

ПРОБЛЕМЫ УСТРАНЕНИЯ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

А. С. Грибанов, И. Ю. Анненкова

Федеральное государственное унитарное предприятие «Московский научно-исследовательский радиотехнический институт» (ФГУП «МНИРТИ»)

Получена 10 ноября 2009 г.

Представлены результаты исследований методов уменьшения многозначности измерения местоположения источника излучения. Рассмотрены два метода, использующих различные характеристики сигнала источника излучения. В качестве основного объекта исследований одного из методов взяты поляризационные характеристики, второго – структура сигнала. Получены количественные характеристики погрешности измерения местоположения источника излучения в зависимости от дальности до него. Рассмотрены особенности измерения местоположения источника излучения каждого из методов измерения.

Ключевые слова: поляризационные характеристики радиоизлучения, пеленгация источников излучения.

Введение

Для определения местоположения источника излучения на плоскости достаточно двух интерферометров. По разности фаз сигнала источника излучения, принятого разнесенными по базе приемниками, определяется направление на источник относительно каждой базы. Этот метод обладает высокой точностью, когда измерительная база существенно больше длины волны радиоизлучения, но при этом измерение направления на источник радиоизлучения получается многозначным.

Как правило, для разрешения многозначности требуется дополнительное независимое измерение направления, пусть и меньшей точности. Известно, что сигнал помимо пространственно-временных имеет еще и поляризационные характеристики [1]. Точность поляризационного метода существенно ниже фазового, но этот метод позволяет ограничить зону возможного положения источник радиоизлучения и в сочетании с фазовым методом в пределах зоны получить точное однозначное измерение.

Измерению поляризационных характеристик принимаемого излучения в последние годы посвящены фундаментальные исследования [2,3]. Однако поляризационные характеристики сигнала для задач пеленгации практически не используются. Есть лишь отдельные публикации, например, способ измерения углового положения источника излучения по поляризационной структуре поля, создаваемого этим источником [4,5]. Здесь неоднородная среда, помещаемая на пути между источником излучения и приемной антенной, меняет положение волнового вектора в поляризационной структуре поля волны в зависимости от направления распространения электромагнитной волны. В качестве среды, изменяющей компоненты поляризационного базиса, используется

магнитоактивная плазма [4] или металлические решетки [5].

Для устранения многозначности при определении направления фазовым методом также применяют многошкальные измерения направления [6]. Такая задача решается для сигналов с определенной структурой [7]. Сигнал пеленгуемого радиоизлучателя должен быть многочастотным, и частоты не должны быть кратными. Этим условиям удовлетворяют сигналы с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ-сигналы), которые в настоящее время широко применяются.

В условиях информационных войн среди проблем противодействия средствам обнаружения защищаемого объекта стала актуальной проблема противодействия средствам передачи информации [8]. В последние годы связные станции осваивают все более высокие частоты, и на частотах выше 100 МГц эффективность подавления начинает зависеть от знания направления на подавляемый источник. Таким образом, однозначное определение местоположения источника подавляемого излучения становится актуальным.

В настоящей работе представлены результаты исследований методов устранения неоднозначности.

1. Общие уравнения для исследований поляризационного метода

Рассматривается метод измерения местоположения источника излучения по поляризационным признакам в однородной среде, не изменяющей направление вектора электромагнитного поля на пути распространения электромагнитных волн. Напряженность поля в приемной антенне с линейной поляризацией определяется проекцией вектора напряженности в точке С на направление вектора напряженности излучающей антенны.

Измеряя угол γ , определяем расстояние между точками А и С или удаление излучающей антенны от приемной в соответствии с выражением (1):

$$AC = \gamma \cdot R \quad (1)$$

где R – радиус Земли.

Напряженность наведенного в приемной антенне поля максимальна, если передающая и приемная антенны параллельны. Изменяя положение приемной антенны, фиксируем положение антенны (угол γ), соответствующее этому максимуму.

Разложим вектор принятой линейно поляризованной волны в базисе приемной антенны и по проекциям на оси (**рис. 1**) c_x и c_y определим координаты источника излучения.

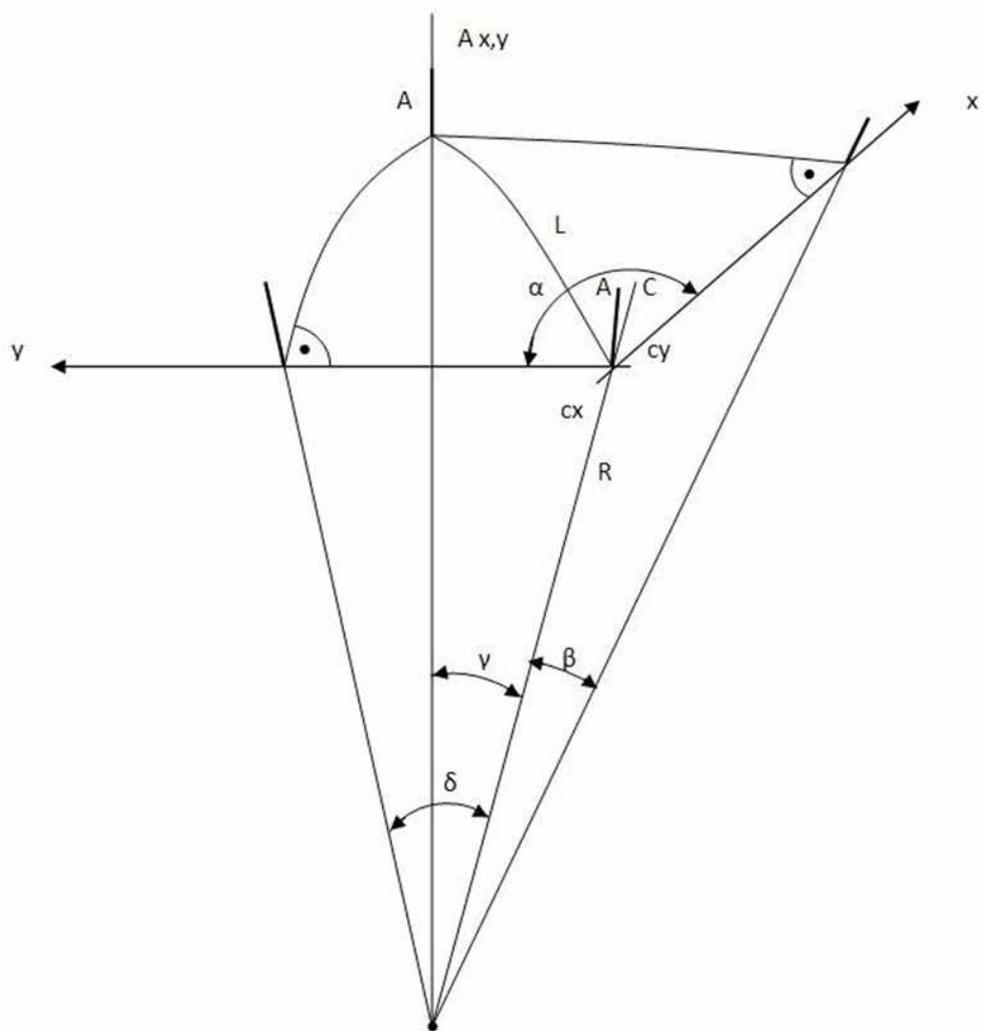


Рис. 1. Геометрическая иллюстрация измерения угла γ .

На **рис. 2** показана геометрическая модель нахождения координат источника излучения.

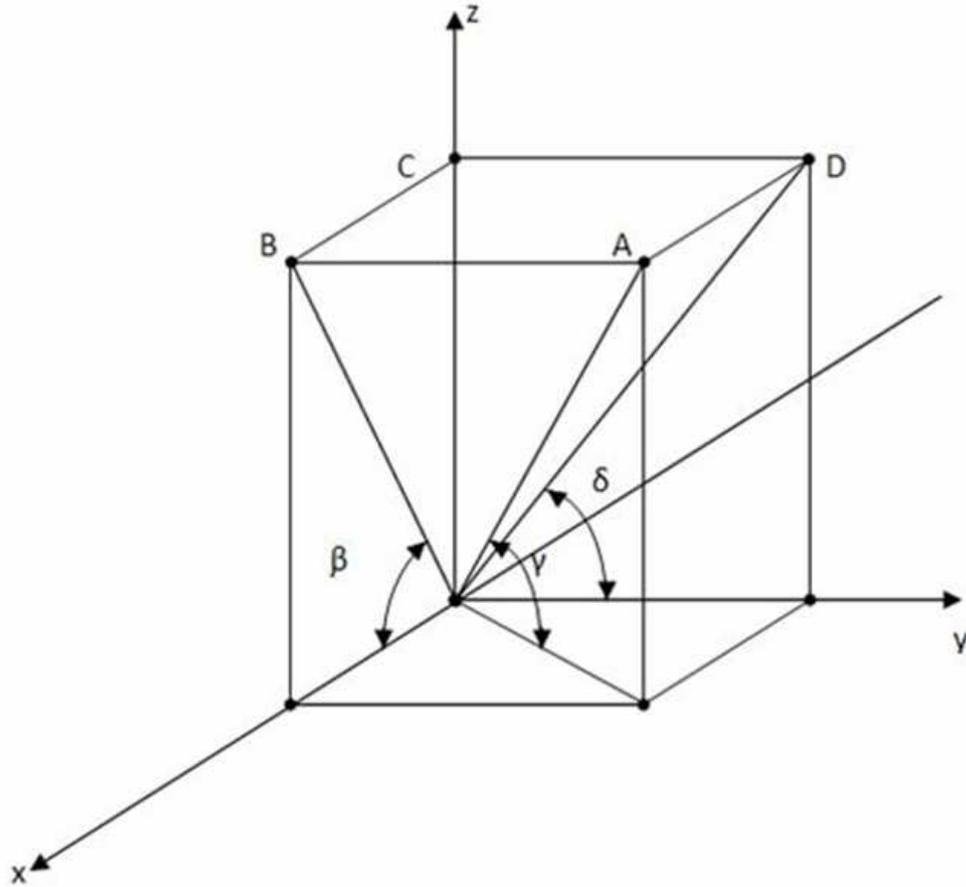


Рис. 2. Вычисление координат источника излучения.

Кроме проекций вектора на оси OX, OY, OZ рассмотрим проекции вектора на плоскости ZOY, ZOY, XOY. Угол в плоскости ZOY обозначим β , угол в плоскости ZOY обозначим δ .

На расстоянии $CB = \beta R$ по оси OX получим точку B, перпендикуляр из которой (относительно оси OX) определяет направление на источник излучения (точка A).

На расстоянии $CD = \delta R$ по оси OY получим точку D, перпендикуляр из которой (относительно оси OY) определяет направление на источник излучения (точка A).

Координаты источника излучения $A(x,y)$ определяют центр окружности (в плоскости ZOY), на которой расположены точки B, C, D. Обозначим как направления оси, соединяющие точки CB и CD. Тогда угол между направлениями CB и CD обозначим как угол α . Координаты точки излучения (т. A) относительно осей CB и CD представляются выражениями (2) и (3):

$$x = x_1 + \beta \cdot R \quad (2)$$

$$y = y_1 + \left(\frac{\operatorname{tg}(\delta)}{\sin(\alpha)} - \operatorname{tg}(\beta) \cdot \operatorname{ctg}(\alpha) \right) \cdot R \quad (3)$$

где x_1 и y_1 – координаты точки C.

2. Расчёт и анализ погрешности измерения

Если погрешности измерения угла наклона вектора поляризации определяются нормальными случайными величинами [9], то максимально правдоподобную оценку координат (x, y) можно определить по методике [10].

Принимаем погрешности измерения угла поворота вектора поляризации σ_β и $\sigma_\delta = 1^\circ$. Погрешности измерения координат зависят как от дальности до приемника R, так и от угла α базовых линий (рис. 3, 4, 5).

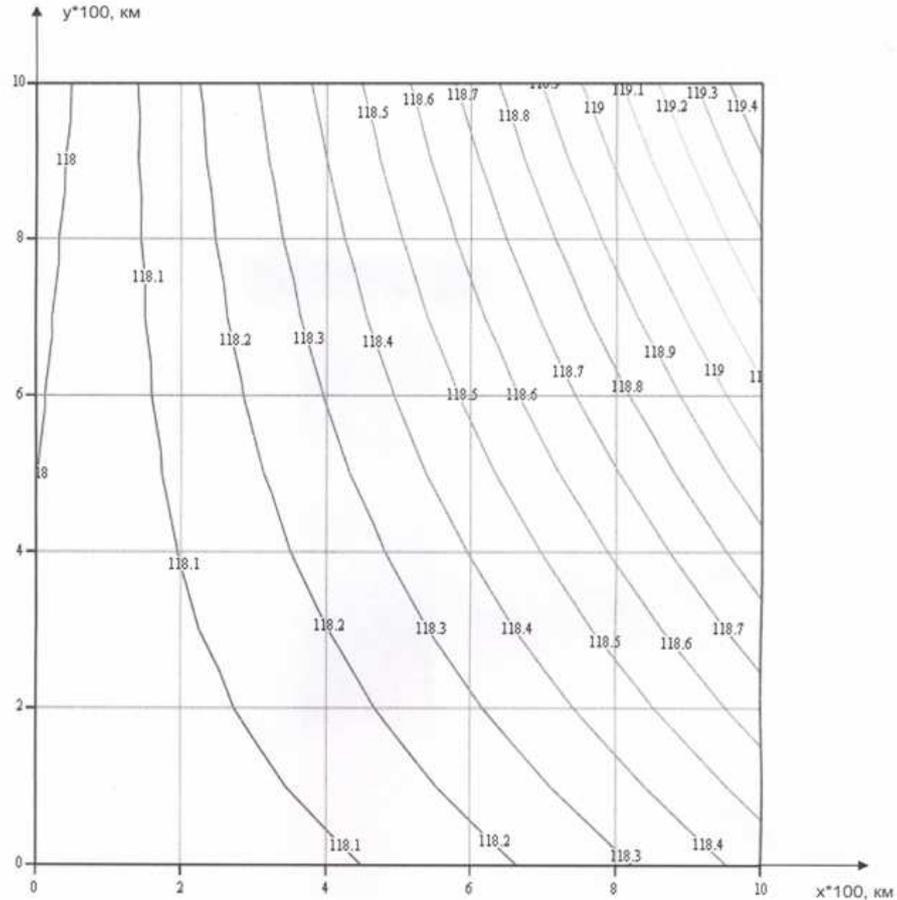


Рис. 3. Распределение ошибок в азимутальной области ($\alpha = 100^\circ$).

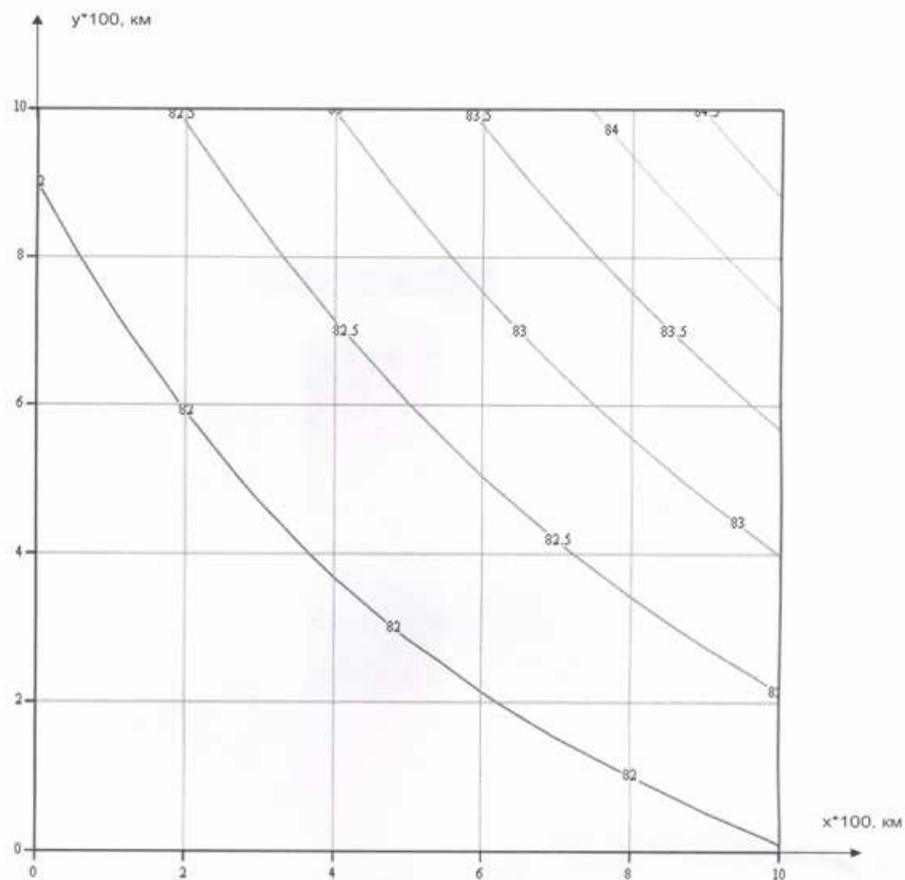


Рис. 4. Распределение ошибок в азимутальной области ($\alpha = 120^\circ$).

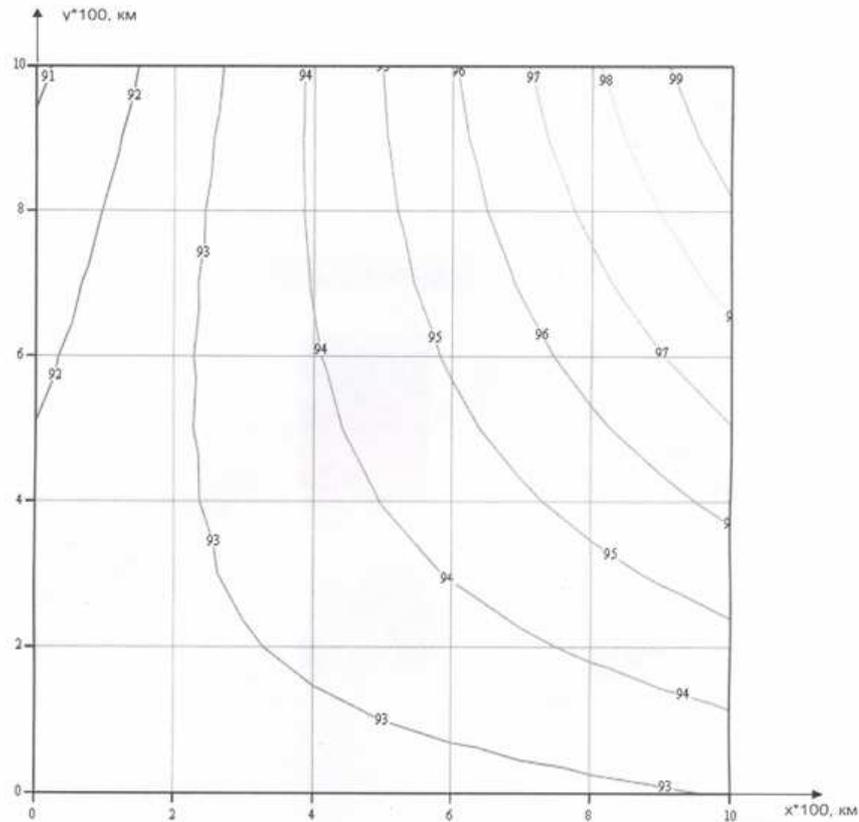


Рис. 5. Распределение ошибок в азимутальной области ($\alpha = 130^\circ$).

На рис. 4 приведены зависимости $\sigma_{\text{ош}}$ местоположения источника излучения, измеренной по проекциям угла поляризации на две базовые линии, расположенные под углом $\alpha = 120^\circ$, при расположении приемной антенны на расстоянии R от источника излучения. Как видно из графика, погрешность измерения $\sigma_{\text{ош}}$ незначительно меняется при изменении R и лежит в пределах 82..120 км. Характер погрешности существенно зависит от угла α . Наименьшая погрешность получается в том случае, когда угол равен 120° .

3. Общие уравнения для исследований структурного метода

Другая возможность разрешения неоднозначности определяется структурой пеленгуемого сигнала. Известно, что для защиты передаваемой информации применяются сложные сигналы, в частности, сигналы с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ).

Последовательность действий для определения истинного направления на источник многочастотного сигнала представляется следующим образом. Измеряем разность фаз принимаемого сигнала двумя, разнесенными в пространстве приемниками для каждой частотной составляющей ППРЧ сигнала. Расстояние b между приемниками существенно больше длины волны всех частотных составляющих ППРЧ сигнала.

Каждому значению $\Delta\varphi_i$ соответствует несколько значений пеленга (вследствие периодичности дискриминационной характеристики пеленгатора), одно из которых

истинное, а остальные – ложные. Истинное значение априори неизвестно. Для того чтобы выделить истинное значение из всех измеренных, проводим расчет разности фаз для нескольких частотных позиций.

Разность времени прихода плоской электромагнитной волны на антенны, линия расположения которых находится под углом α к нормали относительно фронта волны, переводится в разность фаз для каждой частотной позиции представляется следующим выражением (4):

$$\Delta\varphi_i = \left(\frac{2\pi ct + \pi b \sin \alpha}{\lambda_i} \right) - \left(\frac{2\pi ct}{\lambda_i} \right) \quad (4)$$

где i - номер частотной позиции ППРЧ сигнала, t - время, λ_i - длина волны, соответствующая частотной позиции, b - длина базы, c - скорость распространения радиоволн.

Вычисление $\Delta\varphi$ относительно угла пеленга дает K -значений ($K=2b/\lambda_i$ – отношение длины базы b к длине полупериода волны с наименьшей λ_i), поэтому для каждой частотной позиции i ППРЧ сигнала получим одномерный массив (строку) возможных значений (5):

$$\alpha_{i,k} = \arcsin\left(\frac{\Delta\varphi_i + k\pi}{\pi} \cdot \frac{\lambda_i}{2b} \right) \quad (5)$$

где $k = 0 \dots K$. Однозначное определение направления возможно, когда разность фаз не превышает значения полупериода длины волны [11]. Измерение $\alpha_{i,k}$ проводим для всех K полупериодов, в одном и полупериодов значение $\alpha_{i,k}$ будет истинным.

4. Расчёт и анализ погрешности измерения

В каждой из полученных ранее строк (каждая строка соответствует конкретной частотной позиции) будут содержаться различные несовпадающие значения пеленга, но одно из значений в каждой из строк будет повторяться, это и будет истинным значением пеленга. Следовательно, для того чтобы получить истинное значение необходимо определить какое из значений $\alpha_{i,k}$ повторяется наибольшее количество раз.

Определяем истинное значение пеленга следующим образом: все одномерные массивы для каждой позиции i объединяем в одну строку значений α_n . Затем выделяем минимальное и максимальное значение в α_n , для чего упорядочиваем получившийся массив по возрастанию. Разбиваем шкалу пеленгов на интервалы, определяемые заданной погрешностью измерения угла. Угловым интервалом, в который попадает максимальное число значений, дает оценку истинного пеленга.

Истинное значение пеленга, таким образом, определяется максимальной частотой попадания в интервал возможных значений пеленга, т.е. сопоставляется весь набор возможных значений и выбирается как истинное - направление, инвариантное относительно несущей частоты.

Для исследования возможностей метода берем равномерное распределение частот (200 частотных позиций) источника радиоизлучения с ППРЧ в рабочем диапазоне

0.8 – 1.2 ГГц. Каждая частотная позиция выбирается случайным образом. На **рис. 6, 7, 8** представлены гистограммы возможных значений направлений на источник излучения для различных точностей измерений разностной фазы для угла 30° .

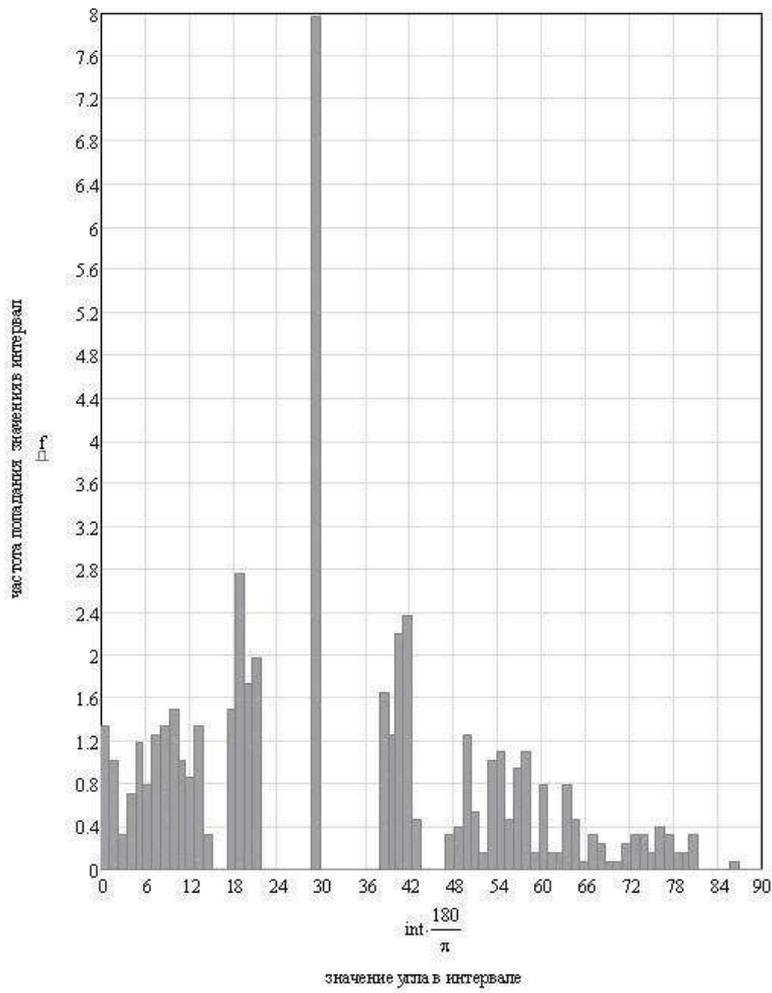


Рис. 6. Гистограмма значений пеленга на источник радиоизлучения при $\sigma_\varphi = 1^\circ$.

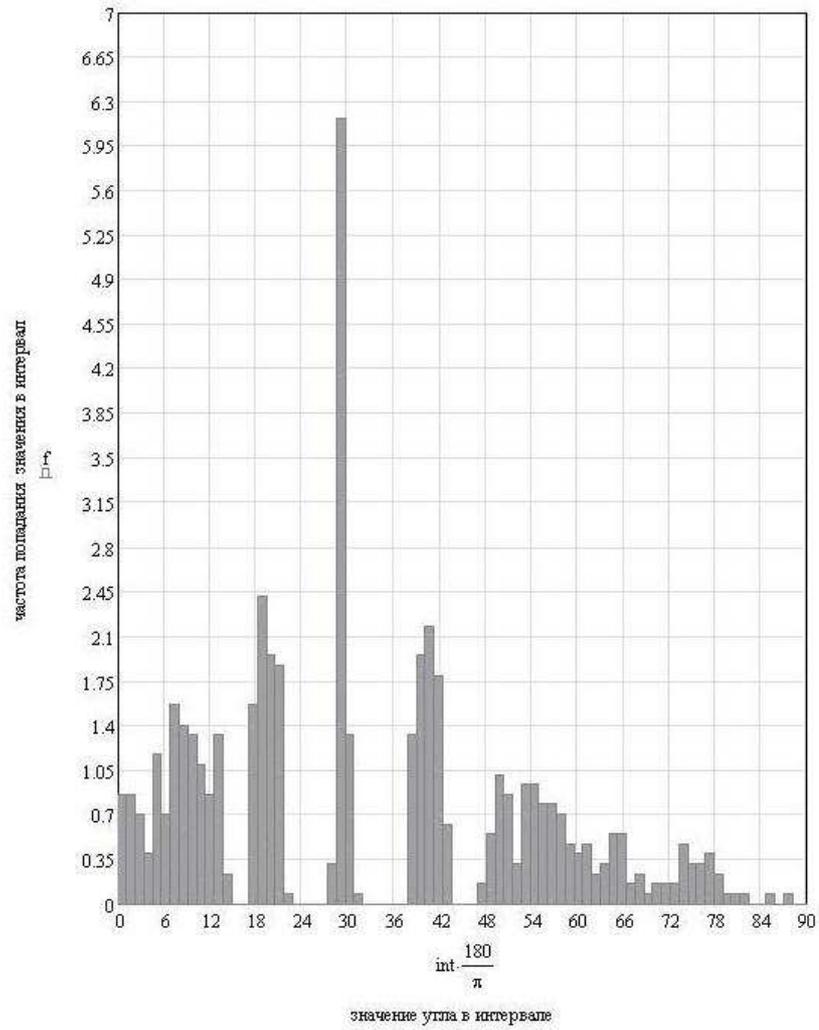


Рис. 7. Гистограмма значений пеленга на источник радиоизлучения при $\sigma_\varphi = 10^\circ$.

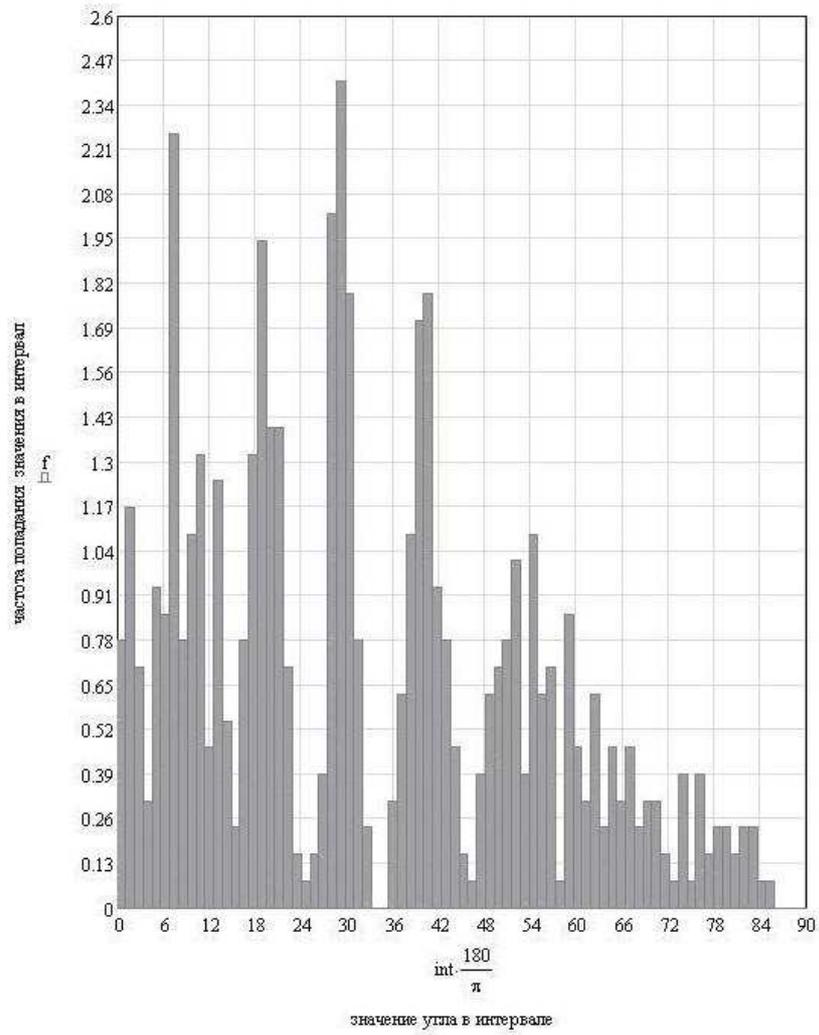


Рис. 8. Гистограмма значений пеленга на источник радиоизлучения при $\sigma_\varphi = 30^\circ$.

На **рис. 9** приведен график значений пеленга на источник ППРЧ сигнала в зависимости от погрешности измерения разности фаз сигнала двумя приемниками: $\sigma_\varphi = 1^\circ, 10^\circ, 30^\circ$.

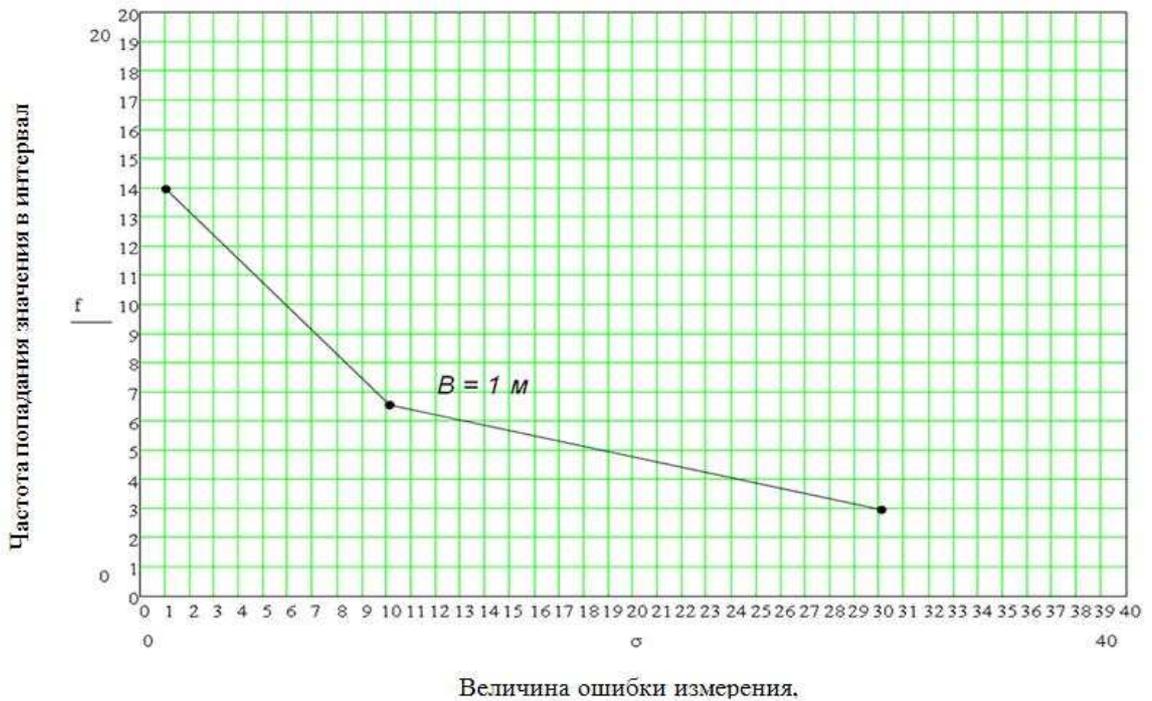


Рис. 9. Зависимость частоты попадания значения в интервал от погрешности измерения разности фаз при базе 1 м.

Как видно из рисунков, истинный пеленг устойчиво определяется даже при очень существенных погрешностях измерения разности фаз.

При определении пеленга на источник ППРЧ сигнала получаем однозначные измерения в одной из полусфер (в секторе углов от $-\frac{\pi}{2}$ до $\frac{\pi}{2}$) при использовании двух антенн любого типа, разнесенных на расстояния, существенно превышающие длину волны ($b = 1$ м). Определение истинного значения пеленга осуществимо в широком диапазоне погрешности измерения разности фаз: $\sigma_\varphi = 1^\circ, \dots, 10^\circ, \dots, 30^\circ$.

На **рис. 10** приведен график значений пеленга на источник ППРЧ сигнала при разных базах при погрешности измерения разности фаз сигнала двумя приемниками: $\sigma_\varphi = 10^\circ$.

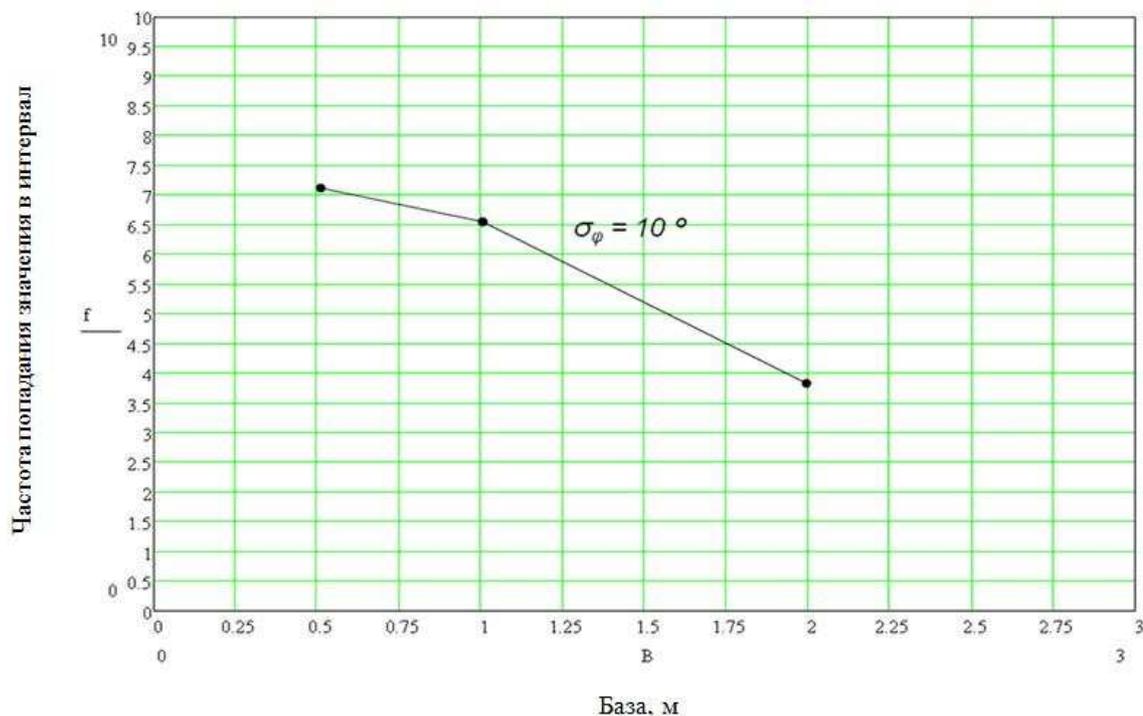


Рис. 10. Зависимость частоты попадания значения в интервал для разных значений базы при погрешности измерений 10° .

Анализ гистограмм показывает, что при малой базе растет ошибка, а при большой – число ложных пеленгов, что согласуется с теорией. Отсюда можно сделать вывод, что при малых базах достаточно работать с грубым измерителем.

5. Заключение

Выполненные исследования предложенных методов показали, что информацию о поляризационных или структурных характеристиках сигнала источника излучения можно использовать для уменьшения многозначности измерения местоположения этого источника излучения. Разработанные методы позволили получить следующие результаты.

1. Погрешность оценки местоположения источника излучения по поляризационной структуре линейно-поляризованного поля составляет 81...85 км на дальности до 2000 км от точки приема при погрешности измерения угла поворота вектора поляризации σ_β и $\sigma_\delta = 1^\circ$.
2. Для определения направления на его источник ППРЧ сигнала достаточно однобазовой разностно-фазовой системы пеленгования. На базе 1 м (при среднем значении длины волны выбранного диапазона ППРЧ сигнала $\lambda = 0.3$ м) погрешность измерения направления составляет 0.5° , 1° , 2° при погрешности измерения фазы $\sigma_\varphi = 1^\circ$, 10° , 30° , соответственно. При уменьшении базы (до 0.5 м) увеличивается погрешность до 2° при $\sigma_\varphi = 10^\circ$, а на базе 2 м погрешность измерения направления составляет 0.5° .

Литература

1. Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А. Поляризация радиолокационных сигналов. – М.: Сов.радио, 1966.- 440с.: ил.
2. Козлов А.И., Логвинов А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Кн.1. Поляризационная структура радиолокационных сигналов. – М.: Радиотехника, 2005.- 704с.: ил.
3. Козлов А.И., Логвинов А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Кн.2. Радиолокационная поляриметрия. – М.: Радиотехника, 2007.- 640с.: ил.
4. Лукин А.Н., Швырев Б.А. Измерение углового положения источника излучения по поляризационной структуре поля. //Радиотехника, 1998, №6, с.105-110.
5. Лукин А.Н., Швырев Б.А. , Чаплыгин Д.Ю. Оценка углового положения источника излучения по поляризационной структуре поля. //Радиотехника, 2002, №11, с.75-78.
6. Кинкулькин И.Е., Рубцов В.Д., Фабрик М.А. Фазовый метод определения координат. – М.: Сов. радио, 1979.
7. В. Б. Пестряков, Фазовые радиотехнические системы, – М.: Сов. радио. 1968.
8. Информационный конфликт в спектре электромагнитных волн. //Радиотехника, 2000, №6, с.35-68.
9. Поздняк С.И., Мелитицкий В.А. Введение в статистическую теорию поляризации радиоволн. М.: «Сов. радио», 1974, 480с.
10. Torrieri Don J. Statistical Theory of Passive Location system. IEEE Trans, 1982, v.AES-18, N 2, p.p.183-197.
11. Сайбель А.Г. Основы радиолокации. – М.: Сов. радио. 1961.