

УДК 621.396.663

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЕЛЕНГАТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ

Алёшкин Н.А., к.т.н., старший преподаватель ФГАОУ ВО ГУАП «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», e-mail: ales_nikita@mail.ru

Куликов Г.В., д.т.н., профессор ФГУП ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», e-mail: kulikov@mirea.ru

Славянский А.О., заместитель генерального конструктора АО «Научно-производственное предприятие «СПЕЦ-РАДИО», e-mail: a.slavyanskiy@spetzradio.ru

Шпак А.В., д.т.н., профессор, заместитель генерального директора АО «Научно-производственное предприятие «СПЕЦ-РАДИО», e-mail: a.shpak@spetzradio.ru

IMPROVING THE ACCURACY OF DETERMINING THE COORDINATES OF RADIO EMISSION SOURCES USING SPACE-BASED DIRECTION FINDERS

Alyoshkin N. A., Kulikov G. V., Slavyanskiy A. O., Shpak A. V.

This article discusses the issues of improving the accuracy of determining the coordinates of radio emission sources using space-based direction finding systems.

Increasing the accuracy of location determination is possible when using a combined angle-difference-rangefinder method, in which to ensure the unambiguity of measurements, it is necessary to use a set of positional measurements performed at different points of the spacecraft's orbit, as well as refining these data using a direction finder. To implement the difference-rangefinder method in space, a grouping of several spacecraft is necessary, with the help of which an antenna system will be implemented.

The results of the analysis of the methods of direction finding and determining the coordinates of sources and evaluating their potential accuracy characteristics and proposals for improving the accuracy of determining the coordinates of radio sources are presented.

Increasing the accuracy of location determination is possible when using a combined, angle-difference-rangefinder method, in which to ensure the unambiguity of measurements, it is necessary to use a set of positional measurements performed at different points of the spacecraft's orbit, as well as refining these data using a direction finder. To implement the difference-rangefinder method in space, a grouping of several spacecraft is necessary, with the help of which an antenna system will be implemented.

The results of the analysis of the methods of direction finding and determining the coordinates of sources and evaluating their potential accuracy characteristics are presented. Methods of increasing the accuracy of determining the coordinates of radio emission sources are proposed.

Key words: radio-electronic monitoring, sources of radio emission, precision, onboard information processing, direction finding methods.

Ключевые слова: радиоэлектронный мониторинг, источники радиоизлучения, точность, бортовая обработка информации, методы пеленгации.

Введение

Важнейшим дополнением оптических и радиолокационных космических систем мониторинга земной поверхности являются системы радиотехнического мониторинга. Их преимуществами являются возможности наблюдения за объектами наземного, морского и авиационного базирования в любых условиях окружающей среды.

В статье рассмотрены вопросы повышения точности определения координат источников радиоизлучения (ИРИ), проведен анализ методов пеленгации и определения координат ИРИ и оценки их потенциальных точностных характеристик. Предложены возможности повышения точности опре-

Рассматриваются вопросы повышения точности определения координат источников радиоизлучения с применением пеленгаторов космического базирования. Повышение точности определения местоположения возможно при использовании комбинированного угломерно-разностно-дальномерного метода, в котором для обеспечения однозначности измерений необходимо применение комплекса позиционных измерений, выполненных на разных точках орбиты космического аппарата (КА), а также уточнение этих данных с помощью пеленгатора. Для реализации разностно-дальномерного метода в космосе необходима группировка из нескольких космических аппаратов, с помощью которой будет реализована антенная система.

Приводятся результаты анализа методов пеленгации и определения координат источников и оценки их потенциальных точностных характеристик. Предложены методы повышения точности определения координат источников радиоизлучения.

деления координат ИРИ при использовании методов фазовой и амплитудной пеленгации.

Методы пеленгации и определения координат ИРИ и оценка их потенциальных точностных характеристик

Как правило, задача определения местоположения объекта радиотехническими методами сводится к измерению геометрических величин, однозначно характеризующих искомое местоположение относительно заданной точки.

Существуют несколько основных методов определения местоположения [1].

– Амплитудные методы: радиопеленгаторы равно-сигнального, суммарно-разностного типов.

– Фазовые методы: фазовые дальномерные, разностно-дальномерные системы и угломерные системы.

– Частотные методы: частотные дальномерные системы с использованием частотно-модулированных сигналов, доплеровские радиотехнические методы, корреляционные радиотехнические методы и средства.

Радиопеленгаторы равносигнального типа

Типичным примером пеленгатора, использующего равносигнальный метод, может служить радиопеленгатор с поочередным сравнением амплитуд. Диаграмма направленности антенны такого пеленгатора периодически перемещается из одного положения в другое и обратно. Если источник смещен относительно равносигнального направления, то коммутация характеристики приводит к изменению амплитуды принятого сигнала.

Основным недостатком одноканального амплитудного пеленгатора является наличие модуляционных ошибок. Изменение интенсивности сигнала с частотой коммутации приводит к образованию ложного сигнала рассогласования даже при нахождении цели на опорном направлении. Поскольку сигналы цели обычно флюктуируют по интенсивности и в спектре флюктуации содержатся гармоники частоты коммутации, ложный сигнал рассогласования дает дополнительную ошибку пеленгования. Достаточно сильная умышленная модулирующая помеха, амплитуда которой изменяется с частотой коммутации, полностью нарушает работу системы.

Равносигнальный метод может быть реализован при использовании одной антенны, диаграмма направленности которой периодически изменяет своё положение в пространстве. В этом случае сравнению подлежат сигналы, принятые в различные моменты времени при разных положениях диаграммы направленности.

Радиопеленгаторы суммарно-разностного типа

В радиопеленгаторах суммарно-разностного типа используются две антенны. Путем суммирования сигналов, снимаемых с этих антенн, формируется суммарная диаграмма направленности, а вычитание выходного напряжения одной антенны из выходного напряжения другой антенны дает разностную диаграмму направленности.

Основным достоинством метода сравнения является возможность мгновенного определения направления на цель в пределах относительно широкого сектора при

неподвижной антенной системе. Наиболее существенным недостатком является относительно низкая точность измерения, существенно меняющаяся в зависимости от вида и взаимного расположения диаграмм направленности антенн, а также от прихода волны.

Данный недостаток может быть значительно уменьшен благодаря использованию генератора опорных сигналов. Полное устранение отмеченного недостатка достигается в системах сравнения, основанных на определении отношения амплитуд сигналов.

Фазовые разностно-дальномерные системы

В разностно-дальномерных системах (РДС) координаты ИРИ вычисляются на основе измеренных значений разности задержек в распространении радиоволн от ИРИ до разных постов наблюдения. Для таких систем характерна независимость результатов от типа используемых антенн и от вида поляризации радиоволны. Наилучшие результаты обычно дает использование ненаправленных антенн.

Фазовые угломерные системы

Наибольшее практическое применение находят системы, основанные на использовании радиоинтерференционных методов, в основе которых лежит измерение разности фаз когерентных колебаний, принимаемых на разнесенные антенны, относительно опорной [2].

Относительно небольшие базы, используемые в угломерных системах, позволяют создавать последние не только со стационарными базами, но и с подвижными. Применение подвижных баз существенно расширяет возможности угломерных систем и позволяет повысить их точность.

Фазовые пеленгаторы интерференционного типа, как и другие фазовые устройства, имеют существенный недостаток – неоднозначность отсчета. С другой стороны, выбором базы (B) с учетом длины волны (λ) сигнала можно сделать отношение B/λ достаточно малым и обеспечить однозначность отсчета. Однако при этом оказывается достаточно низкой величина пеленгационной характеристики. Для разрешения противоречия между точностью и однозначностью отсчета необходимо иметь две или более различных баз.

На основе разности фаз принятых сигналов вычисляются направляющие косинусы, определяющие местоположение ИРИ (рис. 1).

На малой базе производится однозначный грубый отсчет. На остальных – уточнение измерений.

Ошибку пеленгования σ_α , т.е. погрешность определения угла α , при заданной точности измерения разности фаз σ_ϕ , можно определить на основании выражения (1):

$$\sigma_\alpha = \frac{\lambda}{2\pi B \sin \alpha} \sigma_\phi. \quad (1)$$

Из формулы видно, что ошибка пеленгования зависит не только от отношения λ/B , но и от угла α .

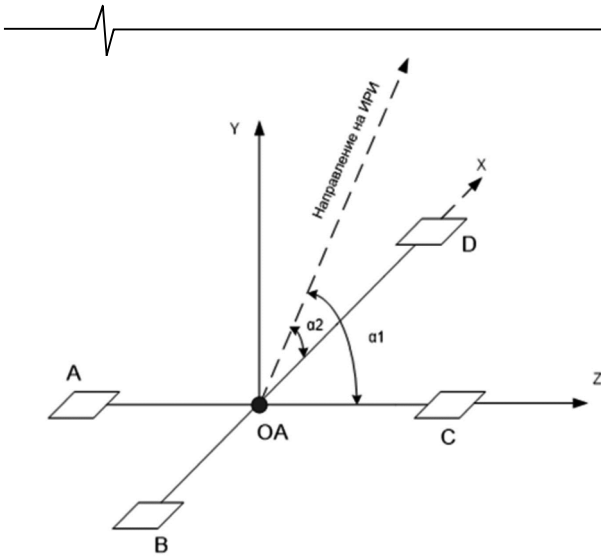


Рис. 1. Угломерный метод определения местоположения ИРИ.

D – элементы антенной решетки, OA – опорная антенна

Ошибки местоопределения

По своему происхождению эти ошибки можно разделить на ошибки распространения, аппаратные ошибки и ошибки, обусловленные помехами.

Причиной ошибок распространения является зависимость скорости распространения волн от свойств среды. Аппаратные ошибки возникают из-за изменения параметров радиосигналов при прохождении их через элементы радиотехнических устройств. Ошибки измерений можно разделить на систематически и случайные.

Измерение дальности

Ошибки измерения дальности возникают, прежде всего, из-за ошибок измерения времени запаздывания сигналов. Обозначим Δr_t ошибку измерения дальности, обусловленную ошибкой определения времени запаздывания Δt , тогда:

$$\Delta r_t = \frac{v}{2} \Delta t, \tag{2}$$

где v – фазовая или групповая скорость распространения.

Ошибки измерения длительности временного интервала зависят от метода измерений, свойств используемых измерительных устройств, помех. Наиболее существенное влияние оказывают ошибки, обусловленные помехами. Уменьшение этих ошибок может быть достигнуто за счет увеличения энергии сигнала.

При использовании фазовых методов измерения дальности, когда непосредственно измеряется разность фаз сигналов, ошибка измерения длительности зависит как от ошибки измерения разности фаз, так и от неста-

бильности частоты колебаний. Из формулы $t = \frac{\phi}{\Omega}$ следует, что

$$\Delta t_\phi = \frac{\Delta \phi}{\Omega}, \tag{3}$$

$$\Delta t_\Omega = -\frac{\Delta \Omega}{\Omega^2} \phi, \tag{4}$$

где Δt_ϕ – ошибка измерения времени, обусловленная неточностью измерения разности фаз; Δt_Ω – ошибка измерения времени из-за нестабильности частоты; Ω – частота модуляции; ϕ – фазовый сдвиг.

Первая ошибка определяется в основном отношением сигнал/шум. Влияние второй ошибки может быть уменьшено применением частотных эталонов.

Второй источник ошибок определения дальности – неполнота или неточность сведений о скорости распространения радиоволн, которая в свою очередь зависит от свойств среды.

Измерение угловых координат

Рассмотрим факторы, оказывающие влияние на точность определения угловых координат, на примере фазового метода угломерных определений. Зависимость между разностью фаз сигналов, принятых на разнесенные антенны, и направлением на источник выражается формулой:

$$\phi = \frac{2\pi d \cos \alpha}{\lambda} = \frac{2\pi d \sin \gamma}{\lambda}, \tag{5}$$

$$\alpha = 90^\circ - \gamma,$$

где γ – угол между направлением на источник и нормалью к базе; d – длина базы.

Из формулы (5) следует, что отклонение любых из представленных в ней величин от своих номинальных значений приводит к появлению ошибок измерения угла.

Ошибки, связанные с распространением волны в неоднородных средах, оказывают существенное влияние на измерение угла, особенно при измерениях вблизи нормали к базе. Следует отметить, что данные ошибки становятся менее существенными за пределами атмосферы, где вариации коэффициента преломления заметно меньше.

Интересным свойством угломерных методов является то, что при измерениях вблизи нормали к базе их точность не зависит от точности сведений о скорости света в вакууме, коэффициенте преломления среды и длины базы. Причина этого в том, что чем ближе к нормали располагаются лучи, идущие от источника, тем меньше разность путей до обеих антенн. Если источник оказывается на перпендикуляре к базе, то оба луча проходят равные пути. Регистрируя нулевую разность фаз, мы устанавливаем, что источник расположен на нормали. Таким образом, устранение влияния скорости радиоволн и длины базы на измерение угловых координат источников, расположенных вблизи перпендикуляра к базе, достигается за счет того, что регистрация положения источника осуществляется в момент, когда разность длин путей становится равной нулю. Подобный метод носит название нулевого метода [3].

Предложения по повышению точности определения координат ИРИ при использовании методов фазовой и амплитудной пеленгации

Повышение точности определения местоположения ИРИ возможно при использовании комбинированного угломерно-разностно-дальномерного метода. Суть это-

го подхода заключается в совместном использовании фазового пеленгатора и разностно-дальномерного метода (РДМ).

Для реализации РДМ в космосе необходима группировка из нескольких космических аппаратов (КА), с помощью которой будет реализована антенная система РДМ. Ниже рассмотрены основные моменты построения разностно-дальномерной системы (РДС).

Выбор количества антенных элементов РДС

Рассмотрим РДС, состоящую из двух антенных элементов. Разность задержек между двумя антеннами определяет геометрическое место точек, в которых может быть расположен ИРИ – гиперболу с фокусами в точках расположения постов наблюдения. Таким образом, при РДС на основе двух антенных элементов невозможно однозначно определить местоположение источника. На примере, показанном на рис. 2, в случае использования двух антенн № 1 и № 3, ИРИ может находиться в любой точке гиперболы 1-3.

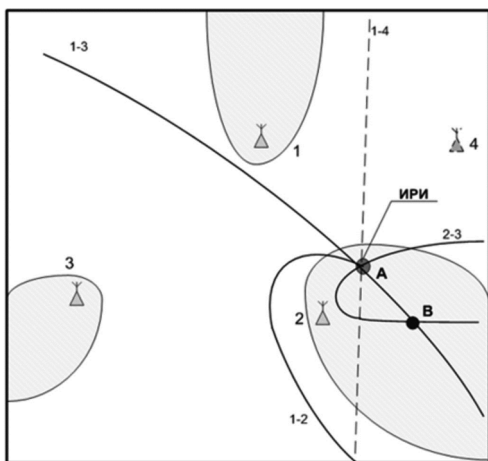


Рис. 2. Разностно-дальномерная система для трех постов

РДС на основе трех антенных элементов тоже не во всех случаях позволяет однозначно определить местоположение, так как при нахождении источника в некоторых зонах пространства (закрашенные области), возможно возникновение двух или более решений системы гиперболических уравнений. Например, это две точки – А и В.

Введение четвертого антенного элемента вносит в систему необходимую достаточность (гипербола 1-4) и позволяет полностью избавиться от неоднозначности определения местоположения.

Следует отметить, что использование комплекса позиционных измерений, произведенных при движении КА, позволяет снизить требования к количеству антенных элементов РДС, так как в значительной степени устраняется неоднозначность определения местоположения ИРИ.

Оценка погрешности РДС местоопределения

Точность пеленгования двухэлементной системы зависит от длины базы, азимута ИРИ и ошибки определения задержки распространения сигнала между антенными элементами.

Она будет определяться ошибкой нахождения линии положения, т.е. расстоянием между истинной и найденной линией положения в заданной точке и может быть выражена следующей формулой:

$$\sigma_R = \left(\frac{R}{d \cos \alpha} \right) \cdot (c\sigma_\tau), \quad (6)$$

где R – дальность до ИРИ, d – база, α – азимут ИРИ, σ_τ – ошибка определения временной задержки распространения сигнала между антенными элементами.

Из формулы следует, что СКО местоопределения зависит от базы между антенными элементами d , азимута ИРИ α и ошибки определения временной задержки распространения сигнала между антенными элементами σ_τ .

Для оценки использовался сигнал фазоманипулированный сигнал с модуляционной скоростью 16000 кГц ССС DAMA (Вариант доступа 20). Длительность фрагмента, используемого в качестве эталона, составляет примерно 50 мс.

Из результатов следует, что при соотношениях сигнал/шум более 0 дБ средняя ошибка определения временной задержки σ_τ не превышает 1 мкс.

На рис. 3 показана зависимость погрешности пеленгования от длины базы антенной системы. Видно, что с ее увеличением погрешность пеленгования уменьшается. Расчеты произведены при следующих исходных данных: $R = 600$ км, $d = 10-500$ км, $\alpha = 60^\circ$, $\sigma_\tau = 0,3$ мкс и $\sigma_\tau = 0,4$ мкс. Из графиков следует, что для повышения точности пеленгования необходимо, по возможности, увеличение базы антенной системы.

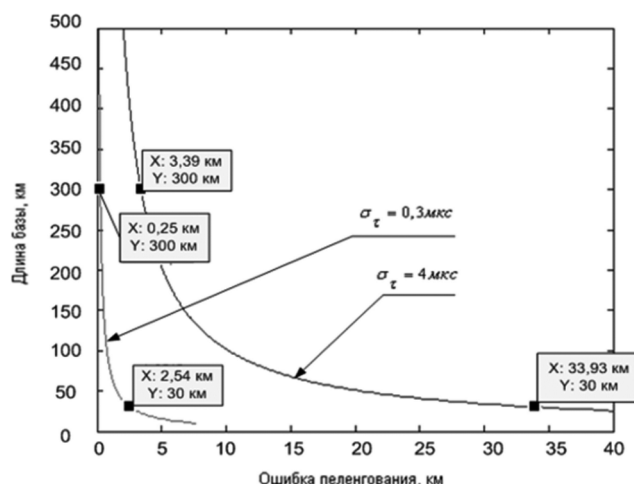


Рис. 3. Погрешность пеленгования в зависимости от базы антенной системы

Рис. 4 иллюстрирует зависимость погрешности пеленгования от азимута ИРИ. Видно, что наибольшая погрешность наблюдается при азимутах близких к 90° . Действительно, при распространении электромагнитной волны вдоль оси антенной системы разность времен прихода не зависит от расстояния до источника.

В случае нескольких измерений, проведенных с определенными интервалами времени, ошибка местоопределения будет зависеть от ошибок каждого изме-

рения, а также от угла, под которым пересекаются линии положения (гиперболы), соответствующие этим измерениям. Тогда для двух измерений:

$$\sigma_R = \frac{\sqrt{\sigma_{R1}^2 + \sigma_{R2}^2}}{\sin(\phi)}, \quad (7)$$

где σ_{R1} , σ_{R2} – ошибки первого и второго измерения, ϕ – угол пересечения гипербол.

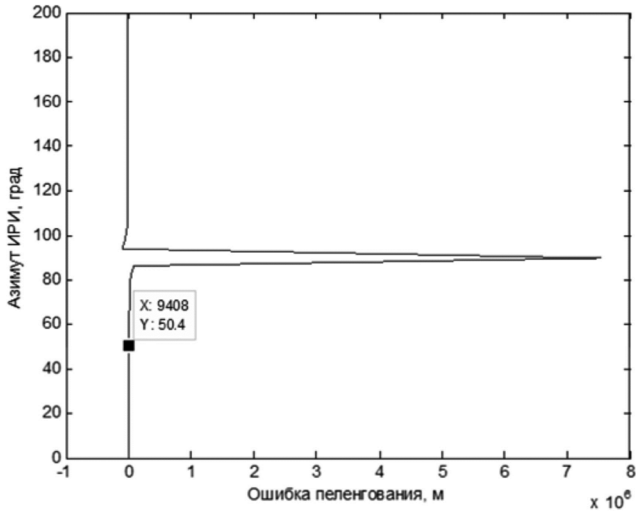


Рис. 4. Погрешность пеленгования методом в зависимости от азимута ИРИ

Следовательно, при таком подходе, наилучшая точность местоопределения возможна при $\phi = 90^\circ$, а наихудшая при значениях ϕ близких к 0° .

Заключение

По результатам приведенного в работе анализа методов определения координат ИРИ и экспериментальных расчетов на базе выбранного оптимального метода следует сделать следующие выводы:

- точность местоопределения РДС возрастает с увеличением базы:

– если расстояние между КА – 20 км, а СКО разности времен прихода – 5 и 50 нс, то ошибка (СКО) равна ~ 0,3 и 3 км соответственно,

– при увеличении расстояния между КА до 300 км, то ошибка уменьшается до ~ 15 и 150 м соответственно;

- для полного исключения неоднозначности необходимо использовать большее число элементов антенной системы:

– РДС на основе трех антенных элементов не во всех случаях позволяет однозначно определить местоположение, так как при нахождении источника в некоторых зонах пространства, возможно возникновение двух или более решений системы гиперболических уравнений,

– введение четвертого антенного элемента вносит в систему необходимую достаточность и позволяет полностью избавиться от неоднозначности определения местоположения.

- для обеспечения однозначности измерений необходимо использование комплекса позиционных измерений, выполненных на разных точках орбиты КА, а также уточнение этих данных с помощью пеленгатора;

- при использовании комплекса позиционных измерений, для получения оптимальных углов пересечения гипербол, необходимо увеличить время между измерениями до нескольких секунд.

Литература

1. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1992. – 304 с.
2. Белов В.И. Теория фазовых измерительных систем: монография. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. 148 с.
3. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов, второе издание. М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. 656 с.

НОВЫЕ КНИГИ

Витязев С.В.

Цифровые процессоры обработки сигналов / Курс лекций – М.: Изд-во «Горячая линия-Телеком», 2017 г. – 100 с.: ил.

Рассмотрены основы построения архитектур и оптимизации программного обеспечения цифровых сигнальных процессоров. Сформулированы основные задачи цифровой обработки сигналов на сигнальных процессорах. Представлено описание инструментальных и программных средств работы с цифровыми сигнальными процессорами.

Для студентов технических вузов радиотехнических и инфокоммуникационных специальностей, будет полезна преподавателям, читающим соответствующие курсы.

