

УДК 629.783:004.942

НОВЫЕ МНОГОПОЗИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОГО МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

**О.Д. Будков,
А.Н. Никулина, П.Б. Попов**
АО «Центральный научно-
исследовательский радиотехнический
институт имени академика А.И. Берга»

В настоящее время задачи радиоэлектронного наблюдения с использованием космических аппаратов представляются наиболее актуальными при обеспечении обороноспособности Российской Федерации. Нами были разработаны новые многопозиционные методы, позволяющие определить координаты объектов наблюдения с помощью одного малого космического аппарата вместо баллистически связанный группировки космических аппаратов, что позволит снизить экономические затраты на решение задачи радиоэлектронного наблюдения.

Ключевые слова: многопозиционные методы, РДМ, РЧМ, малый космический аппарат, источник радиоизлучения, эффект Доплера.

SINGLE-SATELLITE GEOLOCATION SYSTEM BASED ON THE NEW MULTI-POSITION METHODS

**O.D. Budkov,
A.N. Nikulina, P.B. Popov**
CENTRAL RESEARCH RADIO ENGINEERING
INSTITUTE NAMED AFTER ACADEMICIAN
A.I. BERG

Currently, the tasks of radio-electronic surveillance using spacecraft seem to be the most urgent in ensuring the defense of the Russian Federation. We have developed new multi-position methods that make it possible to determine the coordinates of objects of observation using a small single-satellite instead of a ballistically linked grouping of spacecraft, which will reduce the economic costs of solving the problem of radio-electronic observation.

Keywords: multi-position methods, range-difference geolocation method, frequency-different geolocation method, small single-satellite, radio emission source, Doppler effect.

DOI: 10.52531/1682-1696-2021-21-4-3-10

ВВЕДЕНИЕ

Основные задачи радиоэлектронного наблюдения (РЭН) заключаются в обнаружении и определении радиотехнических параметров (РТП) сигналов источников радиоизлучения (ИРИ), а также в поиске местоположения и классификации ИРИ. Существует два вида методов определения местоположения ИРИ: пеленгационные и многопозиционные.

С помощью пеленгационных методов по одному обнаруженному сигналу можно определить направление на ИРИ или даже его координаты. Традиционно в отечественных системах РЭН космического базирования для определения местоположения ИРИ используют метод фазовой пеленгации. Главное его преимущество заключается в возможности определения координат ИРИ с довольно высокой точностью по единичному замеру с помощью одного космического аппарата (КА). Однако этот метод обладает рядом

недостатков, к которым можно отнести: (а) большие размеры пеленгационной системы, так как ошибка определения координат обратно пропорциональна соотношению d_{\max}/λ , где d_{\max} – размер максимальной базы фазового пеленгатора, λ – длина волны; (б) необходимость использования баз промежуточной длины для устранения неоднозначности при определении координат. Это приводит к появлению множества идентичных приемных каналов, что, в свою очередь, требует наличия сложной и дорогостоящей аппаратуры, а также высоких энергетических характеристик малого космического аппарата (МКА).

Указанные недостатки делают невозможной реализацию данного метода на базе МКА ввиду ограниченных массогабаритных характеристик.

Многопозиционные (разностно- дальнометрический и разностно-частотный (РДМ и РЧМ)) методы используют, когда необходимо обнаружить и принять сигнал

ИРИ в нескольких разнесенных точках пространства и по разнице измеренных параметров сигнала определить его местоположение. Разница параметров может возникать из-за различных расстояний от ИРИ до точек приема сигнала (РДМ) или вследствие разницы радиальных скоростей ИРИ относительно точек приема (РЧМ). При этом для РЧМ необходимым условием является взаимное перемещение ИРИ и приемников, что может быть обусловлено движением ИРИ (например, ИРИ авиационного базирования) и приемной аппаратуры, установленной на КА.

При использовании многопозиционных методов для определения координат ИРИ требуется статистическая обработка обширной информации, полученной в сеансе наблюдения, что не всегда возможно на борту КА, поэтому обработку приходится проводить на Земле по завершении сеанса наблюдения.

Основной недостаток многопозиционных методов – необходимость одновременного приема сигнала одного и того же ИРИ в нескольких разнесенных точках пространства, что подразумевает создание орбитальной баллистически связанный группировки из нескольких КА.

В рамках исследований, с целью модернизации существующих и разрабатываемых новых космических систем РЭН, была проведена доработка РДМ и РЧМ определения координат ИРИ, позволяющая применить эти методы для решения задачи радиоэлектронного наблюдения с использованием одного МКА.

КВАЗИ-РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫЙ МЕТОД (КВАЗИ-РДМ) ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИРИ

Применить РДМ напрямую при определении координат ИРИ с помощью одного КА невозможно, так как в разные моменты времени поступают разные импульсы ИРИ. Однако, если известно, что импульсы периодические, можно использовать эту информацию для определения разностей расстояний, пройденных сигналом от ИРИ до КА в разные моменты времени, и вычисления координат ИРИ.

Рассмотрим простейший случай определения координат ИРИ от радиолокационной станции (РЛС) с периодическим импульсным сигналом с помощью квази-РДМ на одном КА. Пусть на трех соседних перестройках частоты в моменты на этом КА были приняты повторяющиеся с периодом T импульсы ИРИ.

Введем следующие обозначения:

t_i – моменты времени приема импульсов, $i=1,2,3$;

$\vec{p}_i(x_p, y_p, z_p)$ – вектор координат КА в i -й момент времени, $i=1,2,3$; $\vec{q}(x, y, z)$ – вектор координат РЛС; $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ – измеренные разности времен приема импульсов, $i=1,2$; $\vec{r} = \vec{q} - \vec{p}_i$ – вектор цели КА-РЛС в i -й момент времени, $i=1,2,3$;

$\Delta t' = \frac{(\|\vec{r}_{i+1}\| - \|\vec{r}_i\|)}{c}$ – разность времен распространения сигнала от РЛС до точек \vec{p}_i и \vec{p}_{i+1} , $i=1,2$;

Поверхность Земли аппроксимируем сферой с центром в точке $O(0,0,0)$ и радиусом R_3 и описываем следующим выражением [3]:

$$R_3 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1)$$

Взаимное расположение КА и ИРИ в моменты времени t_1, t_2 и t_3 приведено на рис. 1.

На рис. 2 показано расположение во времени принятых и восстановленных импульсов РЛС.

Из рис. 2 видно, что:

$$\Delta t'_1 = \Delta t_1 - M_1 T, \quad (2)$$

$$\Delta t'_2 = \Delta t_2 - M_2 T. \quad (3)$$

Тогда система уравнений для определения координат ИРИ с помощью квази-РДМ и выражения $\|r_i\|$ через координаты КА и ИРИ, уравнение поверхности Земли (1), будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta t'_1 c &= \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} - \\ &- \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \\ \Delta t'_2 c &= \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} - \\ &- \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

$$R_3 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Геометрически первые два уравнения системы 4 являются уравнениями двуполостных гиперболоидов вращения, третье – уравнением сферы, а решения системы – точки пересечения трех указанных фигур. Стоит заметить, что для ИРИ, расположенных близко к следу орбиты КА, гиперболоиды будут пересекаться под очень малым углом, а значит, влияние ошибки определения Δt_i на точность определения координат ИРИ в этом случае будет значительно больше.

Если известно, что $-0,5T < \Delta t'_1 < 0,5T$, значения N_1 и N_2 можно вычислить по формулам

$$M_1 = r \text{round}\left(\frac{\Delta t_1}{T}\right), \quad (5)$$

$$M_2 = r \text{round}\left(\frac{\Delta t_2}{T}\right), \quad (6)$$

где $\text{round}()$ – оператор округления до ближайшего целого числа.

Точность определения координат ИРИ зависит от точности измерения координат КА \vec{p}_i , разностей времен прихода сигналов Δt_i и периода следования импульсов ИРИ. Кроме того, основным отличием квази-РДМ от РДМ является невозможность приема в разных точках пространства одного и того же фрагмента сигнала ИРИ, что не позволяет использовать квази-РДМ для определения координат ИРИ, чьи сигналы не имеют стабильного периода повторения. Это значит, что для применения квази-РДМ необхо-

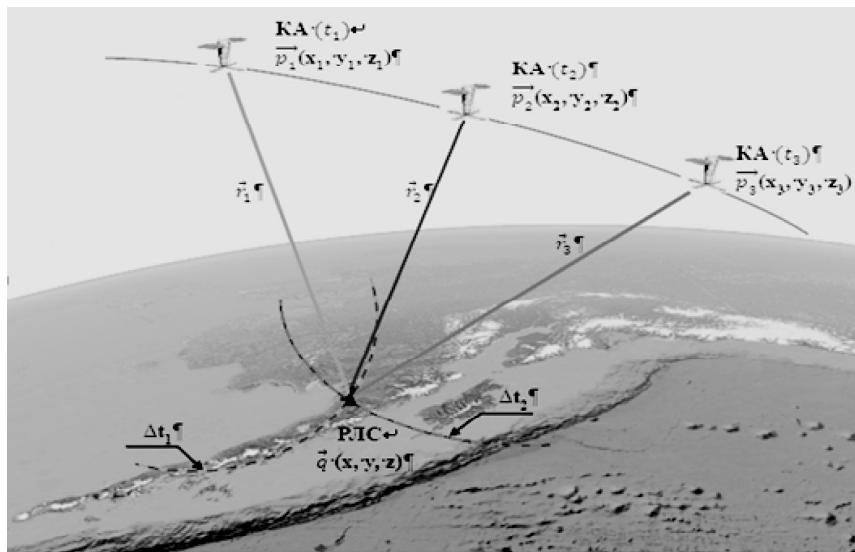


РИС. 1.

Взаимное расположение КА и ИРИ в моменты времени t_1 , t_2 и t_3

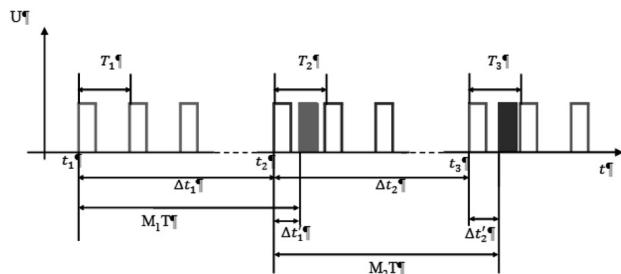


РИС. 2.

Принятые и восстановленные импульсы РЛС

димо наличие высокостабильного периода излучения сигнала (импульса), который может быть с высокой достоверностью выделен на фоне помех и сигналов других ИРИ.

Достоинство этого метода заключается в независимости точности определения координат ИРИ от значения частоты сигнала.

Разностно-частотный (доплеровский) метод (РЧМ) определения координат ИРИ основан на влиянии эффекта Доплера на частоту принимаемого сигнала ИРИ, который возникает в результате относительного движения между космическим аппаратом (КА) и источником излучения. Мгновенная частота сигнала определяется следующим образом [2]:

$f = f_0 + f_d$, где f_0 – собственная частота изучаемого ИРИ сигнала, f_d – поправка к частоте, возникающая из-за действия эффекта Доплера:

$$f_d = -f_0 \frac{v_r(t)}{c}; \quad (7)$$

$v_r(t)$ – радиальная составляющая вектора скорости КА относительно ИРИ, c – скорость света.

Рассмотрим простейший случай определения ко-

ординат ИРИ высокостабильного немодулированного сигнала с частотой f_0 , с помощью РЧМ на одном КА. Тогда пусть на трех соседних перестройках частоты на этом КА были приняты сигналы ИРИ.

Введем следующие обозначения:

f_i – частоты принятых импульсов, $i=1,2,3$;
 $\vec{v}_i(vx_i, vy_i, vz_i)$ – вектор скорости КА в момент времени t_i , $i=1,2,3$;

$\Delta f_i = f_{i+1} - f_i$ – измеренные разности частот принятых импульсов, $i=1,2$.

Поверхность Земли аппроксимируем сферой с центром в точке $O(0,0,0)$ и радиусом R_s и описываем формулой (1). Взаимное расположение КА и ИРИ в моменты времени t_1 , t_2 и t_3 приведено на рис. 3.

Выразим отношение частоты Доплера к частоте сигнала ИРИ (относительную частоту Доплера):

$$\frac{f_i}{f_0} = 1 - \frac{v_i(x_i - x) + v_i(y_i - y) + v_i(z_i - z)}{c \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}} \quad (8)$$

Тогда

$$\gamma_i = \frac{\Delta f_i}{f_0} = \frac{v_i(x_i - x) + v_i(y_i - y) + v_i(z_i - z)}{c \|r_i\|} - \frac{v_{i+1}(x_{i+1} - x) + v_{i+1}(y_{i+1} - y) + v_{i+1}(z_{i+1} - z)}{c \|r_{i+1}\|} \quad (9)$$

Объединив формулы (9) для $i=1$ и $i=2$, уравнение поверхности Земли (1) и подставив выражение для $\|r_i\|$, получим следующую систему уравнений для поиска неизвестных координат ИРИ (x, y, z) :

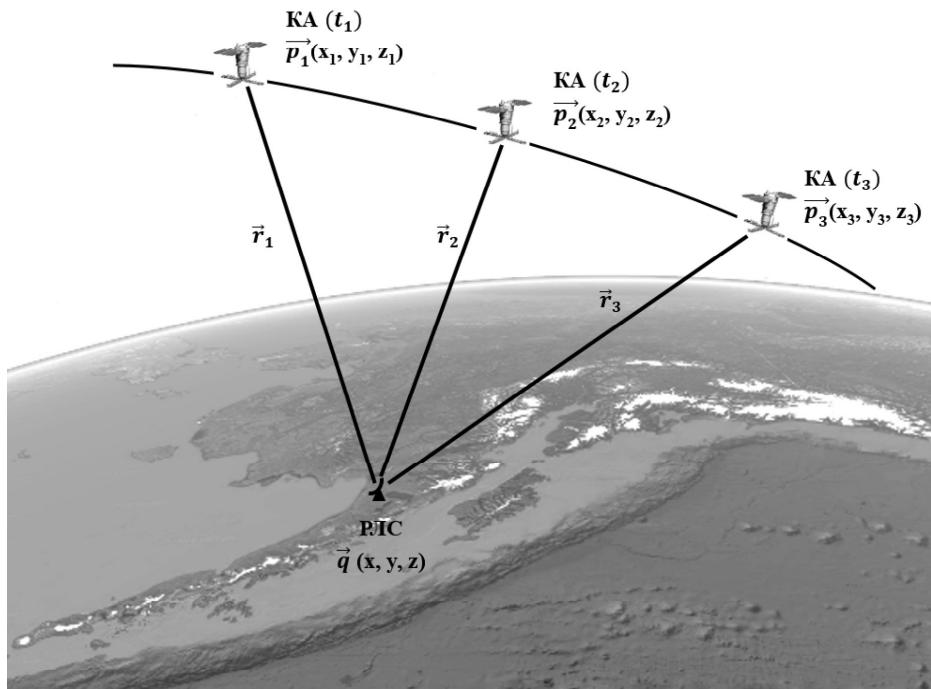


РИС. 3.

Взаимное расположение КА и ИРИ в моменты времени t_1 , t_2 и t_3

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta f}{f} = \frac{v x_1(x - x) + v y_1(y - y) + v z_1(z - z)}{c \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2}} - \\ - \frac{v x_2(x_2 - x) + v y_2(y_2 - y) + v z_2(z_2 - z)}{c \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2}} \\ \\ \frac{\Delta f}{f} = \frac{v x_2(x_2 - x) + v y_2(y_2 - y) + v z_2(z_2 - z)}{c \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2}} - \quad (10) \\ - \frac{v x_3(x_3 - x) + v y_3(y_3 - y) + v z_3(z_3 - z)}{c \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2}} \end{array} \right.$$

$$R_3 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Значения Δf_1 и Δf_2 могут быть вычислены либо непосредственно с помощью обработки оцифрованных сигналов, принятых в разные моменты времени, либо по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta f_1 &= f_2 - f_1; \\ \Delta f_2 &= f_3 - f_2. \end{aligned}$$

Точность определения координат ИРИ зависит от точности измерения координат КА \vec{p}_v , скоростей КА \vec{v}_v , разностей частот сигналов Δf_v , а также от точности оценки частоты излучения ИРИ f_v .

Основной особенностью применения РЧМ на одном МКА является невозможность приема в разных точках пространства одного и того же сигнала (импульса) ИРИ, что не позволяет использовать РЧМ для определения координат ИРИ, чьи сигналы не обладают неизменной во времени частотой излучения.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КВАЗИ-РДМ И РЧМ

При использовании многопозиционных методов определения координат очень важно верно идентифицировать сигналы от одного ИРИ после их приема бортовой аппаратурой радиоэлектронного наблюдения (БА РЭ). При ложной идентификации есть вероятность вычислить значение Δt_i или Δf_i между сигналами, принятыми от разных ИРИ, и, соответственно, получить недостоверные координаты.

Кроме того, при использовании РЧМ и квази-РДМ существует неоднозначность, связанная с симметричностью геометрических точек – возможных мест расположения координат ИРИ относительно плоскости орбит КА. На рис. 4 показаны «линии положения», соответствующие квази-РДМ и РЧМ.

При использовании эллипсоида в качестве модели поверхности Земли условие симметричности выполняется неточно. Однако с учетом ошибок измерения и различных высот ИРИ относительно эллипсоида при статистической обработке «ложный» корень может быть выбран по методу наименьших квадратов. Для устранения такой неоднозначности необходима дополнительная информация о местоположении ИРИ, которая может быть получена, например, от пеленгатора (фазового или амплитудного) даже с невысокой точностью. Неоднозначность может быть устранена и при совместной обработке нескольких сеансов наблюдения за одним районом.

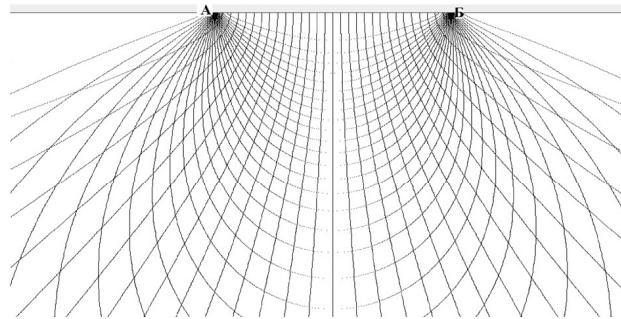


РИС. 4.

Геометрическое место наземных точек возможного расположения сигнала ИРИ относительно плоскости орбит КА, определенных с помощью РЧМ и квази-РДМ

ОЦЕНКА ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОПОЗИЦИОННЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ИРИ НА ОДНОМ МКА

Оценка точности определения координат ИРИ с помощью квази-РДМ и РЧМ

Для оценки точностных характеристик определения координат многопозиционными методами была разработана модель, состоящая из:

- алгоритмов и программ моделирования движения МКА;
- алгоритмов и программ моделирования информации, получаемой от БА РЭН в ходе сеанса наблюдения за ИРИ;
- алгоритмов и программ реализации определения координат ИРИ квази-РДМ и РЧМ.

Поскольку упор сделан именно на проверку методов определения координат ИРИ, вопросы идентификации сигналов от одного ИРИ и энергетической доступности (вероятности обнаружения сигналов) в данной модели не рассматривались. Таким образом, при моделировании считается, что входными данными метода определения координат является массив достоверной информации от одного источника излучения.

Будем считать, что ошибки измерения разности времен получения сигнала имеют нормальное распределение и задаются максимальными отклонениями с вероятностью $p = 0,95$ (dt [нс]).

Для оценки ошибки определения координат ИРИ с вероятностью 0,95 было проведено моделирование приема соответствующих импульсов ИРИ с периодом следования $T=2500$ мкс. Темп перестройки БА РЭН выбран равным 2 с. Длительность сеанса наблюдения 600 с. Результаты моделирования приведены в табл. 1.

На основании результатов, приведенных в табл. 1, можно сделать вывод, что для темпа перестройки БА РЭН 2 с., длительности сеанса наблюдения 10 мин ошибка с вероятностью, равной 0,95 определения координат ИРИ не более 1 км, обеспечивается для следующих ошибок определения разностей времен dt :

для $dt = 200$ нс в зоне $d = 50\text{--}200$ км;

для $dt = 150$ нс в зоне $d = 50\text{--}400$ км;

для $dt = 100$ нс в зоне $d = 50\text{--}550$ км;

для $dt = 50$ нс в зоне $d = 20\text{--}900$ км.

Для оценки ошибки определения координат ИРИ с вероятностью 0,95 было проведено моделирование приема импульсов ИРИ с частотой 1000 МГц. Темп перестройки БА РЭН выбран равным 2 с. Длительность сеанса наблюдения 600 с. Результаты моделирования приведены в табл. 2.

На основании результатов, приведенных в табл. 2, можно сделать вывод, что для темпа перестройки БА РЭН 2 с., длительности сеанса наблюдения 10 мин ошибка с вероятностью, равной 0,95 определения координат ИРИ не более 1 км, обеспечивается для следующих ошибок определения разностей частот df :

для $df = 10$ Гц в зоне $d = 100\text{--}1000$ км;

для $df = 20$ Гц в зоне $d = 200\text{--}900$ км.

Стоит отметить, что для каждого из методов определения местоположения при уменьшении расстояния между ИРИ и следом орбиты менее $d = 50$ км ошибка определения координат начинает существенно возрастать.

Оценка зависимости точности определения координат ИРИ от длительности наблюдения

Для оценки зависимости точности определения координат ИРИ от длительности наблюдения было проведено моделирование определения координат ИРИ многопозиционными методами с использованием одного МКА при различных длительностях сеансов наблюдения БА РЭН.

Результаты оценки ошибки определения координат ИРИ каждым методом по результатам моделирования приема импульсов ИРИ с частотой 1000 МГц и периодом следования импульсов $T=2500$ мкс при темпе перестройки БА РЭН 2 с и расстоянии от следа орбиты 300 км приведены в табл. 3.

На основании результатов, приведенных в табл. 3, можно сделать вывод, что точности определения координат ИРИ двумя методами значительно зависят от длительности сеанса наблюдения, однако квази-РДМ более чувствителен к длительности сеанса наблюдения. Для получения максимальной точности определения координат ИРИ необходимо выбирать максимально возможную длительность сеанса наблюдения за ИРИ (не менее 600 с).

Оценка зависимости точности определения координат ИРИ от интервала между наблюдениями сигналов ИРИ

В табл. 4 приведены результаты моделирования определения координат ИРИ для различных вариантов длительности перестройки БА РЭН при использовании квази-РДМ и РЧМ на одном МКА. Длительность сеанса наблюдения составила 600 с, расстояние от следа орбиты МКА до ИРИ 300 км.

ТАБЛИЦА 1.

Ошибка определения координат ИРИ в зависимости от расстояния на траверзе между следом орбиты КА и ИРИ с помощью квази-РДМ

Ошибка с р = 0,95 определения разности времени dt, [нс]	Ошибка определения координат ИРИ (dr, [км]), с вероятностью 0,95 при расстоянии на траверзе между следом орбиты и ИРИ (d [км])											
	d=20	d=50	d=100	d=200	d=300	d=400	d=500	d=600	d=700	d=800	d=900	d=1000
dt = 200	2,11	0,82	0,64	0,78	0,77	0,91	0,87	0,91	1,13	1,23	1,46	1,75
dt = 150	1,59	0,63	0,53	0,48	0,42	0,47	0,64	0,77	0,74	1,02	1,17	1,26
dt = 100	1,48	0,63	0,48	0,45	0,37	0,34	0,52	0,65	0,72	0,62	0,77	0,85
dt = 50	1,26	0,62	0,28	0,24	0,33	0,34	0,26	0,25	0,32	0,41	0,46	0,49

ТАБЛИЦА 2.

Ошибка определения координат ИРИ в зависимости от расстояния на траверзе между следом орбиты КА и ИРИ с помощью РЧМ

Ошибка с р = 0,95 определения разности частот df, [Гц]	Ошибка определения координат ИРИ (dr, [км]) с вероятностью 0,95, при расстоянии на траверзе между следом орбиты и ИРИ (d [км])											
	d=20	d=50	d=100	d=200	d=300	d=400	d=500	d=600	d=700	d=800	d=900	d=1000
df = 100	7,06	6,93	5,07	2,78	2,63	2,58	2,83	2,89	3,65	4,18	4,52	5,28
df = 50	6,96	6,08	3,03	1,75	1,66	1,45	1,50	1,63	1,74	1,96	2,16	2,35
df = 20	5,05	2,02	0,98	0,67	0,62	0,54	0,61	0,66	0,79	0,74	0,77	0,89
df = 10	3,37	1,26	0,89	0,67	0,57	0,17	0,48	0,51	0,42	0,46	0,57	0,52

ТАБЛИЦА 3.

Ошибка определения координат ИРИ в зависимости от длительности сеанса наблюдения с помощью РЧМ и квази-РДМ

Метод определения координат и ошибки определения частоты (df) и периода (dt)	Ошибка определения координат ИРИ (dr, [км]) с вероятностью 0,95, при длительности сеанса наблюдения (θ [с])			
	$\theta = 600$	$\theta = 400$	$\theta = 300$	$\theta = 200$
РЧМ, df = 10 Гц	0,361	0,410	0,381	0,478
Квази-РДМ, dt = 50 нс	0,331	0,454	0,593	1,346
РЧМ, df = 50 Гц	1,250	1,537	1,297	1,763
Квази-РДМ, dt = 100 нс	0,418	0,579	1,606	2,269
РЧМ, df = 100 Гц	1,991	2,383	2,563	2,902
Квази-РДМ, dt = 150 нс	0,565	0,968	1,721	2,425

На основании результатов, приведенных в табл. 4, можно сделать вывод, что чем больше длительность перестройки БА РЭН, тем лучше работает РЧМ.

Чем длительнее перестройки t, тем больше абсолютная величина разностей частот сигналов ИРИ Δf_i , соответственно, меньше относительных ошибок определения (измерения) разностей частот.

Это можно использовать, искусственно проре-

жая замеры для более точного вычисления координат ИРИ с помощью РЧМ.

На основании результатов, приведенных в табл. 4, можно сделать вывод, что увеличение временного интервала между наблюдениями сигналов ИРИ уменьшает точность определения координат ИРИ с помощью квази-РДМ и повышает ее при использовании РЧМ. Это необходимо учесть при дальнейшей разработке

ТАБЛИЦА 4.

Ошибка определения координат ИРИ в зависимости от интервала между наблюдениями с помощью РЧМ и квази-РДМ

	Ошибка определения координат ИРИ (dr , [км]) с вероятностью 0,95, при интервале между наблюдениями (τ [с])		
	$\tau = 2$	$\tau = 4$	$\tau = 6$
Метод определения координат и ошибки определения частоты (df) и периода (dt)			
РЧМ, $df = 10$ Гц	0,617	0,348	0,331
Квази-РДМ, $dt = 50$ нс	0,331	0,493	0,881
РЧМ, $df = 50$ Гц	0,952	0,572	0,514
Квази-РДМ, $dt = 100$ нс	0,418	0,581	1,525
РЧМ, $df = 100$ Гц	1,229	0,840	0,716
Квази-РДМ, $dt = 150$ нс	0,565	0,882	2,741

алгоритма определения координат с помощью РЧМ и рассмотреть варианты вычисления разностей частот не между соседними сигналами (например, с прореживанием).

ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФАЗОВОГО ПЕЛЕНГАТОРА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ НА ОДНОМ МКА

Общая проблема для рассмотренных методов определения координат – идентификация сигналов ИРИ, то есть формирование из массива сигналов, принятых БА РЭН на протяжении всего сеанса наблюдения, группы сигналов одного ИРИ. Эта проблема особенно актуальна при космическом РЭН, когда зона обзора сравнительно велика (несколько тысяч километров в радиусе), а наблюдаемое радиоэлектронное поле плотное (над большинством густонаселенных участков развитых стран и активными морскими или воздушными транспортными маршрутами).

При таких условиях высока вероятность одновременного приема сигналов нескольких различных однотипных ИРИ, близких по значениям РТП (такие ИРИ могут находиться вне зоны радиовидимости друг друга и даже иметь одинаковые РТП сигналы).

При отсутствии пеленгатора идентификация сигналов на принадлежность одному ИРИ может проводиться только по частоте, длительности, модуляции и т.д., что ведет к перемешиванию сигналов, принятых БА РЭН от различных ИРИ, а значит, к ошибкам и ложному определению координат. Использование в качестве вспомогательного пеленгационного метода (фазового или амплитудного), даже низкоточного, поможет значительно повысить вероятность правильной идентификации сигналов ИРИ, уменьшить количество ошибок определения его координат и минимизировать число случаев их ложного определения.

С целью оценки вероятности правильной идентификации сигналов ИРИ и влияния на нее наличия фазового пеленгатора был разработан ряд моделей:

- исходной информации, получаемой от БА РЭН;
- радиоэлектронной обстановки;
- идентификации сигналов ИРИ только по РТП сигналов, и по РТП сигналов и информации грубого фазового пеленгатора;
- алгоритмов и программ оценки вероятности правильной идентификации ФС с ИРИ.

С их использованием было проведено моделирование, по результатам которого можно сделать следующие выводы:

- наличие информации однобазового фазового пеленгатора в виде разностей фаз позволяет значительно (до двух раз) повысить вероятность правильной идентификации сигналов от одного ИРИ;
- размеры базы в пределах $d/\lambda = 1,5..11,5$ и направление оси пеленгатора незначительно влияют на вероятность правильной идентификации сигналов от одного ИРИ.

Кроме того, на основе проведенного расчета точностных характеристик квази-РДМ и РЧМ потребность в использовании фазового пеленгатора определяется следующими факторами:

- необходимостью повышения вероятности правильной идентификации сигналов ИРИ;
- необходимостью исключения ложных координат ИРИ, образующихся из-за симметричности возможного местоположения координат ИРИ относительно плоскости орбит МКА;
- необходимостью исключения из рассмотрения зоны менее 50 км от следа орбиты в виду резкого возрастания в ней ошибок определения координат ИРИ;
- необходимостью ограничения зоны определения координат ИРИ при применении рассмотренных алгоритмов с целью повышения быстродействия.

Согласно указанным факторам требования к пеленгатору следующие [1]:

- ошибка определения координат в подспутниковой точке должна составлять не более 50 км с вероят-

ностью 0,95;

- ось пеленгатора должна располагаться перпендикулярно направлению движения МКА;
- по возможности пеленгатор должен обеспечивать однозначное определение координат ИРИ хотя бы по одной координате.

Таким образом, для эффективного использования приведенных методов на МКА требуется фазовый пеленгатор с размерами баз d/λ порядка 5, например, для двухбазового однокоординатного фазового пеленгатора с размерами баз $d_1 = 2\lambda$ и $d_2 = 5,5\lambda$ либо однобазовый фазовый пеленгатор с соотношением d/λ порядка 1,5..2.

Выводы

Реализация рассмотренных многопозиционных методов определения координат ИРИ с достаточной точностью теоретически возможна на одном МКА, однако это связано с высокими требованиями относительно точности определения разностей времен поступления и частот сигналов. Также при реализации невозможно полностью отказаться от фазового (или другого) пеленгатора, однако требования к его построению гораздо менее жесткие, чем к пеленгаторам, используемым в качестве единственного способа определения координат.

Следует отметить, что для применения многопозиционных методов определения местоположения необходимо не только обнаружить сигналы ИРИ, но и принять их в достаточном количестве за сеанс наблюдения. Согласно результатам предварительного моделирования необходимая точность и даже сама возможность определения местоположения будет обеспечена только для ИРИ с мощностью излучения в пять раз больше, чем достаточно для их обнаружения (единичного приема сигнала за сеанс наблюдения).

Предложенные методы определения координат ИРИ будут использованы в работах, проводимых АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга», и проверены в реальных условиях на экспериментальных изделиях. Использование нашей разработки позволит создать высокоэффективные перспективные системы радиоэлектронного наблюдения со значительным сокращением экономических затрат на их создание. По квази-РДМ зарегистрирован патент №2734108.

Литература

1. Денисов В.П, Дубинин Д.В. Фазовые радиопеленгаторы: Монография. Томск: ТУСУР, 2–2.
2. Радиолокационные системы. Учебник / под общ. ред. В.П. Бердышева. Красноярск: СФУ, 2012, 402 с.
3. Шалыгин А.С., Санников В.А., Петрова И.Л. Баллистика космических аппаратов. Санкт-Петербург, 2006, 131 с.

Будков Олег Дмитриевич,
заместитель начальника тематического отдела АО «Центрального научно-исследовательского радиотехнического института имени академика А.И. Берга»

✉ тел.: +7(499) 263-92-59, e-mail: olegbudkov@yandex.ru

Никулина Александра Николаевна,
ведущий специалист АО «Центрального научно-исследовательского радиотехнического института имени академика А.И. Берга»

✉ тел.: +7(499) 263-96-56, e-mail: alex.post-x@yandex.ru

Попов Павел Борисович,
начальник сектора АО «Центрального научно-исследовательского радиотехнического института имени академика А.И. Берга»,

✉ 107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 20, стр.9
107078, Moscow, Novaya Basmannaya, 20/9
тел.: +7(499) 263-94-68, e-mail: paborpop@gmail.com