УДК 537.876.2

В.П. Денисов, Н.А. Колядин

Исследование антенной системы фазового пеленгатора на наземных трассах

В данной работе представлены результаты экспериментальной оценки точности двухбазового фазового пеленгатора с антенной системой из слабонаправленных рупоров на наземных трассах распространения радиоволн. Рассмотрены вопросы устранения неоднозначности пеленга.

Ключевые слова: фазовый радиопеленгатор, антенная система, погрешность, эксперимент, наземная трасса.

Целью данной публикации является исследование погрешностей двухбазового фазового пеленгатора сантиметрового диапазона, вызванных условиями распространения радиоволн на наземных трассах. Известно, что влияние трассы распространения на точность работы фазовых пеленгаторов существенно зависит от количества, направленности и пространственного разноса антенн, образующих фазометрические базы. Это обстоятельство отображено в названии статьи.

Известно также, что фазовым пеленгаторам свойственна неоднозначность измерений, вероятность устранения которой зависит от структуры антенной системы. По этому поводу имеется большое количество теоретических работ, обзор которых можно найти, например, в монографии [1]. Однако практически нет экспериментальных данных, полученных на реальных трассах распространения радиоволн. Статья отчасти восполняет этот пробел.

Отличие работы от более ранних исследований заключается в том, что применяемая аппаратура позволяла регистрировать изменение разности фаз принимаемых сигналов на разнесенных антеннах в течение длительности импульса с малым временем дискретизации, что стало возможным при сегодняшнем уровне развития техники. Таким образом, имелась возможность оценивать точность пеленгования в различных временных сечениях принимаемых импульсных сигналов.

Измерения проводились в ноябре 2007 года в окрестностях г. Томска.

Источником излучения служила радиолокационная станция (РЛС) трехсантиметрового диапазона, работающая в режиме кругового сканирования по азимуту. Станция устанавливалась на позиции, пригодные для ее работы в штатном режиме. Станция имеет параболическую антенну со смещенным облучателем, вращение которого обеспечивает сопровождение цели по углу в режиме конического сканирования. Во время проведения экспериментов коническое сканирование выключалось. Облучатель устанавливался в положение, обеспечивающее горизонтальную или вертикальную поляризацию излучения. Ось антенны устанавливалась под нулевым углом места.

Измерения проводились на двух трассах. Трасса №1 протяженностью 16,4 км – открытая. Трасса №2 протяженностью 29 км – закрытая. Описание трасс дано в статье [2].

Испытываемая антенная система представляла собой два комплекта пирамидальных рупоров, каждый из которых образовывал две «параллельных» ([1]) фазометрических базы: малую (МБ) $l_1 = 18$ см и большую (ББ) $l_2 = 90$ см. Один комплект рупоров предназначен для приема сигналов вертикальной поляризации, другой – горизонтальной. Ширина диаграмм направленности рупоров в горизонтальной плоскости – 10° по уровню 0,5. Антенны с разной поляризацией приема располагались одна под другой.

Приемная аппаратура позволяла регистрировать в цифровом виде квадратурные составляющие принимаемых сигналов относительно опорного гетеродина с тактом 11 нс. Результаты измерений в виде восьмиразрядных чисел записывались в память ПЭВМ. В процессе обработки результатов измерений по квадратурным составляющим в каждом такте восстанавливались амплитуды сигналов и разности фаз на разнесенных антеннах. Измерительная аппаратура более подробно описана в статье [3]. Измерения выполнялись на частоте f = 9220 МГц. При этом сектор однозначности на малой базе составлял $\pm 5,15^{\circ}$. В процессе экспериментов источник излучения всегда находился в пределах данного сектора. Сектор однозначности на большой базе составлял $\pm 1,03^{\circ}$. Поэтому требовалось устранение неоднозначности измерений. Целое число периодов разности фаз на большой базе находилось по формуле

$$\boldsymbol{k}^{*} = \left[\boldsymbol{\varphi}_{1} \cdot \frac{\boldsymbol{l}_{2}}{\boldsymbol{l}_{1}} - \boldsymbol{\varphi}_{2}\right], \tag{1}$$

где ф₁ – разность фаз на малой базе;

 l_1 – малая база;

 ϕ_2 – разность фаз на большой базе;

 $l_{\scriptscriptstyle 2}$ – большая база; квадратные скобки означают округление до ближайшего целого.

После устранения неоднозначности пеленг вычисляется по традиционной формуле

$$\alpha = \arcsin\frac{(\varphi_2 + 2\pi k^{\hat{}})\lambda}{2\pi l_2}.$$
(2)

Точность работы экспериментальной установки проверялась путем снятия пеленгационной характеристики по реперу, находящемуся на расстоянии 100 м от нее. Пеленгационная характеристика при согласованном по поляризации приеме представлена на рисунке 1. Как видно из рисунка, она близка к идеальной (прямой линии). Отклонение пеленгационной характеристики от идеальной представлено на рисунке 2. Из рисунка следует, что отклонение не превосходит 0,06° по пеленгу в пределах сектора однозначности малой базы и 0,04° в пределах сектора однозначности большой базы, что соответствует фазовой погрешности на большой базе 12 и 8°, соответственно. Эту величину можно считать оценкой аппаратурной погрешности измерений.

0.0 Отклонение ПХ от теоретической 0.0 град Теленг на ББ, Град . D 연-0.04 -0.06 -0.08^L -5 0 2 4 1 4 0 1 2 Угол прихода сигнала, град Угол прихода сигнала, град

Рис. 1. Пеленгационная характеристика



В процессе обработки экспериментальных данных строилась зависимость разностей фаз на малой и большой базах, а также рассчитанных по ним пеленгов от углового положения антенны излучающей РЛС. Типичный пример таких зависимостей на открытой трассе приведен на рисунке 3, где представлены результаты измерений по каждому принятому импульсу через 55 нс после его начала.

На трассе №1 пеленгатор был ориентирован на РЛС, так что графики рисунка 3 фактически показывают погрешность пеленгования. На них и всех других экспериментальных зависимостях наблюдаются «броски» (то есть быстрые изменения разности фаз большой амплитуды) погрешностей в минимумах амплитудных диаграмм принимаемых сигналов. Последние представляют собой диаграмму направленности антенны источника излучения, искаженную трассой распространения радиоволн. На рисунке 3 амплитудная диаграмма показана для двух каналов приема. Как видно, при разносе антенн на 90 см они практически идентичны.

Броски разности фаз сигналов на разнесенных антеннах в минимумах амплитудной диаграммы принимаемых сигналов наблюдались нами ранее при измерениях на открытой трассе протяженностью 1 км [4]. В обоих случаях отношение сигнал/шум в минимумах диаграммы было достаточно большим, чтобы исключить шумы из причин появления бросков.

Таким образом, появление бросков разностей фаз в минимумах амплитудных диаграмм принимаемых сигналов можно считать типичным явлением на наземных трассах.



Рис. 3. Амплитудная диаграмма и пеленги на большой и малой базах. Трасса №1, вертикальная поляризация излучения, согласованный по поляризации прием, 55 нс от начала импульса

Из рисунка 3 видно, что броски разности фаз на малой и большой базах происходят одновременно и приблизительно одинаковы по форме. Из этого можно сделать вывод, что интервал корреляции пространственных флуктуаций падающего на антенную систему пеленгатора электромагнитного поля превышает её горизонтальные размеры. Пеленгатор воспринимает пространственные искажения фазового фронта как флуктуации угла прихода, что также отображено на рисунке 3.

Первопричиной данного явления является то обстоятельство, что направленная антенна РЛС не является точечным источником излучения, что приводит к отклонениям её фазового фронта от сферического в минимумах диаграммы направленности. Естественно, на проявление данного явления в проведенном эксперименте сказываются отражения радиоволн от подстилающей поверхности и местных предметов. В активной локации аналогичный эффект приводит к угловым флуктуациям целей и подробно рассмотрен в монографии [5].

В теоретических работах точность фазовых пеленгаторов обычно оценивается среднеквадратической погрешностью при условии правильного устранения неоднозначности и вероятностью правильного устранения неоднозначности. Однако результаты практического пеленгования более удобно оценивать среднеквадратическим значением результирующей оценки.

В таблице 1 приведены среднеквадратические погрешности пеленгования на трассе №1, полученные путем усреднения в секторе углового положения антенны РЛС ±50°, соответствующем рисунку 3. В графе «Большая база» представлены результаты, полученные после устранения неоднозначности измерений.

Таблица 1

| Поляризация | Вертикальная поляризация приема | | Горизонтальная поляризация приема | |
|----------------|---------------------------------|--------------|-----------------------------------|--------------|
| излучения | Малая база | Большая база | Малая база | Большая база |
| Вертикальная | 0,17 | 0,11 | 0,23 | 0,17 |
| Горизонтальная | 0,48 | 0,46 | 0,14 | 0,06 |

Среднеквадратические погрешности пеленгования на открытой трассе в секторе углового положения антенны РЛС ±50°, градусы

Теоретически, при одинаковых в среднеквадратическом погрешностях фазовых измерений на малой и большой базах угловая погрешность на большой базе должна быть в $l_2/l_1 = 5$ раз меньше, чем на малой. Из таблицы 1 видно, что в условиях эксперимента данное соотношение не выполняется: погрешность пеленгования на большой базе мало отличается от погрешностей на малой. Это соответствует предположению о том, что испытываемая антенная система размером 90 см регистрирует искажения электромагнитного поля на трассе распространения в основном как флуктуации угла прихода.

В таблице 2 представлены среднеквадратические погрешности пеленгования по главному лепестку диаграммы направленности антенны РЛС при вертикальной поляризации основного излучения. Измерения выполнялись через 55 нс после начала импульса.

Из таблицы видно, что точность пеленгования по главному лепестку диаграммы излучения при согласованном по поляризации приеме значительно (в условиях эксперимента почти в 4 раза) выше, чем при пеленговании в широком секторе углового положения антенны РЛС, где сказываются броски разности фаз в минимумах приема. При пеленговании на кроссполяризации погрешности на малой и большой базах соизмеримы, поскольку в главном лепестке излучения на основной поляризации имеет место минимум излучения на кросскомпоненте.

Таблица 2

| Среднеквадратические погрешности пеленгования на открытой трас | ce |
|--|----|
| в секторе углового положения антенны РЛС ±1,9°, градусы | |

| Поляризация принимаемых сигналов | Большая база | Малая база |
|----------------------------------|--------------|------------|
| Вертикальная | 0,03 | 0,09 |
| Горизонтальная | 0,17 | 0,24 |

Из таблицы 2 также видно, что при согласованном при поляризации приеме среднеквадратическая погрешность пеленгования на большой базе отличается от погрешности на малой базе менее чем в 5 раз. Это объясняется изменением среднего значения пеленга в пределах главного лепестка диаграммы излучения, что видно из рисунка 3.

Известно, что направленные антенны имеют различные диаграммы излучения на ортогональных поляризациях. Это относится и к используемой в РЛС параболической антенне со смещенным из фокуса облучателем. Для нее максимум ДНА на кроссполяризации составляет 3,5% от максимума на основной поляризации. Относительный уровень сигнала на кроссполяризации увеличивается на трассе распространения из-за влияния переотражений. На рисунках 4, 5 приведены усредненные по нескольким оборотам диаграммы направленности антенны РЛС, видимые с приемного пункта на трассе №1. Первая буква в обозначении кривых означает поляризацию излучаемого сигнала в главном лепестке ДНА, вторая – принимаемого.



Рис. 4. Уровень принимаемого сигнала на основной поляризации излучения



Угловое положение антенны источника, град

Рис. 5. Уровень принимаемого сигнала на кроссовой поляризации излучения

Из рисунков следует, что на открытой трассе уровень сигнала в месте приема достаточен для измерений как на основной, так и на кроссполяризации.

При сканировании антенны передатчика состояние поляризации принимаемого сигнала можно интерпретировать как случайное. В работе состояние поляризации оценивалось как отношение амплитуды принимаемого сигнала в канале, согласованном по поляризации, к амплитуде сигнала в канале кроссполяризации (коэффициент деполяризации). Как показали вычисления, коэффициент деполяризации зависит от поляризации излучения и времени измерения относительно начала импульса. Среднее значение коэффициента деполяризации за период сканирования антенны источника сигнала на трассе №1 приблизительно равно 2, СКО эмпирического распределения вероятностей – 4.

Таким образом, пеленгование источников излучения с направленной сканирующей антенной возможно как при согласованном по поляризации приеме, так и приеме на кроссполяризации. Погрешности пеленгования при согласованном приеме и приеме на кроссполяризации зависят от положения антенны источника излучения, так что возникает задача оптимизации совместных измерений.

Алгоритм разрешения неоднозначности (1) имеет следующую трактовку: выбирается целое число периодов разности фаз на большой базе k^* , при котором пеленги на большой и на малой базах различаются не более, чем на половину сектора однозначности по большой базе, равного λ/l_2 [1]. Такое число k^* при использовании алгоритма (1) всегда найдется, хотя оно может соответствовать аномально большим ошибкам пеленгования.

Можно отбрасывать самые грубые измерения, установив, что угловая разница между отсчетами по точной и грубой базам не должна превосходить некоторого порога Δ , меньшего $\lambda/2l_2$. Алгоритм устранения неоднозначности (1) при этом записывается следующим образом: выбирается целое число периодов разности фаз на большой базе k^* , при котором:

$$\left(\varphi_1 \frac{l_2}{l_1} - \left(\varphi_2 + 2\pi k^*\right)\right) \frac{1}{2\pi} < \Delta.$$
(3)

Измерения, для которых соотношение (3) не выполняется, отбрасываются.

В таблице 3 приведены данные, полученные при использовании алгоритма (3), для тех же условий эксперимента, для которых ранее составлена таблица 1. В графе «Большая база» под косой чертой указано количество точек, выброшенных из результатов измерений в соответствии с алгоритмом (3). Всего в секторе вращения антенны РЛС ±50° обрабатывалось 1480 импульсов.

Таблица З

| Среднеквадратические погрешнос | ти пеленгования на открытой трассе в секторе |
|-------------------------------------|---|
| углового положения антенны РЛС ±50° | при разрешении неоднозначности по алгоритму (3) |

| Поляризация | Вертикальная поляризация приема | | Горизонтальная поляризация приема | | | | |
|----------------|---------------------------------|--------------|-----------------------------------|--------------|--|--|--|
| излучения | Малая база | Большая база | Малая база | Большая база | | | |
| $\Delta=0.4$ | | | | | | | |
| Вертикальная | 0,17 | 0,07 / 1 | 0,23 | 0,05 / 12 | | | |
| Горизонтальная | 0,48 | 0,11 / 32 | 0,14 | 0,05 / 0 | | | |
| Δ =0.3 | | | | | | | |
| Вертикальная | 0,17 | 0,06 / 4 | 0,23 | 0,05 / 24 | | | |
| Горизонтальная | 0,48 | 0,1 / 72 | 0,14 | 0,05 / 6 | | | |
| $\Delta=0.2$ | | | | | | | |
| Вертикальная | 0,17 | 0,06 / 12 | 0,23 | 0,05 / 60 | | | |
| Горизонтальная | 0,48 | 0,09 / 166 | 0,14 | 0,05 / 42 | | | |

Из сравнения таблиц 3 и 1 видно, что использование алгоритма устранения неоднозначности (3) приводит к существенному увеличению точности пеленгования (в условиях эксперимента среднеквадратичная погрешность уменьшается в 3–4 раза при незначительном (до 5%) количестве пропущенных импульсов, если $\Delta \ge 0,3$). Уменьшение порога Δ ниже 0,3 практически не приводит к улучшению точности пеленгования.

На рисунке 6 дан типичный пример измерений на закрытой трассе №2.

Из рисунка видно, что сектор углового положения РЛС, в котором устраняется неоднозначность измерений, сокращается до $\pm 10^{\circ}$. За пределами сектора уровень сигнала не достаточен для корректной работы аппаратуры. В пределах указанного сектора измеренный пеленг изменяется на $1,2^{\circ}$. Фактически пеленгуется не источник сигнала, а облучаемая им часть укрывающего препятствия [1]. Сохраняются броски разности фаз в минимумах амплитудной диаграммы. В пределах главного лепестка диаграммы излучения пеленг с погрешностью, не превосходящей $0,07^{\circ}$, соответствует угловому разносу РЛС на трассах №1 и 2 со стороны пеленгатора $-2,43^{\circ}$.

Эксперименты показали, что характеристики точности зависят от момента измерения относительно начала импульса. Ограничения по объему статьи не дают возможности представить соответствующие материалы достаточно подробно. Приведенные закономерности, полученные через 55 нс после начала импульса, на качественном уровне проявляются и в других временных сечениях.

Таким образом, антенная система с большой базой 90 см и малой базой 18 см позволяет на открытых наземных трассах в трехсантиметровом диапазоне радиоволн производить однозначное пеленгование с погрешностью от 0,05 до $0,5^{\circ}$ в зависимости от поляризации излучения и приема, алгоритма обработки сигналов и ориентации направленной антенны источника излучения.



Рис. 6. Амплитудная диаграмма и результаты измерений на большой и малой базах. Трасса №2, вертикальная поляризация излучения, согласованный по поляризации прием, 55 нс от начала импульса

Литература

1. Денисов В.П. Фазовые радиопеленгаторы / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск : ТУСУР, 2002. – 251 с.

2. Лебедев В.Ю. Связь элементов рельефа местности с задержкой импульсных сигналов сантиметрового диапазона на приземных трассах распространения // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2006. – №6. – С. 40–43.

3. Измерительный комплекс для исследования пространственно-временных искажений радиосигналов трехсантиметрового диапазона на наземных трассах / М.Е. Ровкин, М.В. Крутиков, А.А. Мещеряков, М.В. Осипов, В.А. Зайцев, Е.Ю. Бутырин // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2006. – №6. – С. 7–11.

4. Экспериментальные данные об амплитудных и фазовых искажениях импульсных сигналов, принятых в различных точках на короткой открытой трассе / В.П. Денисов, М.В. Крутиков, М.В. Осипов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2006. – №6. – С. 12–18.

5. Леонов А.И. Моноимпульсная радиолокация / А.И. Леонов, К.И. Фомичев. – М. : Сов. Радио, 1970. – 391 с.

Денисов Вадим Прокопьевич

Доктор техн. наук, профессор кафедры радиотехнических систем ТУСУРа Тел.: (3822) 41-36-70 Эл. почта: rwplab@ms.tusur.ru

Колядин Николай Александрович

Мл. н. с. Научно-исследовательского института радиотехнических систем, аспирант кафедры радиотехнических систем ТУСУРа Тел.: (3822) 41-38-89 Эл. почта: rwplab@ms.tusur.ru

V.P. Denisov, N.A. Kolyadin

Research of antenna system phase direction-finder on the ground trace of radio waves propagation This work presents the results of a double-base phase direction-finder performance investigation on the basis of experimental data received on the ground traces of radio waves propagation. Furthermore, the algorithm of phase-ambiguity resolution for this direction-finder was surveyed.