

УДК 621.396.969.11

В.А. Громов, Е.П. Ворошилин, М.В. Миронов

Оценка разности моментов прихода сигнала группировкой пространственно-разнесенных малых космических аппаратов

Исследован алгоритм оценки разности моментов прихода сигнала пространственно-разнесенными малыми космическими аппаратами. Проведено статистическое моделирование алгоритма оценки разности моментов прихода, предложены способы повышения точности оценки.

Ключевые слова: источник радиоизлучения, малый космический аппарат, погрешность определения координат, разность моментов прихода сигнала, моделирование.

В настоящие дни все больше разрабатываются и применяются активные радиолокационные средства радиомониторинга земной поверхности, размещаемые на космических аппаратах (КА). Однако активное однопозиционное или многопозиционное радиолокационное наблюдение с использованием космических аппаратов не позволяет решать специфические задачи обнаружения и определения координат источников радиоизлучения (ИРИ), которые могут быть замаскированы или по другим причинам недоступны для радиолокационного наблюдения.

Перспективным направлением космического радиомониторинга и контроля радиоэлектронной обстановки Земли является создание пассивной спутниковой системы радиомониторинга с применением космических аппаратов. Данная система позволит производить контроль с целью выявления несанкционированных источников излучения [1, 2], проверку соблюдения технических ограничений на параметры излучающей аппаратуры, поиск и местоопределение излучателей в случаях аварийных ситуаций, для обеспечения безопасности движения воздушных судов и т.п. Отдельной и важной областью применения подобной системы мониторинга радиоизлучений является радиоразведка в случаях военных конфликтов или для борьбы с терроризмом [3].

Космический сегмент подобной пассивной спутниковой системы радиомониторинга с применением МКА [4] может включать группировки низкоорбитальных МКА-ретрансляторов (с высотой орбиты порядка 1500 км) для реализации разностно-дальномерного и разностно-доплеровского метода в распределенной многопозиционной системе определения координат ИРИ с высокой точностью. Также сегмент включает несколько КА на высокоэллиптических орбитах для выполнения общего обзора зоны мониторинга, решения задач обнаружения, выбора ИРИ для их дальнейшего анализа, выдачи целеуказаний группировкам МКА, обработки данных с МКА и передачи результатов в наземный центр обработки. В наземном центре решаются задачи определения координат, оптимальной фильтрации, идентификации и завязки траекторий. Координаты ИРИ вычисляются разностно-дальномерным методом (РДМ) по измеренным разностям моментов прихода сигнала [5, 6]. На рис. 1 изображены примерные орбиты движения КА и диаграммы направленности их антенн. Благодаря совместной обработке информации о каждом объекте, получаемой в разнесенных точках пространства, достигается высокая точность определения координат.

Требуемая погрешность вычисления координат ИРИ в подобной системе находится в пределах нескольких сотен метров. Это накладывает следующие ограничения на точность измерения разности моментов прихода [4]:

– среднеквадратичная погрешность определения координат МКА-ретрансляторов не должна превышать 25 м;

– среднеквадратичная погрешность оценки времени задержки сигналов на МКА-ретрансляторы не должна превышать 30 нс.

Значения погрешности определения координат МКА-ретрансляторов могут быть обеспечены путем их высокоточной привязки с помощью космической радионавигационной системы ГЛОНАСС.

В статье рассматривается задача обеспечения требуемых значений среднеквадратичной погрешности оценки разности моментов прихода сигнала МКА-ретрансляторами.

Точность измерения разностей моментов прихода будет в основном зависеть от:

– отношения сигнал/шум принимаемых сигналов;

– синхронизации шкалы времени в каждом МКА;

– величины доплеровского смещения частоты сигнала, вызванного движением МКА.

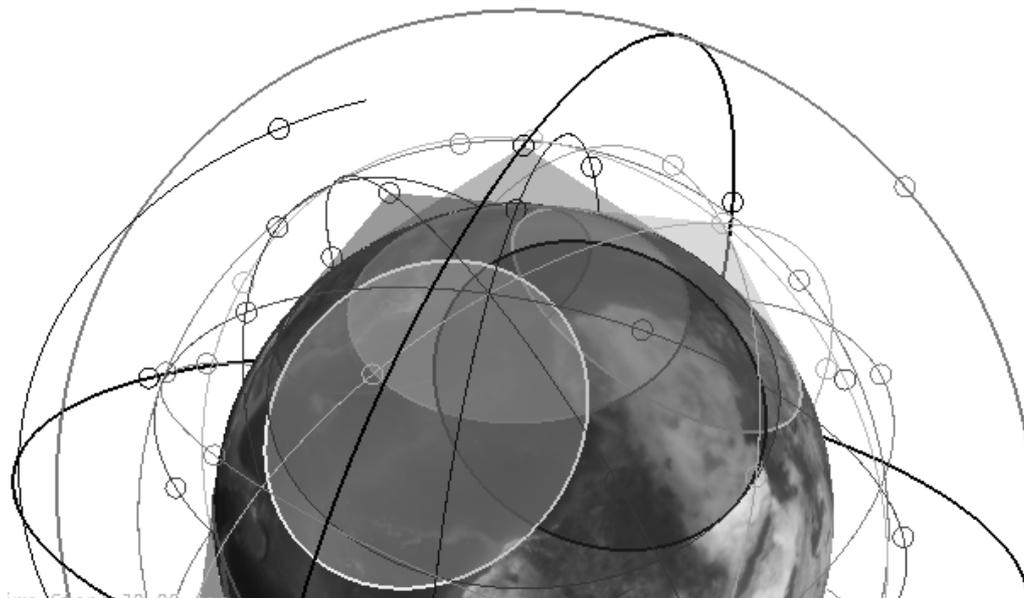


Рис. 1. Космический сегмент пассивной спутниковой системы радиомониторинга

Принимаемый МКА сигнал можно записать следующим образом [7]:

$$s(t) = s_{\text{изл}}(t) + n(t), \quad (1)$$

где $s_{\text{изл}}(t)$ – излученный ИРИ сигнал; $n(t)$ – аддитивный гауссовский шум.

Такая модель сигнала является несколько упрощенной, но в то же время может быть использована при расчетах космических систем, потому что при распространении под большими углами к горизонту практически отсутствуют отраженные сигналы, а возмущения, вызванные влиянием канала распространения, можно ввести в $n(t)$.

Определение разности моментов прихода $\Delta\tau_i$ сигналов на МКА-ретрансляторы в таком случае может быть вычислено путем их взаимно-корреляционной обработки [8]. При этом оценка $\Delta\tau_i^*$ поступления радиосигнала в две пространственно-разнесенные точки соответствует положению максимума модуля взаимно-корреляционной функции (ВКФ) сигналов, принятых в этих точках. Таким образом, для сигналов, зарегистрированных двумя пространственно-разнесенными МКА, можно записать:

$$\Delta\tau_i^* = \max(|R_i(\tau)|), \quad (2)$$

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T s_1(t)s_2(t+\tau)dt, \quad (3)$$

где T – длительность записи сигнала; $s_1(t)$, $s_2(t)$ – нормированные по средней мощности сигналы ИРИ, принятые первым и вторым МКА.

Поскольку МКА перемещаются по орбитам с высокой скоростью (при высоте 1500 км радиальная скорость порядка 7 км/с), то будет наблюдаться доплеровское смещение частоты принимаемых сигналов.

Доплеровское смещение частоты, вносимое за счет движения МКА по орбите, при неподвижном ИРИ описывается выражением

$$f_d = f \left(1 \pm \left(\frac{v_i}{c} \right) \right), \quad (4)$$

где f – частота сигнала ИРИ; v_i – скорость i -го МКА-ретранслятора; c – скорость распространения радиоволн в свободном пространстве.

Поскольку большинство современных устройств обработки сигналов являются цифровыми, то запишем формулу для вычисления взаимно-корреляционной функции дискретных сигналов, которая имеет вид

$$R_{12}(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_1(k)x_2(k+j), \quad (5)$$

где N – количество отсчетов сигналов $x_1(k), x_2(k)$; j – сдвиг одного сигнала относительно другого.

Расчет взаимно-корреляционной функции можно ускорить, используя теорему о корреляции, которая формулируется следующим образом [9]:

$$R_{12}(j) = \frac{1}{N} F_D^{-1} \left[X_1^*(k) X_2(k) \right], \quad (6)$$

где $X_1(k), X_2(k)$ – быстрое преобразование Фурье (БПФ) сигналов $x_1(k), x_2(k+j)$; F_D^{-1} – обратное быстрое преобразование Фурье; N – количество отсчетов сигнала.

Данный подход требует выполнения двух прямых БПФ и одного обратного БПФ. Если количество отсчетов сигналов достаточно велико, метод быстрого вычисления корреляции позволяет получить результат с меньшими вычислительными затратами, чем непосредственный расчет по формуле (5).

Для исследования степени влияния различных факторов на точность оценки разности моментов прихода сигналов нами было проведено математическое моделирование в среде MATLAB. Цель моделирования – получить статистические характеристики разностей моментов прихода для случая приема сигнала от ИРИ двумя пространственно-разнесенными МКА.

При моделировании частота сигнала ИРИ выбиралась в диапазоне от 100 МГц до 20 ГГц. Результаты, приведенные в статье, были получены при несущей частоте сигнала 1 ГГц. Моделируя супергетеродинный приемник, осуществлялся перенос сигнала на промежуточную частоту, равную 10 МГц. Затем производилась дискретизация сигнала с частотой взятия отсчетов, равной 40 МГц. ВКФ двух сигналов вычислялась по формуле (6), а разность моментов прихода сигналов оценивалась по формуле (7):

$$\Delta t_i^* = \frac{R_{12}(j) - N}{fd}, \quad (7)$$

где $R_{12}(j)$ – взаимно-корреляционная функция сигналов; N – количество отсчетов сигналов; fd – частота дискретизации сигналов.

Истинное значение времени задержки сигнала между двумя МКА было задано равным 10 мкс. Огибающая сигнала сформирована с помощью оператора *tukeywin* [10]. Алгоритм вычисления *tukeywin*(L, r) следующий:

$$w(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2 \cdot \pi (t-1)}{r \cdot L} - \pi \right) \right], & 0 < t < \frac{r \cdot L}{2} + 1; \\ 1, & \frac{r \cdot L}{2} + 1 \leq t \leq L - \frac{r \cdot L}{2}; \\ \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{2 \cdot \pi (t-1)}{r \cdot L} - \pi \right) \right], & L - \frac{r \cdot L}{2} < t, \end{cases} \quad (8)$$

где L – длительность сигнала; r – коэффициент, характеризующий крутизну фронта импульса. Значению коэффициента r , равному нулю, соответствует прямоугольный импульс, равному единице – гауссовский импульс.

Модель сигнала на выходе приемника можно записать следующим образом:

$$s(k) = w(k) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \Delta f \cdot k \cdot \Delta t) + n(k), \quad (9)$$

где $w(k)$ – функция огибающей сигнала; $\Delta f = f_s - f_g + f_{\text{Д}}$ – частота сигнала на выходе приемника; f_s – несущая частота сигнала; f_g – частота гетеродина; $f_{\text{Д}}$ – доплеровское смещение частоты; $n(k)$ – дельта-коррелированный гауссовский шум.

Доплеровский сдвиг частоты вводится в сигнал ИРИ с использованием формулы (4). Изменение скорости, приводящее к смещению частоты сигнала ИРИ, вводили в выражение (4) как случайный процесс с равномерным законом распределения, в пределах от -5 до 5 км/с. Если МКА движется по орбите по направлению в сторону ИРИ, то скорость МКА принимает положительное значение, в другом случае – отрицательное.

В работе также был исследован сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), частота которого задавалась следующим образом:

$$f_i(k) = \Delta f + b \cdot k, \quad (10)$$

где Δf – начальная частота сигнала; $b = (f_1 - \Delta f)/k_1$; f_1 – конечная частота.

Результаты расчетов среднеквадратического отклонения (СКО) оценки разности моментов прихода сигналов приведены на рис. 2 и 3 (радиоимпульсный сигнал) и рис. 4 и 5 (ЛЧМ-сигнал).

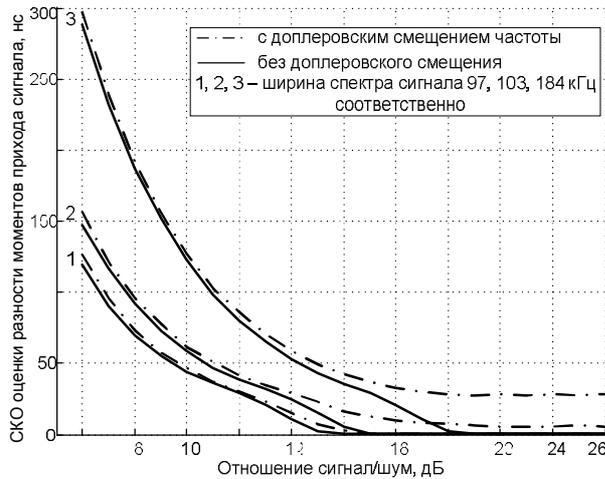


Рис. 2. СКО оценки разности моментов прихода радиоимпульсного сигнала (длительность 6,4 мкс)

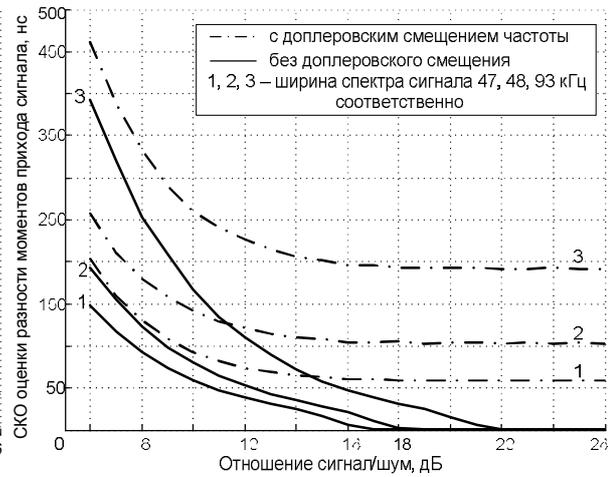


Рис. 3. СКО оценки разности моментов прихода радиоимпульсного сигнала (длительность 12,8 мкс)

Расчеты показывают (см. рис. 2–5), что влияние доплеровского смещения частоты приводит к ухудшению точности оценки при больших отношениях сигнал/шум, где должна достигаться высокая точность оценки. Происходит это из-за смещения спектров сигналов (рис. 6), которое приводит к сглаживанию взаимно-корреляционной функции в районе максимума и уменьшению отношения сигнал/шум. В результате точность оценки разности моментов прихода уменьшается, а корреляционная обработка перестает быть оптимальной. Пример взаимно-корреляционной функции двух сигналов при доплеровском смещении частоты 16 кГц (при скорости МКА 5 км/с и несущей частоте сигнала 1 ГГц) приведен на рис. 7.

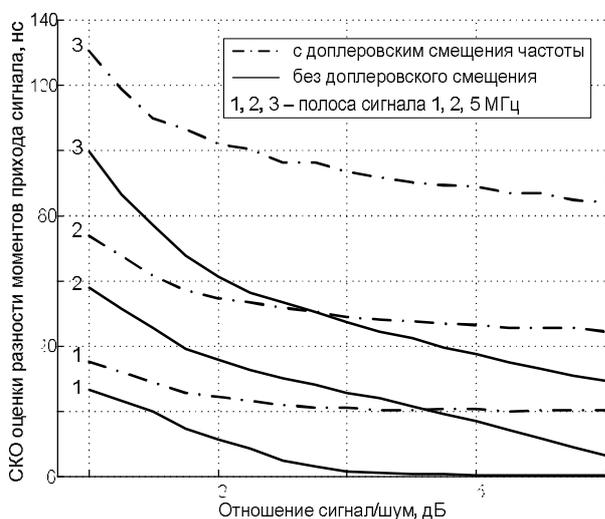


Рис. 4. СКО оценки разности моментов прихода ЛЧМ-сигнала (длительность сигнала 6,4 мкс)

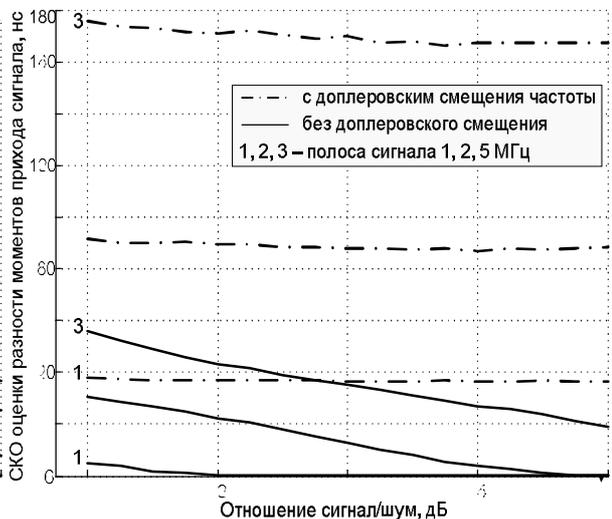


Рис. 5. СКО оценки разности моментов прихода ЛЧМ-сигнала (длительность сигнала 12,8 мкс)

Для повышения точности оценки разности $\Delta\tau_i^*$ между сигналами необходимо уменьшить влияние доплеровского смещения частоты. Устранить доплеровское смещение частоты одного сигнала относительно другого можно путем оценки величины смещения спектра $\Delta\omega_D^*$ с последующим внесением этой поправки в один из сигналов:

$$S(\omega) = S_1(\omega) \cdot S_2(\omega + \Delta\omega_D - \Delta\omega_D^*), \quad (11)$$

где $S_1(\omega), S_2(\omega)$ – спектры сигналов; $\Delta\omega_D$ – доплеровское смещение частоты; $\Delta\omega_D^*$ – оценка доплеровского смещения частоты.

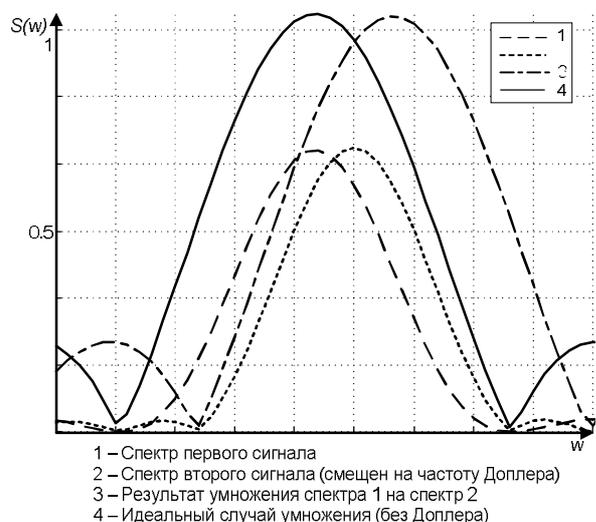


Рис. 6. Влияние эффекта Доплера на вычисление ВКФ

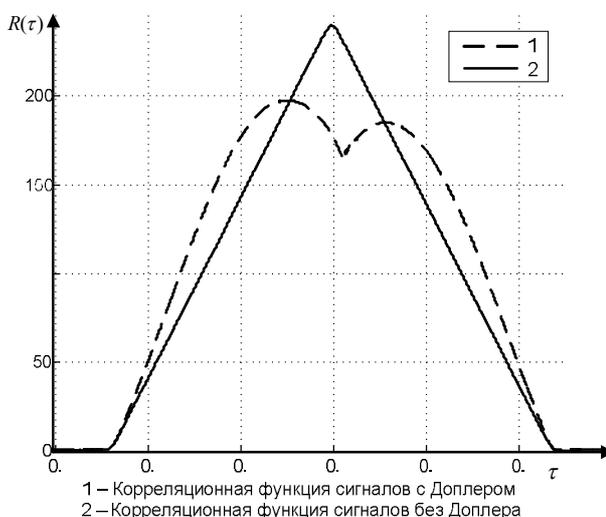


Рис. 7. Пример ВКФ двух сигналов при доплеровском смещении частоты

Точность оценки частоты $\Delta\omega_D^*$ будет определять качество устранения влияния эффекта Доплера.

В литературе [11] активно применяют методы, основанные на вычислении центров тяжести спектров. Таким образом, алгоритм уменьшения влияния доплеровского смещения частоты на точность определения разности моментов прихода сигнала имеет вид:

- 1) вычисление центров тяжести спектров принятых сигналов

$$\omega_{\text{цт}} = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} j |\dot{z}_j|^2}{\sum_{j=0}^{N-1} |\dot{z}_j|^2}, \tag{12}$$

где \dot{z}_j – отсчеты спектра сигнала;

- 2) вычисление величины оценки смещения по центрам тяжести спектров принятых сигналов

$$\Delta\omega_D^* = \omega_{\text{цт}1} - \omega_{\text{цт}2}; \tag{13}$$

- 3) сдвиг спектра одного сигнала относительно второго на разностную частоту.

После этого производят вычисление оценки времени задержки между принятыми сигналами по формуле (7).

Для повышения точности оценки доплеровского смещения частоты необходимо применить прием интерполяции спектра сигнала путем добавления к массиву, содержащему спектр сигнала, нулевых отсчетов [12]. Их число выбиралось таким, чтобы длина обрабатываемого массива увеличилась в целое число раз n . На рис. 8 приведены результаты расчетов СКО оценки времени задержки для радиоимпульсного сигнала (длительность 25,6 мкс, отношение сигнал/шум 15 дБ) при увеличении разрешающей способности по частоте от 1 до 10 раз.

По результатам расчетов (см. рис. 8) следует, что увеличивать разрешающую способность по частоте более чем в 4–5 раз неэффективно, поскольку это не приносит дополнительного увеличения точности определения разности моментов прихода. На рис. 10 приведены результаты расчетов СКО оценки времени задержки при моделировании с четырехкратным увеличением количества отсчетов спектра для различных отношений сигнал/шум. По кривым, приведенным на рис. 9, видно, что при устранении эффекта Доплера при достаточно больших отношениях сигнал/шум (больше 20 дБ) точность оценки разности моментов прихода составляет 25–30 нс.

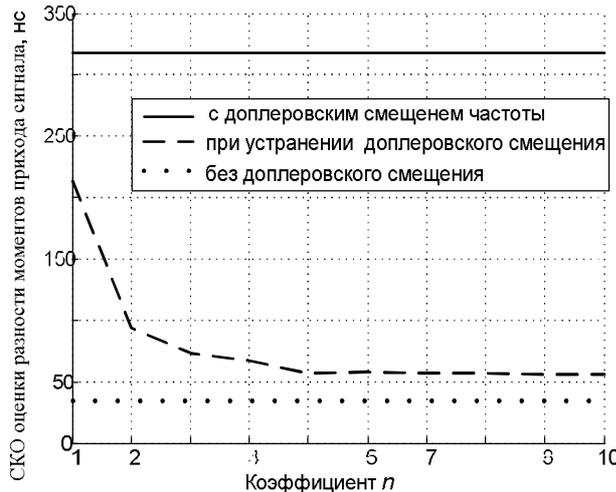


Рис. 8. СКО оценки разности моментов прихода радиопульсного сигнала при устранении эффекта Доплера

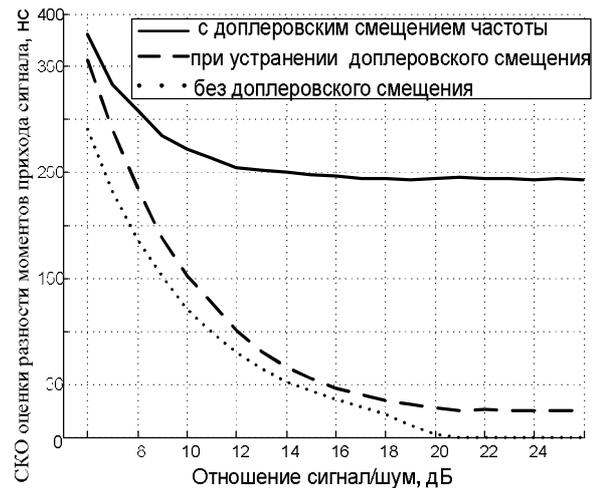


Рис. 9. СКО оценки разности моментов прихода радиопульсного сигнала при устранении эффекта Доплера

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Поскольку сигналы в космических системах наблюдаются на фоне дельта коррелированного случайного процесса с нулевым средним и заданной дисперсией, то наилучшую точность оценки разности моментов прихода можно обеспечить, используя взаимно-корреляционную обработку сигналов, что приводит к необходимости размещения на борту МКА системы передачи сигналов.

2. Величина доплеровского смещения частоты в пассивных космических системах, состоящих из МКА на низких орбитах, может лежать в пределах от 0 до 330 кГц. Поэтому для обеспечения успешного устранения доплеровского смещения частоты (при сохранении точности измерения разности моментов прихода) необходимо повышать разрешающую способность спектра по частоте (т.е. увеличивать длительность реализации). Это приведет к необходимости увеличения объема передаваемых данных.

3. Уменьшить объем передаваемых данных с сохранением точности измерения доплеровского смещения частоты возможно за счет использования интерполяции принимаемых сигналов.

4. Показано, что используя простой алгоритм нахождения центров тяжести спектров совместно с интерполяцией, за счет добавления нулей к реализации сигналов, можно практически полностью устранить влияние доплеровского смещения частоты, не увеличивая при этом объем передаваемых данных.

Таким образом, используя совокупность приемов, достигнута требуемая точность определения разности моментов прихода сигнала.

Статья написана в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (государственный контракт № 02.740.11.0183).

Литература

1. Pat. 6 417 799 US, Int. Cl. H 04 D 7/19. Method of locating an interfering transmitter for a satellite telecommunications system / A. Aubain (US), B. Lobert (US). – 9.07.2002, – 5 p.

2. Pat. 5 594 452 US, Int. Cl. H 04 B 7/185. Method and System for Locating an Unknown Transmitter Using Calibrated Oscillator Phases / J.C. Webber (US), C. A. Knight (US). – 14.01.1997. – 12 p.

3. Pat. 6 839 017 US, Int. Cl. G 01 S 7/36. Method and apparatus for using anti-jam technology to determine the location of an electromagnetic radiation source / D.J. Dillman (US). – 4.01.2005. – 9 p.

4. Ворошилин Е.П. Определение координат источников радиоизлучения разностно-дальномерным методом с использованием группировки низкоорбитальных малых космических аппаратов / Е.П. Ворошилин, М.В. Миронов, В.А. Громов // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 1(21), ч. 2. – С. 23–28.

5. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.

6. Денисов В.П. Радиотехнические системы / В.П. Денисов, Б.П. Дудко. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2006. – 253 с.
7. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.
8. Вознюк В.В. Определение времени задержки сигналов сверхмалыми космическими аппаратами / В.В. Вознюк, С.А. Зайцев, Д.А. Толстоусов // Известия вузов. Приборостроение. – 2005. – Т. 51, № 3. – С. 13–17.
9. Айфичер Э.С. Цифровая обработка сигналов: практический подход / Э.С. Айфичер, Б.У. Джервис. – М.: Вильямс, 2004. – 992 с.
10. Потемкин В.Г. Вычисления в среде MATLAB. – М.: Диалог-МИФИ, 2004. – 720 с.
11. Пальчик О.В. Обработка данных триангуляционного измерения / О.В. Пальчик, В.Г. Андреев // Цифровая обработка сигналов и ее применение: сб. докл. VI Междунар. конф. – М., 2004. – Т. 11. – С. 197–200.
12. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 547 с.

Громов Вячеслав Александрович

Аспирант каф. радиотехнических систем ТУСУРа
Тел.: 8 (382-2) 41-36-70
Эл. почта: grom_v_a@ms.tusur.ru

Ворошилин Евгений Павлович

Канд. техн. наук, зав. каф. телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа
Тел.: 8 (382-2) 41-36-70
Эл. почта: nvi@sibmail.com

Миронов Михаил Владимирович

Магистрант каф. радиотехнических систем ТУСУРа
Тел.: 8 (382-2) 41-36-70
Эл. почта: mironov.mikhail.v@gmail.com

Gromov V.A., Voroshilin E.P., Mironov M.V.

Estimation of signal arrival time difference with the use of multi-position passive satellite system

In the paper, an algorithm of estimation of signal arrival time difference with the use of multi-position passive satellite system is investigated. Statistical modeling of the estimation algorithm is described. The ways for accuracy improvement of estimating the arrival time difference are suggested.

Keywords: radio-frequency radiation source, small satellite, coordinates determination error, signal arrival time difference, simulation.