i(\omega t - \phi_0)),$

где E_m – амплитуда; ω – круговая частота; ϕ_0 – начальная фаза. Далее будем считать, что источник электромагнитного излучения находится достаточно далеко от пеленгатора (находится в дальней зоне приемной антенной системы).

Предполагая, что диаграмма направленности антенной системы определяется формулой (21), напряжение на выходе приемника можно представить как

$$u(t,\theta) \sim \operatorname{Re}(\dot{E}(t)F(\theta)) = \operatorname{Re}\left(E_m \exp(i(\omega t - \phi_0))\exp\left(-2\ln 2(\theta/\theta_{0,5})^2\right)\right).$$
(22)

Поэтому для случая использования *метода максимума* выражения для пеленгационной характеристики и пеленгационной чувствительности принимают вид:

$$g(\theta) = \exp\left(-2\ln 2(\theta/\theta_{0,5})^2\right),$$

$$S(\theta) = -4\ln 2\frac{\theta}{\theta_{0,5}^2}\exp\left(-2\ln 2(\theta/\theta_{0,5})^2\right).$$
 (23)

Таким образом, вид пеленгационной характеристики определяется диаграммой направленности используемой антенны. Графики зависимости пеленгационной чувствительности от соотношения между угловым положением источника и шириной диаграммы направленности (безразмерный параметр $x = \theta/\theta_{0,5}$) при трех значениях ширины диаграммы направленности $\theta_{0,5}$ представлены на рис. 4.

Достоинством метода является большая величина выходного сигнала при ориентации антенны на цель. Однако из выражений

(23) и рис. 4 следует, что метод пеленгации по максимуму мало пригоден для точного определения угловых координат, так как в области малых значений углов относительно равносигнального направления пеленгационная чувствительность близка к нулю. Кроме того, имеет место очевидная трудность выявления стороны отклонения направления на источник относительно оси антенной системы, а также зависимость амплитуды сигнала на выходе не только от угла отклонения θ , но и от неизвестных амплитудных характеристик принимаемой волны и параметров антеннофидерного тракта. Поэтому метод максимума очень редко используется в практических приложениях.



Рис. 4. Пеленгационная чувствительность в методе максимума

Рассмотрим характеристики других методов определения направления на источник излучения, которые используют амплитуды сигналов на выходе двух антенн, развернутых относительно друг друга на угол $2\theta_0$. Например, *метод сравнения*. В этом случае сигналы на выходе двух идентичных антенн определяются как

$$u_{1}(t,\theta) \sim \operatorname{Re}(\dot{E}(t)F(\theta)) = \operatorname{Re}\left(E_{m} \exp(i(\omega t - \phi_{0})) \exp\left(-2\ln 2\left(\frac{\theta - \theta_{0}}{\theta_{0,5}}\right)^{2}\right)\right),$$
$$u_{2}(t,\theta) \sim \operatorname{Re}(\dot{E}(t)F(\theta)) = \operatorname{Re}\left(E_{m} \exp(i(\omega t - \phi_{0})) \exp\left(-2\ln 2\left(\frac{\theta + \theta_{0}}{\theta_{0,5}}\right)^{2}\right)\right).$$
(24)

Информация об угловом местоположении источника находится на основании определения отношения двух сигналов. В этом случае пеленгационная характеристика имеет следующий вид:

$$g(\theta) = \frac{F(\theta - \theta_0)}{F(\theta + \theta_0)} = \exp\left(8\ln 2\frac{\theta\theta_0}{\theta_{0,5}^2}\right),$$
 (25)

а ее крутизна определяется выражением

$$S(\theta) = 8\ln 2\frac{\theta_0}{\theta_{0,5}^2} \exp\left(8\ln 2\frac{\theta_0}{\theta_{0,5}^2}\right).$$
 (26)

На рис. 5 представлены результаты расчетов пеленгационной характеристики при различных соотношениях между углом поворота антенны от равносигнального направления и шириной диаграммы направленности $h = \theta_0/\theta_{0.5}$.

По оси абсцисс отложены значения углового положения источника излучения относительно ширины диаграммы направленности антенны $x = \theta/\theta_{0,5}$. Для удобства ось ординат представлена в логарифмическом масштабе. В соответствии с этой характеристикой по величине отношения амплитуд может быть найдено смещение источника относительно радиосигнального направления $g(\theta = 0) = 1$. Графики пеленгационной чувствительности приведены на рис. 6. Увеличение углового разноса антенн приводит к возрастанию крутизны пеленгационной характеристики. Чем уже диаграмма направленности антенны, тем больше пеленгационная чувствительность. В качестве недостатков метода сравнения следует

отметить сильную зависимость результатов измерений от параметров каналов, а также нелинейность пеленгационных характеристик.



Рис. 5. Пеленгационная характеристика в методе сравнения



Рис. 6. Пеленгационная чувствительность в методе сравнения

Кроме измерения отношения амплитуд двух сигналов для определения углового положения источника электромагнитного излучения может быть использована разность этих сигналов. В этом случае информационным является сигнал

$$u_{\Delta}(t,\theta) = u_1(t,\theta) - u_2(t,\theta) \sim \operatorname{Re}[E_m \exp(i(\omega t - \phi_0))(F(\theta - \theta_0) - F(\theta + \theta_0))]$$
(27)

Полученная разностная зависимость обладает дискриминаторными свойствами по углу и позволяет определить величину и знак углового положения источника радиоизлучения относительно равносигнального направления $u_{\Lambda}(t, \theta = 0) = 0$.

Для этого метода пеленгационная характеристика может быть представлена выражением

$$g(\theta) = 2 \exp\left(-2 \ln 2 \left(\left(\frac{\theta}{\theta_{0,5}}\right)^2 + \left(\frac{\theta_0}{\theta_{0,5}}\right)^2\right)\right) sh\left(4 \ln 2 \frac{\theta \theta_0}{\theta_{0,5}^2}\right), \quad (28)$$

а пеленгационная чувствительность имеет вид:

$$S(\theta) = \frac{8\ln 2}{\theta_{0,5}^2} \exp\left(-2\ln 2\left(\left(\frac{\theta}{\theta_{0,5}}\right)^2 + \left(\frac{\theta_0}{\theta_{0,5}}\right)^2\right)\right) \times \left(\theta_0 ch\left(4\ln 2\frac{\theta\theta_0}{\theta_{0,5}^2}\right) - \theta sh\left(4\ln 2\frac{\theta\theta_0}{\theta_{0,5}^2}\right)\right) = S_0 \exp\left(-2\ln 2\left(\frac{\theta}{\theta_{0,5}}\right)^2\right) \times (29)$$
$$\left(ch\left(4\ln 2\frac{\theta\theta_0}{\theta_{0,5}^2}\right) - \frac{\theta}{\theta_0}sh\left(4\ln 2\frac{\theta\theta_0}{\theta_{0,5}^2}\right)\right),$$

где $S_0 = \frac{8 \ln 2\theta_0}{\theta_{0,5}^2} \exp\left(-2 \ln 2 \left(\frac{\theta_0}{\theta_{0,5}}\right)^2\right) -$ крутизна пеленгационной

характеристики в равносигнальном направлении, sh(z) и ch(z) – гиперболические синус и косинус.

На рис. 7 и 8 представлены графики зависимости $g(\theta)$ и $S(\theta)$ при различных значениях соотношения углового разноса и ширины диаграммы направленности h.



Рис. 7. Пеленгационная характеристика в амплитудном методе с разностной обработкой



Рис. 8. Пеленгационная чувствительность в амплитудном методе с разностной обработкой

Отметим, что крутизна пеленгационной характеристики максимальна при $\theta = 0$, причем с увеличением соотношения между угловым разносом антенн и шириной диаграмм направленности она сначала растет, а затем уменьшается. Максимальное значение S_0 наблюдается при $h = 1/\sqrt{4 \ln 2} \approx 0.6$. Увеличение ширины диаграммы направленности при h = const приводит к уменьшению крутизны. Пеленгационная характеристика имеет диапазон, в пределах которого ее крутизна меняется незначительно. Кроме того, в отличие от метода сравнения, здесь пеленгационная чувствительность является четной функцией угла смещения источника излучения относительно равносигнального направления $g(\theta = 0) = 0$. В качестве недостатка разностного метода определения углового положения источника излучения следует отметить ограниченный диапазон углов пеленгационной характеристики, где она носит однозначный характер, а также зависимость результатов от амплитудных параметров каналов.

Более совершенным методом определения угловых координат является суммарно-разностный метод, в котором наряду с разностью двух сигналов, принимаемых разнесенными по углу антеннами, используется и их сумма. В этом случае пеленгационная характеристика принимает следующий вид:

$$g(\theta) = \frac{u_1(t,\theta) - u_2(t,\theta)}{u_1(t,\theta) + u_2(t,\theta)} = \frac{F(\theta - \theta_0) - F(\theta + \theta_0)}{F(\theta - \theta_0) + F(\theta + \theta_0)} = th \left(4\ln 2\frac{\theta\theta_0}{\theta_{0,5}^2}\right).$$
(30)

Здесь th(z) – гиперболический тангенс.

Пеленгационная чувствительность при этом может быть представлена следующим соотношением:

$$S(\theta) = 4\ln 2\frac{\theta_0}{\theta_{0,5}^2} \frac{1}{ch^2 \left(4\ln 2\frac{\theta\theta_0}{\theta_{0,5}^2}\right)} = \frac{S_0}{ch^2 \left(4\ln 2\frac{\theta\theta_0}{\theta_{0,5}^2}\right)},$$
(31)

где $S_0 = 4 \ln 2 \frac{\theta_0}{\theta_{0,5}^2}$ – величина, которая определяет крутизну пелен-

гационной характеристики в равносигнальном направлении.

На рис. 9 и 10 представлены результаты расчетов $g(\theta)$ и $S(\theta)$.



Рис. 9. Пеленгационная характеристика в амплитудном методе с суммарно-разностной обработкой



Рис. 10. Пеленгационная чувствительность в амплитудном методе с суммарно-разностной обработкой

Увеличение углового разноса приводит к возрастанию крутизны в равносигнальном направлении. В остальном поведение кривых в зависимости от параметров – такое же, как и для разностного метода, но в отличие от последнего в данном случае пеленгационная характеристика всегда однозначна. Следует при этом отметить, что при больших отклонениях источника от равносигнального направления она достигает насыщения. Кроме того, пеленгационная характеристика имеет больший диапазон углов, в пределах которых ее крутизна меняется незначительно. Еще одним преимуществом суммарно-разностного метода является существенно меньшее влияние амплитудных характеристик каналов.

Рассмотрим *фазовые методы* определения углового положения источника радиоизлучения. В связи с невозможностью измерения абсолютного значения фазы сигнала для измерения угловых координат применяется только метод сравнения фаз. Из-за трудностей создания устройств с запоминанием фазы фазовое пеленгование по способу последовательного сравнения фаз широкого распространения не получило.

Проанализируем пеленгование объекта фазовым методом для двух приемных антенн A_1 и A_2 (рис. 11). Пусть расстояние между антеннами, называемое *базой*, равно l, а пеленгуемый объект удален от центра базы на расстояние R >> l. В этом случае направления прихода сигналов от объекта к антеннам можно считать параллельными. При этом разность расстояний $\Delta R = R_2 - R_1 = lSin\theta$, где θ – угол между направлением на объект и нормалью к базе, проходящей через ее середину. Зная базу и измеряя тем или иным способом разность расстояний ΔR , можно найти направление на пеленгуемый объект θ .

Будем полагать, что приемные каналы пеленгатора имеют одинаковую центральную частоту настройки и идентичные фазовые и частотные характеристики.



Рис. 11. Фазовый пеленгатор

Напряжение на выходе каждой приемной антенны может быть представлено в виде:

$$\dot{U}_{1,2}(t) \sim E(t_{1,2})F(\theta_{1,2})\exp(i(\alpha t \pm \Delta \phi/2)), \qquad (32)$$

где E(t) – огибающая напряженности поля на раскрыве каждой антенны, $\Delta \phi/2 = k(R - R_1) = k(R_2 - R)$ – набег фазы относительно центра антенной системы. Поскольку источник достаточно удален от пеленгатора, то можно положить $E(t_1) \cong E(t_2)$ и $\theta_1 = \theta_2 = \theta$. После перемножения, фильтрации высокочастотных составляющих и временного усреднения (эти функции выполняет фазовый детектор) получаем:

$$u(\theta) = p \overline{\operatorname{Re}(\dot{U}_1 \dot{U}_2^*)} = p \overline{E^2} F^2(\theta) Cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda} Sin\theta\right), \qquad (33)$$

где сомножитель *р* характеризует коэффициент преобразования.

Для исключения влияния неизвестной амплитуды вводят эффективную АРУ или ограничение сигнала, благодаря чему напряжение на входе детектора можно считать постоянным. Тогда выражение для $u(\theta)$ можно записать в виде

$$u(\theta) = u_0 Cos\left(2\pi \frac{l}{\lambda}Sin\theta\right),\tag{34}$$

где $u_0 = const.$

Так как косинус – функция четная, то знак напряжения на выходе фазового детектора не зависит от знака отклонения оси антенны от направления на объект. Для устранения этого недостатка в один из приемных каналов вводят цепь сдвига фазы на $\pi/2$, вследствие чего зависимость $u(\theta)$ приобретает вид дискриминационной характеристики:

$$u(\theta) = u_0 Sin\left(2\pi \frac{l}{\lambda}Sin\theta\right).$$
(35)

Это позволяет найти пеленгационную характеристику и ее крутизну

$$g(\theta) = \frac{u(\theta)}{u_0} = Sin\left(2\pi \frac{l}{\lambda}Sin\theta\right),$$

$$S(\theta) = 2\pi \frac{l}{\lambda}Cos\theta \cdot Cos\left(2\pi \frac{l}{\lambda}Sin\theta\right).$$
 (36)

При малых значениях θ зависимость $u(\theta)$ имеет приближенно линейный характер:

$$u(\theta) \approx u_0 Sin 2\pi \frac{l}{\lambda} \theta.$$
 (37)

Таким образом, по напряжению на выходе фазового детектора можно найти значение и знак угла прихода волны θ. В этом случае пеленгационная характеристика принимает вид

$$g(\theta) = \frac{u(\theta)}{u_0} = 2\pi \frac{l}{\lambda} \theta, \qquad (38)$$

а крутизна пеленгационной характеристики

$$S = 2\pi \frac{l}{\lambda} . \tag{39}$$

Результаты расчетов $g(\theta)$ и $S(\theta)$ по формулам (36) представлены на рис. 12 и 13 при различных значениях соотношения между базой и длиной волны излучения $d = l/\lambda$.



Рис. 12. Пеленгационная характеристика в фазовом методе



Рис. 13. Пеленгационная чувствительность в фазовом методе

Как следует из приведенных зависимостей, чувствительность, а следовательно, и точность пеленгования растут с увеличением d. Однако при $l/\lambda > 1/2$ появляется неоднозначность измерения угла, что следует из выражения (36). При диапазоне однозначного измерения разности фаз 2π пределы однозначности измерения углового положения объекта определяются как

$$\Delta \theta = \lambda / l \,. \tag{40}$$

Это является существенным недостатком фазовых методов пеленгации. Для исключения неоднозначности применяют (так же как в фазовых дальномерных системах) несколько шкал, то есть проводят измерения при различных отношениях l/λ . Необходимо подчеркнуть, что рассмотренный фазовый угломер с ненаправленными антеннами не обладает разрешающей способностью по углу, поскольку два или несколько источников сигнала, расположенных на различных направлениях, создадут в антеннах единый результирующий сигнал (если они неразделимы по другим параметрам), что исключает возможность их раздельного наблюдения и измерения пеленгов. Для разрешения сигналов по углу необходимы антенны с достаточно узкой амплитудной характеристикой направленности. Существенным недостатком рассмотренного типа фазового пеленгатора является также зависимость пеленгационной характеристики и точности измерения угловых координат от фазовых характеристик трактов, которые зачастую нестабильны.

Этот недостаток простых фазовых пеленгаторов устраняется в схемах с суммарно-разностной обработкой. В этом случае на входы фазового детектора подаются суммарный и разностный сигналы, принимаемые двумя пространственно-разнесенными антеннами, как представлено на рис. 11. В данном случае, с учетом $E(t_1) \cong E(t_2), \ \theta_1 = \theta_2 = \theta$ и фазовращателя на $\pi/2$, они могут быть представлены как

$$\dot{U}_{\Delta}(t) \sim E(t)F(\theta) \left(\exp(i(\omega t + \pi/2 - \Delta \phi/2)) - \exp(i(\omega t + \Delta \phi/2)) \right), (41)$$

$$\dot{U}_{\Sigma}(t) \sim E(t)F(\theta) \left(\exp(i(\omega t + \pi/2 - \Delta \phi/2)) + \exp(i(\omega t + \Delta \phi/2)) \right). (42)$$

Тогда осуществляя операции, аналогичные тем, которые были сделаны для метода изложенного выше, получим:

$$u(\theta) = p \overline{\operatorname{Re}}(\dot{U}_{\Delta}\dot{U}_{\Sigma}^{*}) = p \overline{E^{2}}F^{2}(\theta)\operatorname{Sin}\left(\frac{2\pi l}{\lambda}\operatorname{Sin}\theta\right).$$
(43)

Вводя АРУ или ограничение сигналов, получим следующее выражение:

$$u(\theta) = u_0 Sin\left(2\pi \frac{l}{\lambda}Sin\theta\right),\tag{44}$$

которое полностью совпадает с (36). Поэтому характеристики пеленгационной чувствительности и ее крутизны – такие же, как на рис. 12 и 13. Однако в данном случае пеленгационное направление θ не зависит от стабильности и точности установки амплитудных и фазовых параметров каналов в отличие от простой фазоразностной схемы.

В отдельных случаях фазовый метод можно применять с обработкой в схеме *сравнения амплитуд разностного и суммарного* каналов на видеочастоте. В этом случае определяя отношение разности и суммы сигналов (41), (42) со сдвигом фазы на $\pi/2$ в одном из каналов (например разностном) и выполняя усреднение, получим

$$u(\theta) = \operatorname{Re}\left[\left(\frac{U_{\Delta}}{\dot{U}_{\Sigma}}\right)\right] = tg\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) = tg\left(\pi\frac{l}{\lambda}Sin\theta\right).$$
(45)

Тогда выражения для пеленгационной характеристики и пеленгационной чувствительности принимают следующий вид:

$$u(\theta) = tg\left(\pi \frac{l}{\lambda}Sin\theta\right), \qquad S_0 = \pi \frac{l}{\lambda}Cos\theta\left(Cos\left(\pi \frac{l}{\lambda}Sin\theta\right)\right)^{-2}.$$
 (46)

Графики зависимости вышеприведенных характеристик представлены на рис. 14 и 15.

Пеленгационная характеристика является нечетной функцией, а ее крутизна – четной функцией угла смещения источника. При расположении последнего в равносигнальном направлении пеленгационная чувствительность определяется соотношением размера базы к длине волны излучения $d = l/\lambda$. Однако в отличие от предыдущих двух методов диапазон неоднозначности определяется как

$$\Delta \theta = \lambda / 2l \,. \tag{47}$$



Рис. 14. Пеленгационная характеристика в фазовом методе с суммарно-разностной обработкой амплитуд



Рис. 15. Пеленгационная чувствительность в фазовом методе с суммарно-разностной обработкой амплитуд

Кроме рассмотренных выше схем измерения углового положения источника, получили распространение также фазовые радиопеленгаторы, в которых изменение фазы сигнала вызвано эффектом Доплера. Простейший пеленгатор такого типа имеет ненаправленную в горизонтальной плоскости антенну A_1 , которая движется с угловой скоростью Ω по окружности радиусом $D_r/2$ вокруг центральной антенны A_2 . Поскольку при движении антенны ее расстояние до источника излучения меняется с периодом $2\pi/\Omega$, возникает эффект Доплера, вызывающий фазовую модуляцию ЭДС, наводимой в антенне A_1 по закону

$$e_{A1} = ESin(\omega t + m_{\varphi}\cos(\Omega t - \theta)), \qquad (48)$$

где $m_{\phi} = \pi D_r / \lambda$ – индекс фазовой модуляции; θ – угол на источник.

Таким образом, информация о пеленге заключена в фазе модулирующего колебания, которое может быть выделено при сравнении сигнала антенн A_1 и A_2 в фазовом детекторе.

При больших диаметрах D_r вращение антенн A_1 с требуемой угловой скоростью затруднительно и вместо одной движущейся антенны несколько неподвижных антенн располагается на окружности диаметром D_r и поочередно подключаются к входу приемника пеленгатора. В этом случае непрерывная модуляционная функция заменяется рядом ее дискретных значений. На основе теоремы Котельникова для точного воспроизведения непрерывной функции расстояние l_1 между соседними антеннами, расположенными по окружности, не должно превышать половины длины волны несущих колебаний принимаемого сигнала.

Применение эффекта Доплера возможно и в радиомаяках, в которых с помощью вращающейся антенны или ряда неподвижных коммутируемых антенн фаза излучаемого сигнала модулируется, и параметры модуляции несут информацию об обратном пеленге объекта, извлекаемую при обработке сигнала, принимаемого на объекте.

При увеличении диаметра D_r пропорционально растет девиация частоты излучаемых доплеровским маяком колебаний, что позволяет повысить помехоустойчивость системы и, в частности, уменьшить влияние на точность пеленгования отражений от местных предметов.

Структурные схемы радиопеленгаторов

Рассмотрим схемы построения пеленгаторов с общей точки зрения. Диаграммы направленности антенной системы, которые являются комплексными функциями угла прихода, выражаются зависимостями:

 $\dot{f}_1(\theta) = F_1(\theta) \cdot \exp(i\Phi_1(\theta)), \ \dot{f}_2(\theta) = F_2(\theta) \cdot \exp(i\Phi_2(\theta)).$ (49)

Таким образом, в любой системе сравниваются сигналы, соответствующие двум последовательным состояниям одной антенны или двум лучам антенной системы:

$$\dot{U}_1(t) \sim \dot{E}(t)\dot{f}_1(\theta), \ \dot{U}_2(t) \sim \dot{E}(t)\dot{f}_2(\theta),$$
 (50)

где θ — координата источника, отсчитываемая от оси пеленгатора. Сигналы \dot{U}_1 и \dot{U}_2 зависят от расстояния до источника. Метод сравнения позволяет эту зависимость исключить.

Запишем отношение двух принятых сигналов

$$\dot{r}_m(\theta) = \dot{U}_1(t) / \dot{U}_2(t) = \dot{f}_1(\theta) / \dot{f}_2(\theta).$$
 (51)

Данное отношение, которое в дальнейшем будем называть мультипликативным, при определенных условиях может служить исходным для формирования пеленгационной характеристики и получения информации об угловом положении источника излучения.

Кроме того, для формирования пеленгационной характеристики может быть использовано также отношение разностного сигнала к суммарному:

$$\dot{r}_{a}(\theta) = \frac{\dot{U}_{1}(t,\theta) - \dot{U}_{2}(t,\theta)}{\dot{U}_{1}(t,\theta) + \dot{U}_{2}(t,\theta)} = \frac{\dot{f}_{1}(\theta) - \dot{f}_{2}(\theta)}{\dot{f}_{1}(\theta) + \dot{f}_{2}(\theta)} = \frac{\dot{f}_{\Delta}(\theta)}{\dot{f}_{\Sigma}(\theta)},$$
(52)

которое обычно называют аддитивным отношением принятых сигналов. В отношение (52) входят так называемые суммарные и разностные диаграммы $\dot{f}_{\Sigma}(\theta)$ и $\dot{f}_{\Delta}(\theta)$. С учетом нормирующего множителя, обеспечивающего баланс мощности в двух представлениях, получаем

$$\dot{f}_{\Sigma}(\theta) = \left(\dot{f}_{1}(\theta) + \dot{f}_{2}(\theta)\right) / \sqrt{2}, \quad \dot{f}_{\Delta}(\theta) = \left(\dot{f}_{1}(\theta) - \dot{f}_{2}(\theta)\right) / \sqrt{2}, \quad (53)$$

и, наоборот,

 $\dot{f}_1(\theta) = \left(\dot{f}_{\Sigma}(\theta) + \dot{f}_{\Delta}(\theta)\right) / \sqrt{2}, \quad \dot{f}_2(\theta) = \left(\dot{f}_{\Sigma}(\theta) - \dot{f}_{\Delta}(\theta)\right) / \sqrt{2}. \quad (54)$

Отметим, что разностная диаграмма в (52) и (53) может быть организована и вычитанием первого сигнала из второго, т.е. иметь противоположный знак, что не имеет принципиального значения.

Связь между мультипликативными и аддитивными отношениями сигналов устанавливается с помощью следующих выражений:

$$\dot{r}_a(\theta) = \frac{\dot{r}_m(\theta) - 1}{\dot{r}_m(\theta) + 1}, \ \dot{r}_m(\theta) = \frac{1 + \dot{r}_a(\theta)}{1 - \dot{r}_a(\theta)}.$$
(55)

Диаграммы $\dot{f}_1(\theta)$ и $\dot{f}_2(\theta)$ должны отвечать определенным условиям. На оси пеленгатора ($\theta = 0$) сигналы должны быть одинаковыми, следовательно, выполняются условия:

$$\dot{r}_a(\theta = 0) = 0, \ \dot{r}_m(\theta = 0) = 1.$$
 (56)

Поэтому это направление ($\theta = 0$) называется равносигнальным направлением радиопеленгатора.

Пеленгационная характеристика угломерной системы должна быть нечетной действительной функцией угла прихода θ [1]. Отсюда отношение принятых сигналов должно меняться на обратное при перемещении источника в симметричную относительно оси пеленгатора точку. Для мультипликативного и аддитивного отношений это соответствует условиям:

$$\dot{r}_m(\theta) = 1/\dot{r}_m(-\theta), \ \dot{r}_a(\theta) = -\dot{r}_a(-\theta).$$
(57)

Очевидно, что соотношения (57) удовлетворяются для случая диаграмм, обладающих зеркальной симметрией относительно равносигнального направления, максимумы которых смещены от оси на $\pm \theta_0$:

$$F_1(\theta) = F(\theta_0 - \theta), \ F_2(\theta) = F(\theta_0 + \theta), \ \Phi_1(\theta) = -\Phi_2(\theta) = \Phi(\theta)/2.$$
(58)

Из-за зеркальной симметрии диаграмм $\dot{f}_1(\theta)$ и $\dot{f}_2(\theta)$ суммарная диаграмма $\dot{f}_{\Sigma}(\theta)$ имеет четную симметрию относительно равносигнального направления, а разностная $\dot{f}_{\Delta}(\theta)$ – нечетную.

Кроме мультипликативного и аддитивного отношений могут быть образованы другие отношения, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к пеленгационной характеристике радиопеленгатора. При умножении мультипликативного и аддитивного отношений на комплексную постоянную *b*

$\dot{b} = b \cdot \exp(i\psi)$

получим линейно-преобразованные отношения

$$\dot{r}_a(\theta) = \dot{b}\dot{r}_a(\theta), \ \dot{r}_m(\theta) = \dot{b}\dot{r}_m(\theta),$$
(59)

которые могут быть использованы для определения углового положения источника излучения.

Устройства, в которых образуются сумма и разность принятых сигналов или производится операция умножения принятых сигналов на коэффициент \dot{b} , называются преобразователями, так как в них в общем случае возможно преобразование информации из амплитудных соотношений в фазовые и обратно. Эти преобразования осуществляются обычно на высокой частоте с использованием пассивных элементов в виде мостовых соединений, отрезков линий и т.п. из-за их относительной простоты и стабильности характеристик [4].

Операцию вычисления отношения двух сигналов, преобразованных или непреобразованных, невозможно выполнить без предварительного их усиления. Устройство, содержащее активные элементы, включая усилители и схему сравнения, которое выделяет мультипликативное или аддитивное отношение и образует пеленгационную характеристику, называется угловым дискриминатором.

Для каждого вида отношений (51) и (52) возможны три метода пеленгации – амплитудный, фазовый и комплексный (амплитудно-фазовый). При амплитудном пеленговании угловая информация содержится в амплитудных диаграммах $F_1(\theta)$ и $F_2(\theta)$. В этом случае при идентичных фазовых диаграммах мультипликативное и аддитивное отношение выражаются только через амплитудные диаграммы направленности

$$r_{m}(\theta) = \frac{F_{1}(\theta)}{F_{2}(\theta)} = \frac{F(\theta_{0} - \theta)}{F(\theta_{0} + \theta)} = \rho(\theta),$$

$$r_{a}(\theta) = \frac{F_{1}(\theta) - F_{2}(\theta)}{F_{1}(\theta) + F_{2}(\theta)} = \frac{F_{\Delta}(\theta)}{F_{\Sigma}(\theta)} = \rho_{a}(\theta).$$
(60)

При фазовом пеленговании, когда амплитудные диаграммы идентичны, угловая информация содержится в разности фаз $\Delta \Phi(\theta) = \Phi_1(\theta) - \Phi_2(\theta).$ (61) В этом случае мультипликативное и аддитивное отношения выражаются только через фазовые диаграммы

$$r_{m}(\theta) = \frac{\exp(i\Phi_{1}(\theta))}{\exp(i\Phi_{2}(\theta))} = \exp(i\Delta\Phi(\theta)),$$

$$r_{a}(\theta) = \frac{\exp(i\Phi_{1}(\theta)) - \exp(i\Phi_{2}(\theta))}{\exp(i\Phi_{1}(\theta)) + \exp(i\Phi_{2}(\theta))} = i \cdot tg\left(\frac{\Delta\Phi(\theta)}{2}\right).$$
(62)

Отношение амплитуд $\rho(\theta)$ и разность фаз $\Delta \Phi(\theta)$ принято называть мультипликативными, а $\rho_a(\theta)$ и $tg(\Delta \Phi(\theta)/2)$ – аддитивными функциями угла θ [1, 2].

Между амплитудными отношениями (60) существует связь:

$$\rho(\theta) = \frac{1 + \rho_a(\theta)}{1 - \rho_a(\theta)}, \ \rho(\theta) = \frac{\rho_a(\theta) - 1}{\rho_a(\theta) + 1}.$$
(63)

Особенностью аддитивного (суммарно-разностного) представления является то, что отношение сигналов $r_a(\theta)$ и при амплитудном, и при фазовом методе пеленгации являются амплитудными функциями: при амплитудном методе $\rho_a(\theta)$ на действительной оси и при фазовом – $r_a(\theta)$ на мнимой. Следовательно, разность фаз сигналов на входе пеленгатора при фазовом методе преобразуется в амплитуду сигнала на выходе.

Угловой дискриминатор, в котором для образования пеленгационной характеристики используется мультипликативная функция угла, реагирующий только на амплитудные соотношения принятых сигналов, называется амплитудным, а реагирующий только на фазовые соотношения – фазовым. Угловой дискриминатор, который реагирует как на амплитудные, так и на фазовые соотношения сигналов и в котором для формирования пеленгационной характеристики применяется аддитивная функция угла, называется суммарно-разностным.

Таким образом, возможны только три различных способа измерения угла (три типа угловых дискриминаторов): амплитудный, фазовый и суммарно-разностный. Каждый из них можно применять либо при амплитудном, либо при фазовом, либо при комплексном пеленговании. Поэтому возможно всего девять ос-

новных классов пеленгационных систем, классификация которых приведена ниже в таблице. Исходя из принятой классификации, в названии пеленгационных систем первое слово характеризует вид пеленгования, а второе - тип углового дискриминатора. Так, например, система с амплитудным угловым дискриминатором при амплитудном пеленговании называется амплитудноамплитудной, фазовом пеленговании – фазовоa при амплитудной. Система с фазовым угловым дискриминатором при амплитудном пеленговании называется амплитудно-фазовой, а при фазовом – фазово-фазовой. Система с суммарно-разностным угловым дискриминатором в зависимости от вида пеленгования называется амплитудной суммарно-разностной или комплексной суммарно-разностной.

Способ измерения	Основные классы систем для трех видов			
(тип углового дискри-	пеленгования			
минатора)	амплитудного	фазового	комплексного	
	(A)	(Φ)	(K)	
Амплитудный (А)	AA	ФА	КА	
Фазовый (Ф)	ΑΦ	ΦΦ	КΦ	
Суммарно-разностный	ACP	ФСР	КСР	
(CP)				

Из указанных в таблице девяти возможных систем на практике наибольшее применение находят четыре: амплитудноамплитудная (АА), фазово-фазовая (ФФ), амплитудная суммарно-разностная (АСР) и фазовая суммарно-разностная (ФСР).

Исходя из последовательности операций, выполняемых пеленгационной системой, структурная схема ее должна содержать следующие основные элементы (рис. 16):

– угловой датчик 1, формирующий сигналы, в соотношениях параметров которых содержится информация об угловом положении источника излучения;

– преобразователь информации 2, осуществляющий изменение формы соотношения сигналов $r(\theta)$;

– угловой дискриминатор 3, выделяющий вещественную функцию отношения параметров сигналов, однозначно связанную с углом прихода электромагнитной волны от источника излучения.



Рис. 16. Структурная схема пеленгационной системы

В качестве преобразователя применяется фазовращатель на $\pi/2$, выполняющий операцию умножения на $\pm i$, и суммарноразностный преобразователь в виде кольцевого волнового моста или двойного волнового тройника [4].

Сравнение сигналов (образование отношения $r(\theta)$) может быть осуществлено в разные моменты времени в одном канале или в один и тот же момент времени, но в разных каналах. В соответствии с этим различают системы с последовательной и параллельной обработкой сигналов. В системах первого типа, одноканальных, луч антенны перемещается в пространстве по заданному закону относительно направления на источник. Наиболее распространено коническое сканирование, при котором луч перемещается по конической поверхности под углом θ_0 к равносигнальному направлению. При методе переключения положение луча дискретно меняется в одной или двух ортогональных плоскостях. Угловое расстояние $2\theta_0$ между положениями луча в каждой плоскости меньше ширины диаграммы направленности.

Сканирование может осуществляться перемещением всей антенны. Однако при простоте ее радиотехнической схемы в этом случае существенно повышаются требования к жесткости конструкции антенны и к динамическим характеристикам ее привода. Обычно для сканирования механическим или электрическим способом в раскрыве создается линейное фазовое распределение, плоскость наклона фазы меняется (например, за счет поворота вокруг оси антенны смещенного с нее фазового центра облучателя). В системах последовательного типа пеленгационная характеристика на выходе углового дискриминатора находится в результате обработки сигнала в течение некоторого времени, равного, как минимум, периоду сканирования. При флуктуирующем сигнале от источника системы с параллельной обработкой сигнала более предпочтительны, поскольку сравниваемые сигналы в них принимаются одновременно разными приемными устройствами. Эти системы получили название *моноимпульсных* [1, 3], так как в принципе одного импульса (радиолокация) достаточно для определения координат источника. Оба типа систем основаны на общих физических принципах и имеют много общего, по крайней мере, в части, касающейся антенн. Далее в качестве примера использования амплитудного метода будут рассмотрены основные пеленгационные характеристики сканирующих антенн.

Пеленгационные характеристики при коническом сканировании

Требование зеркальной симметрии диаграмм \dot{f}_1 и \dot{f}_2 (формулы (58)) выполняется в случае, когда диаграмма произвольной формы $\dot{f}(\theta, \varphi)$ вращается вокруг оси, смещенной по координате ϑ' на угол θ_0 относительно максимума (или вокруг фазового центра в фазовых методах) (см. рис. 17). Связанная с диаграммой система координат ϑ', φ' поворачивается относительно отсчетной системы координат ϑ, φ на угол χ . Радиус-вектор точки M, в которой находится источник, равен θ в местной системе координат ϑ, φ , полярная ось которой совпадает с направлением максимума диаграммы, и θ_u в системе координат ϑ, φ , полярный угол равен ψ и χ_u соответственно. Из треугольника *ОМО'* находим

$$\theta^{2} = (\theta_{0} - \theta_{u})^{2} + 2\theta_{0}\theta_{u}(1 - \cos(\chi - \chi_{u})), \qquad (64)$$

$$tg\psi = Sin(\chi - \chi_u) / (Cos(\chi - \chi_u) - \theta_0 / \theta_u).$$
(65)

В простейшем случае диаграммы $F(\theta)$ с круговой симметрией зависимость от угла ψ пропадает. Таким образом, сигнал, принятый антенной, пропорционален амплитудной диаграмме $F(\theta)$ (θ из (73)) и меняется с изменением угла χ . Для последовательных методов образования пеленгационной характеристики угол χ является функцией времени. В моноимпульсных методах используются диаграммы с различными значениями χ .



Рис. 17. Геометрия смещения оси диаграммы направленности антенны

Рассмотрим ситуацию, когда пеленгация осуществляется путем конического сканирования смещенным с оси лучом. При коническом сканировании за счет вращения облучателя, фазовый центр которого не совпадает с осью вращения, принятый сигнал модулирован по амплитуде. Сигнал в антенне $U(t) \sim F(\theta(\chi))$, где $\theta(\chi)$ определяется формулой (73), а $\chi = \Omega t$ – частота сканирования луча. Амплитуда колебаний огибающей сигнала дает информацию о смещении θ_u источника относительно равносигнального направления, а ее фаза, т.е. положение максимума t_u в долях периода сканирования, – об угловом смещении χ_u от оси ϑ (рис. 18). Максимум огибающей равен $F(\theta_0 - \theta)$, положение его $\chi_u = \chi = \Omega t_u$, минимум $F(\theta_0 + \theta)$ расположен в точке $\chi_1 = \chi + \pi$.



Рис. 18. Временная диаграмма сигнала на выходе антенны

Сигнал ошибки угломерной системы находится в этом случае нормировкой разложения в ряд Фурье сигнала U(t) к постоянной составляющей разложения:

$$r(t) = 1 + \rho_1 Cos(\Omega t - \psi_1) + \rho_2 Cos(2\Omega t - \psi_2) + \dots$$
 (66)

Модуляционный коэффициент ρ_k и фаза ψ_k *k-ой* гармоники определяются как

$$\rho_k = 2\sqrt{a_k^2 + b_k^2} / a_0, \quad \Psi_k = Arctg(b_k / a_k),$$
(67)

где a_k и b_k – амплитуды косинусной и синусной составляющих гармоники:

$$a_{k} = \frac{2}{T} \int_{0}^{T} |U(t)| Cos(k\Omega t) dt, \quad b_{k} = \frac{2}{T} \int_{0}^{T} |U(t)| Sin(k\Omega t) dt.$$
(68)

Обычно в качестве пеленгационной характеристики используют первую гармонику с коэффициентом модуляции, равным в этом случае приближенно:

$$g = \rho_1 \approx \frac{F(\theta_0 - \theta_u) - F(\theta_0 + \theta_u)}{F(\theta_0 - \theta_u) + F(\theta_0 + \theta_u)}$$
(69)

и фазой $\psi_1 = \chi_u = \Omega t_u$.

Таким образом, при коническом сканировании реализуется аддитивный метод сравнения сигналов, но с последовательной обработкой результатов измерений. К его недостаткам можно отнести общее всем методам одноканального сканирования снижение усиления в равносигнальном направлении, а также потерю части мощности сигнала ошибки при фильтрации первой гармоники.

Из (69) следует, что при обработке сигнала U(t) в методе сканирования смещенным лучом в плоскости, проходящей через равносигнальное направление и направление на источник, образуются «эффективные» разностная и суммарная диаграммы (см. выражение (53):

$$F_{\Delta} = \left(F(\theta_0 - \theta_u) - F(\theta_0 + \theta_u) \right) / \sqrt{2} , F_{\Sigma} = \left(F(\theta_0 - \theta_u) + F(\theta_0 + \theta_u) \right) / \sqrt{2} .$$

Амплитуды этих диаграмм жестко связаны с углом отклонения θ_0 сканирующего луча от равносигнального направления, т.е. имеет место зависимое формирование суммарно-разностных диаграмм.

Подставляя угол θ из выражения (64) и используя симметричную диаграмму направленности (21), получаем

$$F(\theta) = F_0 \exp(\mu Cos(\chi - \chi_u)),$$

$$F_0 = \exp(-2\ln 2(x_0^2 + x_u^2)) = \exp(-0.5(\mu + \eta^2/\mu)),$$
(70)

где $\eta = 4 \ln 2x_0 x_u$, $\mu = 4 \ln 2x_0^2$, $x_0 = \theta_0 / \theta_{0,5}$, $x_u = \theta_u / \theta_{0,5}$.

Подставляя (70) в (69), получаем следующее выражение для пеленгационной характеристики:

$$g(\eta) = \frac{\exp(\eta) - \exp(-\eta)}{\exp(\eta) + \exp(-\eta)} = th(\eta) = th\left(4\ln 2\frac{\theta_0\theta_u}{\theta_{0,5}^2}\right).$$
(71)

Пеленгационная чувствительность *S* в плоскости, проходящей через источник излучения, определяется как

$$S = \frac{4\ln 2x_0}{\theta_{0,5}} \left(\frac{2}{\exp(\eta) + \exp(-\eta)}\right)^2 = \frac{S_0}{ch^2(\eta)},$$
 (72)

где $S_0 = 4 \ln 2\theta_0 / \theta_{0,5}^2$ – крутизна пеленгационной характеристики в равносигнальном направлении. Как следует из приведенных формул, они полностью согласуются с соответствующими выражениями для одномерных характеристик.

Параметры сканирующей антенны можно выразить через относительный коэффициент усиления по мощности в равносигнальном направлении, равный относительному уровню мощности в этом направлении:

$$G_0 = G(0)/G_{\text{max}} = \exp(-\mu).$$
 (73)

Относительный угол отклонения максимума определяется в этом случае как

$$\frac{\theta_0}{\theta_{0,5}} = \sqrt{\frac{\ln(1/G_0)}{4\ln 2}}.$$
(74)

Тогда выражение крутизны пеленгационной характеристики в равносигнальном направлении принимает вид

$$S_0 = \frac{\sqrt{4\ln 2\ln(1/G_0)}}{\theta_{0,5}}.$$
 (75)

Важной характеристикой системы является произведение крутизны S_0 на коэффициент усиления G_0 или $\sqrt{G_0} = F(0)$ в равносигнальном направлении. Это произведение характеризует коэффициент использования сигнала и используется при пассивной локации q_p и при активной локации q_a :

$$q_p = S_0 G_0 = \frac{\sqrt{4 \ln 2 \ln(1/G_0)}}{\theta_{0,5}} G_0, \quad q_a = S_0 \sqrt{G_0} = \frac{\sqrt{4 \ln 2G_0 \ln(1/G_0)}}{\theta_{0,5}}.$$
(76)

Из представленных соотношений явно прослеживается зависимость эффективности использования энергии сигнала от параметров антенной системы при определении угловых координат источника излучения. На рис. 19 представлены результаты расчетов произведений $Qp = q_p \theta_{0,5}$, $Qa = q_a \theta_{0,5}$ и $w = S_0 \theta_{0,5}$ от коэффициента усиления антенны. Из приведенных зависимостей следует, что q_p и q_a имеют плавные максимумы в области $G_0 \approx 0,6$ и $G_0 \approx 0,4$ соответственно. Это позволяет выбрать оптимальные значения параметров антенной системы.



Коэффициент усиления антенны

Рис. 19. Нормированные характеристики для сканирующих пеленгационных систем

Напряжение на выходе антенны можно представить, используя разложение (формулы (70)) по степеням показателя экспоненты в виде суммы гармоник

$$u(t) = u_0 + u_1 Cos(\chi - \chi_u) + u_2 Cos2(\chi - \chi_u) + u_3 Cos3(\chi - \chi_u) + \dots, (77)$$

где $u_0 = F_0(1 + \eta^2/2^2 + \eta^4/2^6 + \dots), \quad u_1 = F_0\eta(1 + \eta^2/2^3 + \eta^4/2^63 + \dots),$
 $u_2 = F_0(\eta^2/4)(1 + \eta^2/2^23 + \eta^4/2^73 + \dots), \quad u_3 = F_0(\eta^3/2^33)(1 + \eta^2/2^4 + \dots).$

Практически выделение сигнала пеленга по обеим координатам при коническом сканировании осуществляется путем фильтрации первой гармоники

$$g_{2} = u_{1} Cos \chi / u_{0} \cong \eta Cos \chi \left(1 - \eta^{2} / 8 + \eta^{4} / 48 - ... \right),$$

$$g_{6} = u_{1} Sin \chi / u_{0} \cong \eta Sin \chi \left(1 - \eta^{2} / 8 + \eta^{4} / 48 - ... \right).$$
(78)

Выбор углового и пространственного разноса антенн

Важным параметром антенной системы измерителя углового положения источника является угол смещения максимума относительно равносигнального направления θ_0 при амплитудном методе пеленгования и расстояние между фазовыми центрами антенн при фазовой пеленгации l. Они оказывают существенное влияние на точность определения координат и дальность действия станции. Определение оптимальных значений указанных величин рассмотрим на примере пеленгатора с суммарно-разностным угловым дискриминатором.

Погрешность пеленгования обратно пропорциональна крутизне пеленгационной характеристики и отношению сигнал-шум *q*:

$$\sigma_0 \equiv 1/(S \cdot q). \tag{79}$$

В амплитудной суммарно-разностной системе вблизи равносигнального направления суммарная диаграмма направленности практически неизменна, а разностная – линейна, поэтому

$$S_{0} = \frac{dg}{d\theta} = \left(\frac{dF_{\Delta}}{d\theta}\right) / F_{\Sigma} = \frac{F_{\Delta}'(0)}{F_{\Sigma}(0)}.$$
(80)

Оптимальный угол смещения, обеспечивающий максимальную пеленгационную чувствительность, можно было бы найти, решив уравнение

$$\frac{d}{d\theta} \left(\frac{F_{\Delta}'(0)}{F_{\Sigma}(0)} \right) = 0, \qquad (81)$$

но из приведенных на рис. 20 значений $F_{\Sigma}(0), F'_{\Delta}(0), F'_{\Delta}(0)/F_{\Sigma}(0)$ и $F'_{\Delta}(0)F_{\Sigma}(0)$ в зависимости от безразмерного параметра $x = \theta_0/\theta_{0,5}$, определяемого углом смещения и шириной диаграммы направленности, видно, что отношение $F'_{\Delta}(0)/F_{\Sigma}(0)$ монотонно возрастает и в пределах главного лепестка диаграммы направленности не имеет максимума, т.е. не существует оптимального угла сме-

щения, обеспечивающего максимальную пеленгационную чувствительность.

Отношение сигнал-шум q пропорционально суммарной диаграмме $F_{\Sigma}(0)$, поэтому произведение

$$S_0 \cdot q = k_\theta F'_\Delta(0) \tag{82}$$

определяется только крутизной разностной диаграммы направленности на равносигнальном направлении. При подстановке (82) в выражение (79) следует, что точность пеленгования на равносигнальном направлении зависит от крутизны разностной диаграммы.



Рис. 20. Зависимость относительных значений диаграмм направленности от угла разноса: $1 - F_{\Sigma}(0), 2 - F'_{\Delta}(0)/F_{\Sigma}(0), 3 - F'_{\Delta}(0), 4 - F'_{\Delta}(0)F_{\Sigma}(0)$

Если в качестве критерия для определения оптимального угла смещения выбрать максимум крутизны разностной диаграммы, то можно получить минимальные погрешности пеленгования. Однако требование получения максимума крутизны разностной диаграммы не является целесообразным критерием, поскольку при таком угле смещения диаграммы направленности пересекаются на очень низком уровне и мощность принимаемого сигнала в суммарном канале будет много меньше, чем в направлении максимума, а это приведет к заметному снижению дальности обнаружения источника, которая определяется энергией принимаемого сигнала.

Следовательно, в качестве оптимального угла смещения целесообразно взять угол, соответствующий максимуму произведения суммарной диаграммы и крутизны разностной диаграммы, т.е. выбрать угол смещения как компромисс между проигрышем в дальности действия и точности пеленгования. Из кривых, приведенных на рис. 20, видно, что зависимость $F'_{\Delta}(0)F_{\Sigma}(0)$ имеет максимум при $\theta_0 = 0,65\theta_{0,5}$. При таком угле смещения две диаграммы направленности будут пересекаться ниже их максимумов на уровне, близком к 3 дБ, т.е. на уровне половинной мощности. Из этого следует, что оптимальный угол смещения равен примерно полуширине диаграммы направленности по уровню половинной мощности.

Оптимальное расстояние между фазовыми центрами антенн *l* в фазовой суммарно-разностной системе можно найти также из условия получения максимального произведения суммарной диаграммы и крутизны разностной диаграммы, т.е. из решения уравнения

$$\frac{d}{d\theta} \left(F_{\Delta}'(0) F_{\Sigma}(0) \right) = 0.$$
(83)

Очевидно, что раскрыв отдельной антенны системы с фазовым пеленгованием определяется равенством

$$l_p = 2(l_a - l), (84)$$

где l_a – заданные габаритные размеры всей антенной системы.

Амплитуда суммарного сигнала на входе приемника пропорциональна раскрыву антенны, следовательно, можно записать

$$F_{\Sigma}^{2}(0) = C(l_{p} - l), \qquad (85)$$

где С – коэффициент пропорциональности.

Разностная диаграмма определяется следующим выражением:

$$F_{\Delta}(\theta) = F_{\Delta}(0)tg(\Delta\phi/2). \tag{86}$$

При малых углах отклонения имеем разность фаз сигналов, принятых двумя диаграммами

$$\Delta \phi = 2\pi (l/\lambda) \theta \,. \tag{87}$$

Тогда крутизна разностной диаграммы на равносигнальном направлении определяется формулой

$$\frac{dF_{\Delta}(\theta)}{d\theta}\Big|_{\theta=0} = F_{\Delta}'(0) = 0,5F_{\Sigma}(0)\Delta\phi' = \pi(l/\lambda)F_{\Sigma}(0).$$
(88)

Следовательно, произведение суммарной диаграммы и крутизны разностной диаграммы будет

$$F'_{\Delta}(0)F_{\Sigma}(0) = F^{2}_{\Sigma}(0)\pi(l/\lambda) = C\pi(l/\lambda)(l_{p}-l).$$
(89)

Указанное произведение максимально, когда

$$\frac{d}{dl} \left[C\pi(l/\lambda) (l_p - l) \right] = 0, \qquad (90)$$

откуда оптимальное расстояние между фазовыми центрами (база)

$$l = l_p / 2. \tag{91}$$

Таким образом, оптимальное расстояние между фазовыми центрами равно половине длины раскрыва антенны.

Разрешающая способность пеленгатора

Под угловой разрешающей способностью понимается способность системы измерять угловые координаты близко расположенных источников сигналов, не селектируемых по другим параметрам (времени, частоте, поляризации и т.д.). Количественно она оценивается минимальным угловым расстоянием между источниками излучения, при котором еще возможно раздельное измерение угловых координат с требуемой точностью. В оптике и радиофизике, а также на практике широкое распространение при определении разрешающей способности систем получил критерий Рэлея.

Очень часто для анализа разрешающей способности пеленгатора пользуются разновидностью критерия Рэлея, основанной на оценке ширины автокорреляционной функции входных сигналов вида

$$\Psi(\Delta\theta) = \operatorname{Re}\left[\int_{0}^{T} \dot{E}(t,\theta) \dot{E}^{*}(t,\theta+\Delta\theta) dt\right],$$
(92)

где $\dot{E}(t,\theta)$ – входной сигнал первого источника, $\dot{E}(t,\theta + \Delta\theta)$ – входной сигнал второго источника, $\theta, \theta + \Delta\theta$ – угловые координаты источников, T – период наблюдения.

В процессе пеленгации парной цели на входе приемника будет по крайней мере два сигнала, разрешение которых зависит от относительной энергии сигналов и от степени их перекрытия по углу. Очевидно, чем меньше перекрытие сигналов на входе измерителя по разрешаемому параметру, тем больше возможность раздельного сопровождения каждой цели по данному параметру, тем выше будет разрешающая способность системы. Все это обусловливает возможность оценки угловой разрешающей способности по ширине автокорреляционной функции, поскольку эта функция определяет степень связи сигналов по интересующему параметру.

В случае экспоненциальной формы диаграммы направленности (21) выражение (92) будет определяться следующим соотношением

$$\Psi(\Delta\theta) = 2N \exp(-4\ln 2\Delta\theta^2/2), \qquad (93)$$

где *N* – энергия высокочастотного сигнала заданной формы.

Если за разрешение источников условно принять ширину автокорреляционной функции входных сигналов на уровне 0,5 относительно ее максимального значения, то минимальное угловое расстояние, которое можно взять за оценку разрешающей способности, будет определяться как

$$\delta\theta = \sqrt{2}\theta_{0,5}.\tag{94}$$

Ширину автокорреляционной функции сигналов разрешаемых целей, отсчитанную на уровне 0,5 от максимума, часто принимают за потенциальную разрешающую способность. Это условие привлекает своей простотой, хотя в большинстве случаев не дает точных решений.

Рассмотрим разрешающую способность на примере двух наиболее распространенных методов пеленгации без учета флуктуации принимаемых сигналов и шумов приемника применительно к одной плоскости.

В случае амплитудной суммарно-разностной системы пеленгации в одной плоскости сигналы от двух точечных источников (рис. 21) на входе двух приемных каналов могут быть представлены выражениями

$$\dot{E}_{1}(t) = E_{m1}F(\theta_{0} - \theta_{1})\exp(i\omega t) + E_{m2}F(\theta_{0} - \theta_{2})\exp(i(\omega t + \alpha)),$$

$$\dot{E}_{2}(t) = E_{m1}F(\theta_{0} + \theta_{1})\exp(i\omega t) + E_{m2}F(\theta_{0} + \theta_{2})\exp(i(\omega t + \alpha)),$$
(95)

где $\theta_{1,2}$ – угловые положения первого и второго источника сигналов относительно равносигнального направления, $E_{m1,2}$ – амплитуды сигналов от источников 1 и 2, а α – фазовый сдвиг, обусловленный разностью расстояний до объектов.



Рис. 21. Геометрия задачи разрешения двух источников

Тогда, предполагая идентичность по характеристикам приемных каналов, для сигналов на выходах после суммарной и разностной обработки с точностью до постоянного коэффициента получим

$$\begin{split} \dot{U}_{\Delta}(t,\theta) &= E_{m1} \left(F(\theta_0 - \theta_1) - F(\theta_0 + \theta_1) \right) \exp(i\omega t) + \\ &+ E_{m2} \left(F(\theta_0 - \theta_2) - F(\theta_0 + \theta_2) \right) \exp(i(\omega t + \alpha)), \\ \dot{U}_{\Sigma}(t,\theta) &= E_{m1} \left(F(\theta_0 - \theta_1) + F(\theta_0 + \theta_1) \right) \exp(i\omega t) + \\ &+ E_{m2} \left(F(\theta_0 - \theta_2) + F(\theta_0 + \theta_2) \right) \exp(i(\omega t + \alpha)). \end{split}$$
(96)

На выходе фазового детектора умножающего типа с учетом нормализации сигнала по амплитуде с помощью быстродействующей системы АРУ и его усреднения сигнал на выходе (пеленгационная характеристика) может быть определен выражением

$$g(\theta) = \frac{\operatorname{Re}(\dot{U}_{\Sigma}(t,\theta)\dot{U}_{\Delta}^{*}(t,\theta))}{\dot{U}_{\Sigma}(t,\theta)\dot{U}_{\Sigma}^{*}(t,\theta)}.$$
(97)

Подставляя в эту формулу выражения (96), после преобразования получаем

$$g(\theta) = \frac{E_{m1}^2 W_1 + 2E_{m1} E_{m2} W_2 - 2E_{m1} E_{m2} W_3 + E_{m2}^2 W_4}{E_{m1}^2 W_5 + 2E_{m1} E_{m2} W_6 + E_{m2}^2 W_7},$$
(98)

где

$$\begin{split} &W_{1} = F^{2}(\theta_{0} - \theta_{1}) - F^{2}(\theta_{0} + \theta_{1}), \ W_{2} = F(\theta_{0} - \theta_{1})F(\theta_{0} - \theta_{2})Cos\alpha, \\ &W_{3} = F(\theta_{0} + \theta_{1})F(\theta_{0} + \theta_{2})Cos\alpha, \ W_{4} = F^{2}(\theta_{0} - \theta_{2}) - F^{2}(\theta_{0} + \theta_{2}), \\ &W_{5} = (F(\theta_{0} - \theta_{1}) + F(\theta_{0} + \theta_{1}))^{2}, \ W_{7} = (F(\theta_{0} - \theta_{1}) + F(\theta_{0} + \theta_{1}))^{2}, \\ &W_{6} = (F(\theta_{0} - \theta_{1}) + F(\theta_{0} + \theta_{1}))(F(\theta_{0} - \theta_{2}) + F(\theta_{0} + \theta_{2}))Cos\alpha. \end{split}$$

В реальных условиях фазовый сдвиг α меняется сравнительно быстро во времени даже тогда, когда взаимные перемещения источников малы, и система АРУ по отношению к этим изменениям достаточно инерционна. Вследствие этого фильтр нижних частот на выходе фазового детектора и в цепи АРУ отфильтровывает все составляющие сигнала, образованные членами выражения (98), содержащими *Cos* α . Это позволяет представить пеленгационную характеристику при наличии в луче двух источников в упрощенном виде:

$$g(\theta) = \frac{\left(F^{2}(\theta_{0} - \theta_{1}) - F^{2}(\theta_{0} + \theta_{1})\right) + e^{2}\left(F^{2}(\theta_{0} - \theta_{2}) - F^{2}(\theta_{0} + \theta_{2})\right)}{\left(F(\theta_{0} - \theta_{1}) + F(\theta_{0} + \theta_{1})\right)^{2} + e^{2}\left(F(\theta_{0} - \theta_{2}) - F(\theta_{0} + \theta_{2})\right)^{2}}, (99)$$

где $e = E_{m2}/E_{m1}$.

Приравнивая числитель к нулю, можно найти условие пеленгования двух точечных источников. Нетрудно заметить, что в этом случае система будет отслеживать энергетический центр источников, и равносигнальное направление будет ближе к направлению на тот, мощность которого больше.

Наибольший интерес представляет случай, когда один из источников, например первый, расположен под малым углом $\theta_1 = \Delta \theta$ к равносигнальному направлению, что соответствует условию разрешения целей. При этом

$$F(\theta_0 \pm \theta_1) \approx F(\theta_0) (1 \mp S_1 \Delta \theta), \tag{100}$$

где S₁ – пеленгационная чувствительность, соответствующая линейной части пеленгационной характеристики при пеленговании одиночного источника

$$S_1 = \frac{1}{F(\theta_0)} \frac{dF(\theta_0 \pm \theta_1)}{d\theta_1} \bigg|_{\theta_1 = 0}.$$
 (101)

Подставляя (100) в (99), после элементарных преобразований получаем

$$g(\theta) = \frac{S_1 \Delta \theta + e^2 \left(F^2(\theta_0 - \theta_2) - F^2(\theta_0 + \theta_2) \right) / \left(4F^2(\theta_0) \right)}{1 + e^2 \left(F(\theta_0 - \theta_2) + F(\theta_0 + \theta_2) \right)^2 / \left(4F^2(\theta_0) \right)}.$$
 (102)

Поскольку разрешение источников обычно наступает при угловых расстояниях, превышающих ширину диаграмм направленности, а угловые погрешности пеленгования разрешенного источника в нормальных условиях не превышают десятой доли ширины диаграммы направленности, можно принять $\theta_2 >> \Delta \theta$ и функцию $F(\theta_0 \pm \theta_2)$ в первом приближении считать не зависящей от $\Delta \theta$. Тогда значение пеленгационной чувствительности в рабочей точке может быть представлено следующим выражением:

$$S_f = \frac{d(g(\theta))}{d\Delta\theta}\Big|_{\Delta\theta=0} = S_1 / \left[1 + \left(e\left(F(\theta_0 - \theta_2) + F(\theta_0 + \theta_2)\right)/2F(\theta_0)\right)^2\right],$$
(103)

откуда следует

$$\frac{S_1 - S_f}{S_f} = e^2 \left(\left(F(\theta_0 - \theta_2) + F(\theta_0 + \theta_2) \right) / 2F(\theta_0) \right)^2.$$
(104)

Полученная формула позволяет оценить изменение пеленгационной чувствительности за счет влияния мешающего источника, расположенного под углом θ_2 к пеленгуемому объекту.

Приравнивая $g(\theta)$ к нулю, можем найти погрешность пеленгования

$$S_1 \Delta \theta + e^2 \left(F^2(\theta_0 - \theta_2) - F^2(\theta_0 + \theta_2) \right) / \left(4F^2(\theta_0) \right) = 0,$$

откуда

$$\Delta \theta = -\frac{e^2}{S_1} \frac{\left(F^2(\theta_0 - \theta_2) - F^2(\theta_0 + \theta_2)\right)}{4F^2(\theta_0)}.$$
 (105)

Выражения (104) и (105) показывают, что влияние второго источника сказывается в изменении пеленгационной чувствительности и появлении погрешности пеленгования выбранного источника. Пользуясь этими выражениями, можно определить условия разрешения объектов.

На рис. 22 представлены нормированные значения погрешности пеленга $\delta \theta_a = \Delta \theta / \left(e^2 / (0.5 k l_p) \right)$ и пеленгационной чувствительности $\delta S_a = \left(S_1 - S_f \right) / \left(S_f e^2 \right)$, рассчитанные по формулам (104) и (105) при аппроксимации диаграммы направленности функцией [1]

$$F(\theta) = \frac{1}{2} \frac{Sin(kl_p \theta/2)}{kl_p \theta/2},$$

где l_p – диаметр параболоида антенны. Угол наклона лучей θ_0 при этом определялся из уравнения

$$kl_p \, \Theta_0/2 = \pi/2$$
 .

При принятой аппроксимации ширина диаграммы направленности по уровню 3 дБ равна $\theta_{0,5} = \lambda/l_p$ и $\theta_0 = \theta_{0,5}/2$. На рис. 22 кривые представлены в зависимости от значения безразмерного смещения второго источника $x_2 = kl_p \theta_2/2$.

Из рис. 22 следует, что при увеличении угла θ_2 нормированная пеленгационная чувствительность падает и достигает нуля при $x_2 = 3\pi/2$, что соответствует $\theta_2 = 1,5\theta_{0,5}$. При $x_2 = \pi/2$ ($\theta_2 = \theta_0$) погрешность пеленгования максимальна и при e = 1 достигает значения $\Delta \theta = 0,6\theta_0$, что соответствует погрешности, равной примерно полуширине угла между источниками сигналов. Дальнейшее увеличение θ_2 приводит к уменьшению погрешности пеленгования до нуля при $\theta_2 = 1,5\theta_{0,5}$. Отсюда следует, что полное разрешение источников в рассматриваемом случае наступает при угловом расстоянии, равном примерно $1,5\theta_{0,5}$. Это близко к условию разрешения с учетом ширины корреляционной функции.



Рис. 22. Характеристики амплитудной системы

Естественно, если выбрать менее жесткий критерий разрешения, то требования к разнесению источников для их разрешения соответственно снизятся.

Рассмотрим фазовую суммарно-разностную систему пеленгации в одной плоскости. Анализ, выполненный в соответствии с изложенной выше методикой, показал, что в фазовой суммарноразностной системе при наличии мешающего источника также возникают изменения пеленгационной чувствительности системы и угловые погрешности, значения которых можно рассчитать соответственно по формулам [1]:

$$\delta\theta_p = \frac{\Delta\theta}{e^2/(kl)} = \frac{F^2(\theta_2)}{F^2(0)} Sin(klSin\theta_2), \qquad (106)$$

$$\delta S_{p} = \frac{S_{1} - S_{f}}{S_{f} e^{2}} = \frac{F^{2}(\theta_{2})}{F^{2}(0)} Cos^{2} (klSin\theta_{2}).$$
(107)

На рис. 23 приведены нормированные зависимости пеленгационной чувствительности и значения угловых погрешностей фазовой суммарно-разностной системы, рассчитанные по формулам (106), (107) при аппроксимации диаграммы направленности функцией

$$F(\theta) = \frac{1}{2} \frac{Sin(kl \, \theta/2)}{kl \, \theta/2}.$$

Для простоты размеры антенн амплитудного и фазового типа принимались одинаковыми и равными $l_p = 2l$. Сравнение расчетных данных, представленных на рис. 22 и 23, показывает, что система амплитудного типа несколько более чувствительна к наличию мешающего сигнала соседней цели, находящейся внутри главного лепестка суммарной диаграммы направленности, чем фазовая. Если мешающая цель находится за пределами главного лепестка суммарной диаграммы направленности, то более чувствительной к мешающим объектам оказывается система фазового типа.



Рис. 23. Характеристики фазовой системы

Описание лабораторной установки для экспериментальных исследований

Блок-схема лабораторной установки по исследованию методов определения угловых координат целей представлена на рис. 24.



Рис. 24. Структура экспериментальной установки

Установка позволяет исследовать амплитудные и фазовые методы пеленгации. В качестве источника (цели), у которого определяются угловые координаты, в данной установке является рупорная антенна – 1, подсоединенная через аттенюатор – 2 к генератору СВЧ излучения – 3. Прием излучения осуществляется антенной системой – 4. Далее высокочастотный сигнал детектируется высокочастотным детектором – 5 и контролируется вольтметром 6.

При исследовании метода максимума в качестве приемной антенной системы используется открытый конец волновода, присоединенный к детекторной секции. Метод сравнения анализируется при использовании двух открытых концов волновода, закрепленных на специальном кронштейне и нагруженных на детекторные секции. Для реализации фазового метода открытые концы волновода укрепляются посредством Г-образных отрезков волновода на входах волноводного линейного Т-моста, на выходах плеч Е и Н которого располагаются детекторные секции.

Антенная система вместе с детекторными секциями устанавливается на поворотном устройстве, позволяющем фиксировать угловые положения ее оси. Для построения пеленгационных характеристик при анализе метода сравнения используется устройство попеременного подключения выходов антенны к входу вольтметра. Один из каналов этого устройства имеет плавно регулируемый делитель напряжения, что позволяет выровнять сигналы с двух антенн и использовать один вольтметр.

Содержание исследований

1. Экспериментально исследовать угловое распределение уровня сигнала на выходе установки, используя следующие методы:

– метод максимума;

- метод сравнения;

- амплитудный метод с разностной обработкой;

– амплитудный метод с суммарно-разностной обработкой;

- фазовый метод с разностной обработкой;

– фазовый метод с суммарно-разностной обработкой.

2. На основании полученных результатов определить угловое положение источника излучения для каждого метода.

3. Провести сравнительный анализ полученных экспериментальных результатов.

4. Выполнить оценку пеленгационной чувствительности и сравнение точности пеленгации исследуемых методов.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение пеленгационной характеристики и пеленгационной чувствительности.

2. В каких единицах определяются пеленгационная характеристика и пеленгационная чувствительность?

3. Приведите основные амплитудные методы измерения углового положения источника радиоизлучения и их недостатки.

4. Приведите основные фазовые методы измерения углового положения источника радиоизлучения и их недостатки.

5. Выполните сравнение амплитудных и фазовых методов пеленгации.

6. Приведите структуру измерителя углового положения источника радиоизлучения.

7. Дайте качественный анализ влияний флуктуаций принимаемых сигналов на точность определения углового положения источника радиоизлучения.

8. Проведите сравнительный анализ экспериментальных значений углового положения источника, полученных разными методами.

Литература

1. Леонов, А.Н. Моноимпульсная радиолокация / А.Н. Леонов, К.И. Фомичев. – М.: Радио и связь, 1984.

2. Методы измерений характеристик антенн СВЧ / под ред. Н.М. Цейтлина. – М.: Радио и связь, 1985.

3. Финкельштейн, М.И. Основы радиолокации / М.И. Финкельштейн. – М.: Сов. радио. 1983.

4. Сазонов, Д.М. Антенны и устройства СВЧ / Д.М. Сазонов. – М.: Высш. школа, 1988.

Содержание

Введение 3	3
Основы радиопеленгации 4	ŀ
Характеристики антенных систем 7	7
Основные методы радиопеленгации1()
Структурные схемы радиопеленгаторов	3
Пеленгационные характеристики при коническом сканировании	1
Выбор углового и пространственного разноса антенн)
Разрешающая способность пеленгатора 43	3
Описание лабораторной установки для экспериментальных исследований	l
Содержание исследований 53	3
Контрольные вопросы54	ŀ
Литература	ł

Учебное издание

Тимофеев Владимир Авенирович

Амплитудные и фазовые методы определения углового положения источника электромагнитных волн

Методические указания по выполнению лабораторной работы

Редактор, корректор А.А. Аладьева Компьютерная верстка Е.Л. Шелеховой

Подписано в печать 31.10.2006 г. Формат 60х84/16. Бумага тип. Усл. печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ

> Оригинал-макет подготовлен в редакционно-издательском отделе ЯрГУ.

Отпечатано на ризографе. Ярославский государственный университет. 150000 Ярославль, ул. Советская, 14.

В.А. Тимофеев

Амплитудные и фазовые методы определения углового положения источника электромагнитных волн