ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОБАЗОВЫХ СИСТЕМ, построенных на триангуля- ционном способе определе- ния координат источников радиоизлучения

А.Мирошниченко, инженер ГосНИИАС / Mirosh.A.V@yandex.ru

УДК 621.396.96, DOI: 10.22184/2070-8963.2020.91.6.38.43

Определение координат источников радиоизлучения – важная задача во многих областях техники мобильной связи, радионавигации и радиомониторинга – сводится к определению углового направления на источник и дальности до источника радиоизлучения. Если первая задача решается с помощью достаточно точных методов, то вторая – определение дальности – вызывает трудности. Различные методы триангуляции – основной способ определения дальности до источника радиоизлучения. При построении триангуляционной измерительной системы вводится понятие базы, которое характеризуется как расстояние между измерительными пунктами. Высокую точность измерения расстояния до источника радиоизлучения можно обеспечить только путем создания измерительной системы с большой базой, достигающей в отдельных случаях нескольких сотен километров. В статье исследуется возможность построения малобазовых систем определения координат источников радиоизлучения на основе триангуляционных методов.

ВВЕДЕНИЕ

В общем случае триангуляционные измерительные системы строятся на основе двух измерительных

станций, разнесенных в пространстве. Каждая измерительная станция позволяет определить направление на источник радиоизлучения (ИРИ).

Зная координаты станций, их позиционирование и углы на ИРИ, вычислительное устройство может найти координаты ИРИ как точку пересечения прямых, проведенных от базовых станций в направлении ИРИ.

Точность определения координат ИРИ зависит непосредственно от отношения пространственного разнеса измерительных станций (базы измерительной системы) к дальности до ИРИ. Таким образом, по мере увеличения базы измерительной системы повышается точность системы.

В то же время бесконечное повышение точности измерительной системы за счет количественных показателей (увеличения базы) невозможно, так как требуется измерять направление на ИРИ на двух базовых станциях. Если ИРИ имеет узкую диаграмму направленности антенны (ДНА), сохраняется вероятность выхода одного из измерительных пунктов из главного луча ДНА ИРИ, что влечет невозможность измерения направления на ИРИ на одном из пунктов и, как следствие, сбой в работе всей системы.

Принципы построения триангуляционной системы определения координат ИРИ

На рис.1 приведен принцип построения триангуляционной измерительной системы [1].

Измерительная система состоит из двух базовых станций (БС₁ и БС₂), расположенных в известных координатах (x_1, y_1 и x_2, y_2 соответственно). Расстояние между базовыми станциями, равное B , называется базой системы.

Пусть существует ИРИ, находящийся в координатах (x_3, y_3), необходимо произвести оценку его координат. Каждая базовая станция определяет направление на ИРИ и высчитывает угол между направлением на ИРИ и линией базы (α и β соответственно, см. рис.1).

Для упрощения задачи перейдем к связанной системе координат, приняв, что $x_1=0, y_1=0, y_2=0$. Тогда прямая B имеет уравнение $B(x)=0$. Уравнение первой вспомогательной прямой описывается как $A_1(x)=\operatorname{tg}(\alpha)x$, а второй вспомогательной прямой – $A_2(x)=-\operatorname{tg}(\beta)x + x_2\operatorname{tg}(\beta)$.

Координаты ИРИ можно вычислить путем нахождения точки пересечения вспомогательных прямых A_1 и A_2 :

$$\begin{cases} \operatorname{tg}(\alpha)x = -\operatorname{tg}(\beta)x + x_2\operatorname{tg}(\beta) \\ y = \operatorname{tg}(\alpha)x \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = \frac{x_2\operatorname{tg}(\beta)}{\operatorname{tg}(\alpha) + \operatorname{tg}(\beta)} \\ y = \operatorname{tg}(\alpha)x \end{cases} \quad (1)$$

Рис.1. Принцип определения координат ИРИ триангуляционным способом

Вычислить координаты БС можно с помощью любой навигационной системы. Точность определения местоположений базовых станций может варьироваться (в диапазоне от миллиметров в оптических дальномерах до нескольких десятков метров в мобильных системах), что зависит от погрешности навигационной системы в каждом конкретном случае.

Для определения угловых направлений используются различные методы пространственной селекции. Рассмотрим основные из них.

Метод определения пеленга на ИРИ по максимуму ДНА (рис.2а) предусматривает поворот антенны в угломестной плоскости и нахождение направления на ИРИ путем максимизации мощности принятого сигнала. Данный способ отличается лучшими характеристиками при наличии помех. Однако он же и самый неточный – точность определения углового направления обычно составляет 0,2–0,25 от ширины главного лепестка ДНА пеленгатора [2].

Метод определения пеленга на ИРИ по минимуму ДНА (рис.2б) предусматривает поворот антенны, но критерием направления на цель является минимизация сигнала ИРИ. Поскольку ДНА в районе нуля отличается более крутыми фронтами по сравнению с главным лепестком ДНА, то точность пеленгации на порядок выше, чем при использовании метода по максимуму. Однако точность ограничивается наличием помех с других направлений, что

Рис.2. Различные способы радиопеленгации: а – по максимуму ДНА, б – по минимуму ДНА, в – равносигнальный метод пеленгации

Рис.3. Результаты моделирования точности измерения координат ИРИ: а – погрешности измерений при $N = 10$, ДНА = 10 град, $\sigma_{xy} = 1$ м, б – погрешности измерений при $N = 10$, ДНА = 5 град, $\sigma_{xy} = 1$ м, в – погрешности измерений при $N = 10$, ДНА = 10 град, $\sigma_{xy} = 10$ м, г – погрешности измерений при $N = 10$, ДНА = 5 град, $\sigma_{xy} = 10$ м

затрудняет применение данного метода при наличии источников помех [2, 3, 4].

Равносигнальный метод пеленгации, сочетающий в себе преимущества первых двух методов, основывается на двух пересекающихся ДНА. Критерием направления на ИРИ служит одинаковая амплитуда сигнала на двух антеннах. Данный метод отличается точностью, сравнимой с методом по минимуму, и составляет 0,05–0,025 от ширины главного лепестка ДНА [2]. При хорошей помехоустойчивости метода его минусом является значительно более сложная система, чем в первых двух методах.

Влияние различных факторов на ошибку измерения координат ИРИ

Проведем математическое моделирование точности определения координат ИРИ в зависимости от различных факторов. В процессе моделирования была произведена выборка из 1000 измерений координат ИРИ. Погрешности задавались в виде случайной аддитивной добавки к точно измеренным значениям координат базовых станций и пеленга на цель. Случайные ошибки были смоделированы в виде нормального закона распределения с нулевым математическим ожиданием и сигмой, указанной в условиях эксперимента.

В качестве ошибок при моделировании были взяты ошибка измерения координат базовых станций в метрах и ошибка измерения угловых координат на ИРИ. Ошибка измерения координат составляет 0,05 от ширины главного лепестка ДНА радиопеленгатора. Поэтому в исходных данных вместо величины ошибки учитывается ширина главного луча радиопеленгатора.

Кроме того, на ошибку косвенно влияет значение относительной дальности, которое определяется отношением расстояния до ИРИ к базе измерительной системы $N = L/B$ и является безразмерным коэффициентом. Если относительная дальность больше

10–25 (в литературе отсутствует точный критерий), система называется малобазовой. Так как дальность нормируется относительно базы, то в качестве базы выбрано расстояние в 10 км.

На рис.3 представлены результаты моделирования точностных характеристик системы определения координат ИРИ при различных исходных данных. В табл.1 сведены результаты моделирования.

На основе данных из табл.1 и (1) можно сделать вывод, что точность определения координат базовых станций практически не влияет на точность вычисления координат ИРИ. Ошибка, вносимая погрешностью определения координат базовых станций, исчисляется метрами, в то время как погрешность за счет угловых ошибок достигает нескольких километров.

Оценка потенциальных возможностей систем определения координат ИРИ

Как следует из табл.1, приемлемые точности достигаются только при ДНА радиопеленгатора порядка 1–2 градусов и относительной дальности не более 20.

Известна формула приближенной зависимости ширины ДНА и геометрических размеров антенны [5]:

$$\theta = \lambda/d \Rightarrow d = f(\lambda)_{\theta=\text{const}} = \lambda/\theta.$$

На рис.4 изображена зависимость геометрических размеров антенны от частоты для достижения заданной ширины ДНА.

Как следует из рис.4, создание антенны приемлемых размеров (не более 2 м) для мобильных базовых станций автомобильного или воздушного базирования с ДНА 1 градус возможно только для частот выше 8 ГГц.

Единственный способ повышения точности систем определения координат – уменьшение относительной дальности. Однако возникает

ИНФОТЕЛ
Интеллект. Опыт. Результат.

ONEPLAN

**ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И УСЛУГИ
ПО ПЛАНИРОВАНИЮ И ОПТИМИЗАЦИИ
СЕТЕЙ ПОДВИЖНОЙ
И ФИКСИРОВАННОЙ СВЯЗИ**

step@rpls.ru
+7 812 590-77-11
www.rpls.ru

Таблица 1. Результаты моделирования точности измерения координат ИРИ

N	ДНА БС (град)	σ_{xy} м	СКО $x_{ИРИ}$	СКО $y_{ИРИ}$
10	10	1	643	13467
20	10	1	1388	70467
40	10	1	16213	3551600
60	10	1	496370	57960000
10	5	1	318	6178
20	5	1	635	26390
40	5	1	1313	132550
60	5	1	11094	1962800
10	1	1	62	1266
20	1	1	121	4948
40	1	1	246	20403
60	1	1	373	44675
10	10	10	603	12543
20	10	10	1381	72178
40	10	10	23310	1053600
60	10	10	121800	37960000
10	5	10	312	6250
20	5	10	635	26390
40	5	10	1398	155340
60	5	10	2738	2344700
10	1	10	65	1284
20	1	10	123	5099
40	1	10	241	19593
60	1	10	371	44914

проблема одновременного нахождения в главном луче ДНА ИРИ всей измерительной системы.

На рис.5 показана зависимость минимально возможной относительной дальности ИРИ от ширины ДНА ИРИ.

Рис.4. Необходимые геометрические размеры антенны для достижения заданной ширины ДНА: сплошная линия – ДНА 5 градусов, пунктирная линия – ДНА 2,5 градуса, штрихпунктирная линия – ДНА 1 градус

Как видно из рис.5, на котором задан нижний порог параметра N, при уменьшении относительной дальности менее 10, утрачивается возможность определения координат ИРИ с ДНА менее 5 градусов. В то же время уменьшение относительной дальности менее 4 невозможно, так как исключается пеленгация практически всех ИРИ, обладающих направленной ДНА.

Применение триангуляционных методов определения координат ИРИ достигло своих потенциальных пределов. Дальнейшее повышение точности возможно исключительно благодаря применению других методов определения дальности, например разностно-дальномерного способа или комбинированного [6, 7].

Выводы

На основании изложенного в статье можно сделать несколько выводов. Первый заключается в том, что основной метод вычисления координат ИРИ в радиопеленгационных системах – триангуляционный – предусматривает определение пеленгов на ИРИ. При этом их точность прямо зависит от ширины ДНА базовых станций и составляет 0,05 от ширины главного лепестка ДНА. Второй вывод состоит в том, что триангуляционный метод крайне требователен к точности определения пеленгов на ИРИ и требует применения антенн с ДНА порядка 1-2 градусов, даже при относительных дальностях измерительной системы 10-20. Применение малобазовых систем (при значениях относительной дальности

Рис.5. Минимально необходимая относительная дальность системы измерения координат ИРИ от ширины ДНА ИРИ

порядка 50) невозможно из-за низких значений точности. Вклад погрешности определения координат базовых станций крайне мал по сравнению с вкладом ошибок определения пеленга, ими можно пренебречь. Третий вывод говорит о том, что дальнейшее повышение точностных характеристик триангуляционных систем невозможно. С одной стороны, они ограничены геометрическими размерами антенн, а с другой – требованием нахождения всех базовых станций в главном луче ИРИ. И четвертый, заключительный, вывод состоит в том, что применение триангуляционных методов определения координат ИРИ достигло своих потенциальных пределов. Дальнейшее повышение точности возможно исключительно благодаря применению других методов

определения дальности, например, разностно-дальномерного способа или комбинированного.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Карташкин А.С.** Авиационные радиосистемы / 3-е изд. – М.: ИП РадиоСофт, 2015. 304 с.
2. **Пантеев Р.А.** Способы повышения точности определения координат интегрированными многопозиционными комплексами радиомониторинга: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.17 / Пантеев Роман Леонидович. – Киев, 2016. 151 с.
3. **Волчков В.П., Мирошниченко А.В.** Синтез алгоритмов спектрального анализа сигналов на основе фреймов Вейля-Гейзенберга // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2018. Т. 18. № 4. С. 1001-1006.
4. **Мирошниченко А.В., Шаврин С.С.** Применение автокомпенсаторов помех в задачах обеспечения ЭМС радиоэлектронного оборудования летательных аппаратов // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2020. № 4. С. 58-63.
5. **Рохтамаль К., Кришке А.** Энциклопедия антенн / Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2016. 812 с.
6. **Егоров В.В., Жеребин А.М., Попов В.А., Клесова Ю.В., Князева Л.В., Татарчук И.А.** Концепция создания воздушной системы для эффективного решения задачи целеуказания в условиях огневого и радиоэлектронного противодействия // Четвертая Всероссийская научно-техническая конференция "Навигация, наведение и управление летательными аппаратами". Тезисы докладов. – М.: ФГУП ГосНИИАС, 2019. С. 52-54.
7. **Егоров В.В., Жеребин А.М.** Вопросы целеуказания на море многопозиционными системами // Моделирование авиационных систем. Сборник тезисов докладов – М.: ФГУП ГосНИИАС, 2018. С. 25-26.

Телекоммуникационное оптоволокно отметило полувековой юбилей

16 сентября корпорация Corning отметила 50-летие изобретения оптического волокна (ОВ) с низким затуханием.

Более полувека назад трое ученых из Corning – Роберт Мауер, Дональд Кек и Питер Шульц начали работу над созданием сверхчистого оптического стекла, способного передавать световые сигналы на большие расстояния. К середине 1960-х ученым и специалистам телекоммуникационных компаний стало понятно, что существовавшая инфраструктура медных кабелей, использовавшаяся для передачи голоса и данных, не

имеет достаточной полосы пропускания, чтобы справиться с прогнозируемым ростом трафика в будущем. Именно тогда представители British Post Office обратились в Corning за помощью в создании одномодового ОВ, у которого затухание было бы не более 20 дБ/км. Лучшее оптическое стекло на тот момент времени имело затухание около 1000 дБ/км.

Дональд Кек так вспоминает об этом открытии: "Я знал, что было что-то необычное и уникальное в волокне, которое нам удалось получить. Это был короткий отрезок волокна, но результа-

ты измерений были очень хорошими. Я записал в лабораторном журнале: "17 дБ/км, ЭВРИКА! Мы достигли цели!"

Когда Мауер, Кек и Шульц работали в лаборатории летом 1970 года, они и представить себе не могли, какие возможности откроет миру их изобретение в течение 50 лет. Технологии 5G, облачные сервисы и, пожалуй, любой способ связи с помощью мобильных устройств берет свое начало с момента изобретения ОВ.

По информации корпорации Corning