



<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-1-6-13>

УДК 621.391.812.7

Определение координат источника радиоизлучения по одному замеру с помощью баллистически связанной группировки из двух космических аппаратов с использованием высокоточных вычислений

А. Н. Никулина, П. Б. Попов, В. А. Подковкин, Б. Б. Николенко

АО «Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт имени академика А.И. Берга»

В статье описано решение задачи по определению координат ИРИ с помощью баллистически связанной группировки, состоящей из двух космических аппаратов, на основе данных, полученных после одного замера параметров сигнала ИРИ. Подробно представлен алгоритм решения задачи, рассмотрены ограничения примененного метода решения задачи и инструменты, позволяющие достичь необходимой вычислительной точности. Приведен пример расчета координат ИРИ по описанному алгоритму. Возможность рассмотренного метода подтверждена с помощью разработанной математической модели.

Ключевые слова: высокоточные вычисления, источник радиоизлучения, космический аппарат, определение координат, радиоэлектронная борьба, разностно-дальномерный метод

Для цитирования: Никулина А. Н., Попов П. Б., Подковкин В. А., Николенко Б. Б. Определение координат источника радиоизлучения по одному замеру с помощью баллистически связанной группировки из двух космических аппаратов с использованием высокоточных вычислений // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2023. № 1. С. 6–13. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-1-6-13>

For citation: Nikulina A. N., Popov P. B., Podkovkin V. A., Nikolenko B. B. RF emitter geolocation based on a single measurement employing an Earth-referenced two-satellite constellation and high-precision computations // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2023. No. 1. P. 6–13. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2023-1-6-13>

Поступила 24.11.2022 Отрецензирована 08.12.2022 Одобрена 13.01.2023 Опубликовано 16.03.2023

Введение

В настоящее время задачи радиоэлектронного наблюдения с использованием космических аппаратов являются наиболее актуальными при обеспечении обороноспособности Российской Федерации.

В данной работе описано решение задачи по определению координат неподвижного источника радиоизлучения (ИРИ) по одному замеру параметров сигнала баллистически связанной группировки (БСГ), состоящей из двух космических аппаратов (КА), расположенной, как показано на рисунке 1.

Для решения этой задачи невозможно применить классический разностно-даль-

номерный метод (РДМ) оценки координат ИРИ, так как для этого необходим одновременный замер параметров сигнала с трех КА.

Многопозиционные методы – квази-разностно-дальномерный метод (квази-РДМ) [1] и разностно-частотный метод (РЧМ) – невозможно применить без нескольких (не менее трех) разнесенных во времени и пространстве замеров параметров сигнала ИРИ. Кроме того, многопозиционные методы обладают рядом недостатков:

- неоднозначность идентификации сигналов от одного ИРИ;
- неоднозначность, связанная с периодичностью излучаемых импульсов.

Необходимо наличие высокостабильного периода излучения сигнала, который

© Никулина А. Н., Попов П. Б., Подковкин В. А., Николенко Б. Б., 2023

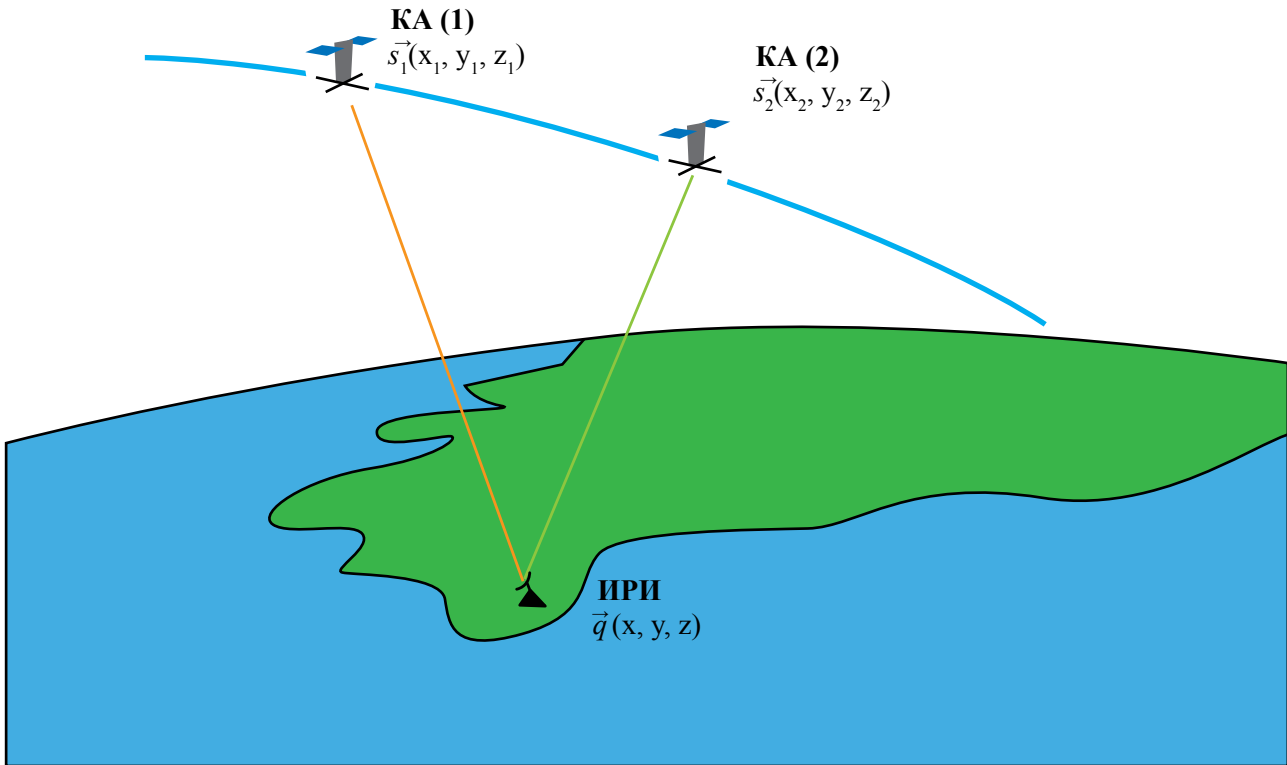


Рис. 1. Взаимное расположение КА и ИРИ

может быть с высокой достоверностью выделен на фоне помех и других ИРИ.

Совместное использование РДМ и РЧМ позволяет использовать информацию об измененной частоте и времени получения сигнала ИРИ, а также о разности расстояний между двумя КА для составления системы нелинейных уравнений. Ее решение позволяет определить координаты ИРИ с помощью двух КА по одному замеру параметров сигнала ИРИ. Для решения системы уравнений можно применить численные методы, например метод Ньютона, однако это связано со сложностями отделения всех корней системы уравнений и поиска начального приближения, достаточно точного для сходимости численного метода.

Мы предлагаем использовать комбинированный метод решения задачи, суть которого заключается в том, что численное решение системы нелинейных уравнений можно свести к численному решению одного полинома 8-й степени [2] с помощью ряда аналитических преобразований, требующих высокоточных вычислений. Комбинированный метод лишен недостатков численного метода, но требует значительной вычислительной точности, более высокой, чем заложено в стандартных

средствах программирования. Для его реализации использовалась система компьютерной алгебры Сосоа, позволяющая работать с чрезвычайно большими целыми и рациональными числами, используя библиотеку GNU Multi-Precision.

Постановка задачи

В расчетах использовалась неподвижная геоцентрическая система координат. ИРИ находится на Земле и неподвижен, на КА и пункте обработки информации имеется система единого времени.

Введем следующие обозначения:

$\mathbf{x} = [x \ y \ z]^T$ – неизвестные координаты ИРИ;

$\mathbf{s}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ – известные координаты КА, $i = 1, 2$ – номер КА;

t – время излучения сигнала ИРИ;

t_i – время приема сигнала i -м КА;

f – несущая частота сигнала ИРИ;

f_i – частота сигнала, полученного i -м КА с учетом эффекта Доплера.

Расстояние R_i от i -го КА до ИРИ можно определить следующим образом:

$$R_i(\mathbf{x}, \mathbf{s}_i) = c(t_i - t) \equiv \tau_i - \tau, \quad (1)$$



произведения $c \cdot t_i$ и $c \cdot t$ обозначим как τ_i и τ соответственно, c – скорость света.

В то же время R_i можно вычислить как расстояние между координатами ИРИ и i -м КА:

$$R_i = |\mathbf{x} - \mathbf{s}_i| = \sqrt{(\mathbf{x} - \mathbf{s}_i)^T (\mathbf{x} - \mathbf{s}_i)}. \quad (2)$$

Если возвести обе части уравнения (2) в квадрат, получаем:

$$\mathbf{x}^T \mathbf{x} - 2\mathbf{s}_1^T \mathbf{x} + r_1^2 = \tau_1^2 + \tau^2 - 2\tau_1 \tau, \quad (3)$$

$$\mathbf{x}^T \mathbf{x} - 2\mathbf{s}_2^T \mathbf{x} + r_2^2 = \tau_2^2 + \tau^2 - 2\tau_2 \tau, \quad (4)$$

где $r_i^2 = \mathbf{s}_i^T \mathbf{s}_i$.

Таким образом, для двух КА, вычитая из уравнения (3) уравнение (4), получаем первое уравнение системы:

$$2(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2)^T \mathbf{x} = r_1^2 - r_2^2 - \tau_1^2 + \tau_2^2 + 2(\tau_1 - \tau_2)\tau. \quad (5)$$

Радиальная скорость КА:

$$\dot{R}_i = c \left(1 - \frac{f_i}{f}\right), \quad (6)$$

где f – частота сигнала ИРИ, f_i – частота сигнала, полученного КА с учетом эффекта Доплера.

С учетом уравнений 2 и 6, получим

$$\dot{R}_i = \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{s}_i)^T (\dot{\mathbf{x}} - \dot{\mathbf{s}}_i)}{R_i} = c \left(1 - \frac{f_i}{f}\right). \quad (7)$$

Обозначим $1/f = v$.

В геоцентрической системе отсчета скорость движения ИРИ $\dot{\mathbf{x}} = 0$, поэтому уравнение 7 можно переписать следующим образом:

$$\frac{f_1}{f} = 1 + \frac{1}{c} \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{s}_1)^T \dot{\mathbf{s}}_1}{\sqrt{(\mathbf{x} - \mathbf{s}_1)^T (\mathbf{x} - \mathbf{s}_1)}} \quad (8)$$

и

$$\frac{f_2}{f} = 1 + \frac{1}{c} \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{s}_2)^T \dot{\mathbf{s}}_2}{\sqrt{(\mathbf{x} - \mathbf{s}_2)^T (\mathbf{x} - \mathbf{s}_2)}}. \quad (9)$$

Тогда, разделив уравнение 8 на уравнение 9, получим второе уравнение системы:

$$f_1 \left(1 + \frac{1}{c} \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{s}_2)^T \dot{\mathbf{s}}_2}{\sqrt{(\mathbf{x} - \mathbf{s}_2)^T (\mathbf{x} - \mathbf{s}_2)}}\right) - f_2 \left(1 + \frac{1}{c} \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{s}_1)^T \dot{\mathbf{s}}_1}{\sqrt{(\mathbf{x} - \mathbf{s}_1)^T (\mathbf{x} - \mathbf{s}_1)}}\right) = 0. \quad (10)$$

Поверхность Земли аппроксимируем эллипсоидом с центром в точке $O(0,0,0)$. Обозначим r_e и r_p – экваториальный и полярный радиусы Земли соответственно, тогда

$$\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} = r_e^2, \quad (11)$$

$$\text{где } Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & r_e^2 / r_p^2 \end{bmatrix}$$

Для оценки координат ИРИ с помощью 2 КА объединим уравнения 5, 10 и 11 в систему:

$$\begin{cases} \tau_1 - \tau_2 = |\mathbf{x} - \mathbf{s}_1| - |\mathbf{x} - \mathbf{s}_2|, \\ f_1 \left(1 + \frac{1}{c} \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{s}_2)^T \dot{\mathbf{s}}_2}{\sqrt{(\mathbf{x} - \mathbf{s}_2)^T (\mathbf{x} - \mathbf{s}_2)}}\right) - \\ - f_2 \left(1 + \frac{1}{c} \frac{(\mathbf{x} - \mathbf{s}_1)^T \dot{\mathbf{s}}_1}{\sqrt{(\mathbf{x} - \mathbf{s}_1)^T (\mathbf{x} - \mathbf{s}_1)}}\right) = 0, \\ \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} = r_e^2. \end{cases} \quad (12)$$

Система состоит из трех нелинейных уравнений и не имеет аналитического решения.

1. Решение системы нелинейных уравнений комбинированным методом.

Используя 1 и 7, получим

$$-\dot{\mathbf{s}}_i^T \mathbf{x} = c(\tau_i - \tau)(1 - f_i v) - \mathbf{s}_i^T \dot{\mathbf{s}}_i. \quad (13)$$

То есть для 2 КА:

$$-\dot{\mathbf{s}}_1^T \mathbf{x} = c(\tau_1 - \tau - \tau_1 f_1 v + f_1 v \tau) - \mathbf{s}_1^T \dot{\mathbf{s}}_1. \quad (14)$$

$$-\dot{\mathbf{s}}_2^T \mathbf{x} = c(\tau_2 - \tau - \tau_2 f_2 v + f_2 v \tau) - \mathbf{s}_2^T \dot{\mathbf{s}}_2. \quad (15)$$

Уравнения 5, 14 и 15 можно объединить в матричное уравнение вида:

$$\begin{bmatrix} 2(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2)^T \\ \dot{\mathbf{s}}_1^T \\ \dot{\mathbf{s}}_2^T \end{bmatrix} \mathbf{x} = -c \begin{bmatrix} 0 \\ f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} v \tau + \begin{bmatrix} 2(\tau_1 - \tau_2) \\ c \\ c \end{bmatrix} \tau + c \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_1 f_1 \\ \tau_2 f_2 \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} r_1^2 - r_2^2 - \tau_1^2 + \tau_2^2 \\ -c\tau_1 + \mathbf{s}_1^T \dot{\mathbf{s}}_1 \\ -c\tau_2 + \mathbf{s}_2^T \dot{\mathbf{s}}_2 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

которое можно записать как

$$\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{g} v \tau + \mathbf{h} \tau + \mathbf{p} v + \mathbf{q}. \quad (17)$$

Убедившись в том, что определитель матрицы \mathbf{A} не равен нулю, можно решить это уравнение относительно \mathbf{x} :

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{g} v \tau + \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h} \tau + \mathbf{A}^{-1} \mathbf{p} v + \mathbf{A}^{-1} \mathbf{q} \equiv \mathbf{z} v \tau + \mathbf{u} \tau + \mathbf{v} v + \mathbf{d}. \quad (18)$$

Подставляя 18 в уравнение 3, получим

$$(\mathbf{z} v \tau + \mathbf{u} \tau + \mathbf{v} v + \mathbf{d})^T (\mathbf{z} v \tau + \mathbf{u} \tau + \mathbf{v} v + \mathbf{d}) - 2\mathbf{s}_1^T (\mathbf{z} v \tau + \mathbf{u} \tau + \mathbf{v} v + \mathbf{d}) + r_1^2 - \tau_1^2 - \tau^2 + 2\tau_1 \tau = 0$$



Раскрывая скобки и делая замену переменных:

$$a_1\tau^2v^2 + a_2\tau^2v + a_3\tau v^2 + a_4\tau^2 + a_5v^2 + a_6\tau v + a_7\tau + a_8v + a_9 = 0. \quad (19)$$

Подставляя 18 в последнее уравнение системы 12, получим:

$$(\mathbf{z}\nu\tau + \mathbf{u}\tau + \mathbf{v}\nu + \mathbf{d})^T \mathbf{Q}(\mathbf{z}\nu\tau + \mathbf{u}\tau + \mathbf{v}\nu + \mathbf{d}) - r_e^2 = 0.$$

Раскроем скобки:

$$b_1\tau^2v^2 + b_2\tau^2v + b_3\tau v^2 + b_4\tau^2 + b_5v^2 + b_6\tau v + b_7\tau + b_8v + b_9 = 0. \quad (20)$$

Вынесем за скобки ν в 19 и 20:

$$c_1v^2 + c_2v + c_3 = 0, \quad (21)$$

$$d_1v^2 + d_2v + d_3 = 0. \quad (22)$$

Составим матрицу Сильвестра для полиномов 21 и 22. Она будет иметь вид:

$$\begin{pmatrix} 0 & c_1 & c_2 & c_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 & 0 \\ 0 & d_1 & d_2 & d_3 \\ d_1 & d_2 & d_3 & 0 \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Полиномы 21 и 22 имеют общий корень тогда и только тогда, когда определитель матрицы 23 равен нулю.

После раскрытия определителя получается полином 8-й степени относительно τ :

$$w_1\tau^8 + w_2\tau^7 + w_3\tau^6 + w_4\tau^5 + w_5\tau^4 + w_6\tau^3 + w_7\tau^2 + b_8\tau + w_9 = 0. \quad (24)$$

Коэффициенты w_i выражаются через коэффициенты a_i и b_i , для их представления необходимо более 100 значащих цифр. Стандартной вычислительной точности, заложенной в языке с++, недостаточно для расчета коэффициентов полинома. В системе компьютерной алгебры Сосоа можно задавать алгебраические структуры с произвольно выделенной памятью для всех содержащихся в ней объектов. Для решения поставленной задачи использовали кольцо с выделенной памятью 1024 байта на одно число, в то время как при типе данных с++ с плавающей точкой long double используется всего 64 байта.

Для поиска начального приближения можно использовать метод Штурма [3], с помощью которого можно точно определить наличие и число вещественных корней, а также

локализовать каждый из них на достаточно малом отрезке.

Каждому решению τ из уравнения 24 соответствуют 2 решения ν из квадратного уравнения 20. Для каждой пары τ и ν можно определить координаты ИРИ, решив линейную систему уравнений 16.

Таким образом, получается несколько наборов решений, одно из которых соответствует истинным координатам ИРИ. За исключением случаев, когда КА движутся в экваториальной плоскости, выделить истинное решение можно с помощью расчета суммарной квадратичной ошибки модели для каждого решения системы уравнений 12.

$$\begin{cases} Er1 = c(t_1 - t) - R_1(\mathbf{x}, \mathbf{s}_1), \\ Er2 = c\left(1 - \frac{f_1}{f}\right) - \frac{(\mathbf{x}-\mathbf{s}_i)^T(\mathbf{x}-\mathbf{s}_i)}{R_i}, \\ Er3 = x^2 + y^2 + z^2 \frac{r_e^2}{r_p^2} - r_e^2. \end{cases} \quad (25)$$

$$Er = \sqrt{Er1^2 + Er2^2 + Er3^2}.$$

Для этого необходимо рассчитать частоту сигнала ИРИ и время излучения сигнала ИРИ с помощью уравнений 2 и 7.

Ниже приведен пример расчета координат для разных точностей измеренных параметров сигнала ИРИ.

Пример расчета координат ИРИ

Для оценки ошибки определения координат ИРИ с вероятностью 0,95 было проведено моделирование приема импульса ИРИ с частотой 1000 МГц с разными ошибками измерения частоты и времени получения сигнала двумя КА. При создании математической модели были использованы следующие параметры:

- максимальные ошибки определения местоположения КА – 30 м по каждой оси, ошибки определения скорости – 0,1 м/с по каждой оси (с вероятностью 0,99);
- ошибки измерения частоты и времени получения сигнала имеют нормальное распределение и задаются максимальными отклонениями с вероятностью $P = 0,95$ (df [Гц] и dt [нс]);
- высота орбиты каждого КА 450 км, они находятся на расстоянии 100 км друг



от друга и на расстоянии 300 км от подспутниковой точки КА до ИРИ.

В таблице 1 приведены результаты работы комбинированного метода: все найденные вещественные корни полинома (24), расчет суммарной квадратичной ошибки и оценка ошибки определения координат ИРИ для каждого из них. Расчет параметров ν и τ , а также коэффициентов, необходимых для решения полинома 24, требует высокоточных вычислений, алгоритм приведен выше.

При использовании РЧМ и РДМ существует неоднозначность, связанная с симметричностью геометрических точек – возможных мест расположения координат ИРИ относительно плоскости орбит КА. В общем случае система уравнений 12 имеет 8 решений, как минимум два из них действительные, одно соответствует координатам ИРИ, а второе – симметричным им «ложным» координатам. Расстояние между истинными и симметричными координатами примерно равно двойному расстоянию от подспутниковой точки КА до ИРИ. В таблице 1 два корня с наименьшей суммарной квадратичной ошибкой

соответствуют истинным и симметричным им ложным координатам ИРИ. Остальные корни исключаются из решения уравнения. При расчете суммарной квадратичной ошибки можно с высокой вероятностью выделить координаты ИРИ, соответствующие истинному решению.

Кроме того, для решения поставленной задачи было проведено непосредственное решение системы 12 численным методом Ньютона. В процессе решения нет возможности выделить все корни системы уравнений, результат во многом зависит от выбора начального приближения. Для моделирования решения задачи численным методом Ньютона начальное приближение выбрано исходя из знания о местоположении ИРИ. Результаты оценки координат численным и комбинированным методами совпадают до 5-й цифры после запятой и приведены в таблице 2.

Для каждого набора ошибок измерения частоты и времени (df , dt) проводилось несколько испытаний, в ходе которых определялись ошибка и правильность определения истинных координат ИРИ. На основании полученных результатов можно рассчитать

Таблица 1

Результаты работы комбинированного метода

Номер корня полинома 24	$\nu = 1 / f$, мкс	$\tau = c \cdot t$, км	Координаты ИРИ, км			Суммарная квадратичная ошибка	Оценка ошибки определения координат ИРИ, км
			X	Y	Z		
1	0,001	299,7920	5971,344	-109,4155	2231,185	2,321032e-09	0,005580
2	0,000999	296,3292	5970,099	-705,1126	2123,910	3,859896e-09	605,2756
3	0,000999	296,3292	5992,781	-73,90431	2246,130	317320,3	44,09535
4	0,000999	299,7921	5951,373	-665,1983	2123,570	279393,8	566,4527
Реперные значения оцениваемых параметров	0,001	299,7924	5971,342	-109,4201	2231,183		

Таблица 2

Результаты оценки координат численным и комбинированным методами

Ошибка измерения частоты, df , Гц	Ошибка измерения времени, dt , нс	Оценка ошибки определения координат ИРИ с $p = 0,95$, df , км	Оценка средней ошибки определения координат ИРИ, d_{rs} , км
10	50	4,23	1,70
10	200	4,17	1,76
10	500	5,75	2,27
20	200	6,67	3,04
20	500	7,36	3,39
20	1000	11,21	4,34
50	50	22,85	8,63
50	1000	24,47	9,39



среднюю (d_{rs}) и максимальную с 95 % вероятностью оценку ошибки определения координат ИРИ (d_r), а также сделать вывод о точности отделения истинных координат ИРИ от симметричных им ложных координат.

В рассчитанной модели оба метода с 95 % вероятностью позволяют отделить истинный корень от симметричного ему ложного корня с помощью вычисления суммарной квадратичной ошибки.

Применение описанных подходов в автоматизированных пунктах обработки и анализа информации

Описанный подход может быть применен при построении современных автоматизированных пунктов обработки и анализа информации космических аппаратов радиоэлектронного наблюдения (РЭН). На основе описанных принципов могут быть разработаны отдельные программные компоненты, с участием которых будут выстроены технологические процессы обработки и анализа информации. Описанные подходы также могут быть внедрены в уже существующие пункты обработки и анализа информации космических аппаратов РЭН для повышения точности определения координат ИРИ. В случае применения на действующем наземном пункте обработки и анализа информации настраиваемой, адаптируемой системы организации и автоматизации технологических процессов для внедрения описанных подходов достаточно разработать и установить на средства обработки информации программный компонент и откорректировать или создать новый технологический процесс обработки информации РЭН.

Выводы

Определить координаты ИРИ с помощью данных, полученных после одного замера параметров сигнала ИРИ двумя КА, можно путем решения нелинейной системы уравнений, в которой содержится информация о времени получения и частоте измеренного

сигнала ИРИ, а также о местоположении каждого КА.

Решить систему можно несколькими методами, у каждого есть свои недостатки и преимущества. Прямые численные методы проще и не требуют значительной вычислительной мощности, но при их использовании возникает сложность в отделении всех корней системы уравнений и в поиске начального приближения. Для численного расчета в нашей работе использован метод Ньютона.

С помощью рассмотренного в нашей работе комбинированного метода можно свести численное решение системы нелинейных уравнений к решению одного полинома 8-й степени. Это значительно упрощает поиск всех корней уравнения, однако требует вычислительной точности более высокой, чем заложено в стандартных средствах программирования.

По результатам моделирования можно сделать вывод, что оба метода позволяют одинаково точно оценить координаты ИРИ, если есть возможность задать достаточно точное начальное приближение для численного метода. Возможность отделить все корни уравнения полинома и определить среди множества решений истинный корень с помощью расчета суммарной квадратичной ошибки делает применение комбинированного метода предпочтительнее.

Список литературы

1. Колесников Н.П., Тищенко В.А., Попов П.Б., Никулина А.Н., Сыроелов Е.М. Квази-разностно-дальномерный метод определения координат источников радиоизлучения // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 10(20). С. 31–38.
2. Mason J. Algebraic two-satellite TOA/FOA position solution on an ellipsoidal Earth // IEEE Transactions and Electronics Systems. 2004. Vol. 40(3). P. 1087–1092.
3. Куликов Л.Я. Алгебра и теория чисел: учеб. пособие для педагогических институтов. М.: Высшая школа, 1979. 559 с.



Об авторах

Никулина Александра Николаевна – ведущий специалист акционерного общества «Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт имени академика А.И. Берга», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: первичная и вторичная обработка радиотехнической информации, методы определения координат источников радиоизлучений.

Попов Павел Борисович – начальник сектора акционерного общества «Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт имени академика А.И. Берга», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: первичная и вторичная обработка радиотехнической информации, методы определения координат источников радиоизлучений.

Подковкин Владимир Андреевич – начальник сектора акционерного общества «Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт имени академика А.И. Берга», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: статистическая обработка и анализ данных радиотехнического наблюдения, методы определения координат источников радиоизлучений.

Николенко Борис Борисович – начальник научно-тематического отдела акционерного общества «Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт имени академика А.И. Берга», Москва, Российская Федерация.

Область научных интересов: создание наземных комплексов для космических систем радиотехнического наблюдения, методы определения координат источников радиоизлучений.



RF emitter geolocation based on a single measurement employing an Earth-referenced two-satellite constellation and high-precision computations

Nikulina A. N., Popov P. B., Podkovkin V. A., Nikolenko B. B.

“Central Research Radio Engineering Institute Named After Academician A. I. Berg”, JSC, Moscow, Russian Federation

The paper describes the solution to the problem of RF emitter geolocation employing a constellation of two satellites with respect to their ballistic trajectories relative to the Earth. The solution is based on data derived from a single measurement of RF emitter signal parameters. The algorithm for solving the problem is presented in detail. The limitations of method application for solving the said problem along with the tools that allow to achieve the desired computational accuracy are considered. An example of RF emitter position calculation based on the algorithm described is given. The developed mathematical model proves the efficiency of the method under consideration.

Keywords: high-precision computations, RF emitter, satellite, geolocation, electronic warfare, range-difference method of geolocation

Information about the authors

Nikulina Aleksandra Nikolaevna – Lead Specialist, “Central Research Radio Engineering Institute Named After Academician A. I. Berg”, JSC, Moscow, Russian Federation.

Science research interests: radar data pre-processing and secondary processing, RF emitter geolocation methods.

Popov Pavel Borisovich – Head of Sector, “Central Research Radio Engineering Institute Named After Academician A. I. Berg”, JSC, Moscow, Russian Federation.

Science research interests: radar data pre-processing and secondary processing, RF emitter geolocation methods.

Podkovkin Vladimir Andreevich – Head of Sector, “Central Research Radio Engineering Institute Named After Academician A. I. Berg”, JSC, Moscow, Russian Federation.

Science research interests: statistical processing and analysis of radar observation data, RF emitter geolocation methods.

Nikolenko Boris Borisovich – Head of Science Research Department, “Central Research Radio Engineering Institute Named After Academician A. I. Berg”, JSC, Moscow, Russian Federation.

Science research interests: development of ground stations for space-based radar observation systems, RF emitter geolocation methods.