

## **Определение времени задержки приема сигналов группировкой пространственно-разнесенных малых космических аппаратов**

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

*Томский Государственный Университет Систем Управления и Радиоэлектроники, Томск, пр. Ленина 40, nvi@sibmail.com, grom\_v\_a@ms.tusur.ru, mironov.mikhail.v@gmail.com*

*В статье исследован алгоритм оценки времени задержки приема сигналов пространственно разнесенными малыми космическими аппаратами. Проведено статистическое моделирование алгоритма оценки времени задержки, предложены способы повышения точности оценки времени задержки.*

*The time difference of arrival estimation algorithm for multiposition passive satellite system is investigated in this paper. We simulated the time difference of arrival estimation algorithm. The ways to improve the accuracy of estimating the time difference of arrival is proposed.*

В настоящее время активно разрабатываются и применяются активные радиолокационные средства радиомониторинга земной поверхности, размещаемые на космических аппаратах. Однако, активное однопозиционное или многопозиционное радиолокационное наблюдение, с использованием космических аппаратов, не позволяет решать специфические задачи обнаружения и определения координат источников радиоизлучения, 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 малых космических аппаратов (МКА). Данная система позволит производить контроль с целью выявления несанкционированных источников излучения, проверку соблюдения технических ограничений на параметры излучающей аппаратуры, поиск и местоопределения излучателей в случаях аварийных ситуаций, для обеспечения безопасности движения воздушных судов и т.п. Отдельной и важной областью применения подобной системы мониторинга радиоизлучений являются радиоразведка в случаях военных конфликтов или для борьбы с терроризмом.

Космический сегмент подобной пассивной спутниковой системы радиомониторинга с применением МКА [1] может включать группировки низкоорбитальных МКА-ретрансляторов (с высотой орбиты порядка 1500км), для реализации разностно-дальномерного и разностно-доплеровского метода в распределенной многопозиционной системе определения координат источников радиоизлучения (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 временам задержки [2]. Погрешность определения местоположения ИРИ в таком случае в основном определяется точностью определения координат МКА и от точности измерения времени задержки прихода сигнала от ИРИ на МКА.

Требуемая погрешность вычисления координат ИРИ в подобной системе находится в пределах нескольких сотен метров. Это накладывает следующие ограничения на

точность определения координат МКА-ретрансляторов и точности измерения временных задержек [3]:

- среднеквадратичная погрешность определения координат МКА-ретрансляторов не должна превышать 25м;
- среднеквадратичная погрешность оценки времени задержки сигналов на МКА-ретрансляторы не должна превышать 30нс.

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 точности оценки временных задержек приема сигнала МКА-ретрансляторами.

Точность измерения времени задержки прихода сигнала от ИРИ на МКА будет зависеть от:

- отношения сигнал/шум, принимаемых сигналов;
- синхронизации шкалы времени в каждом КА системы;
- величины доплеровского смещения частоты сигнала, вызванного движением МКА.

Принимаемый МКА сигнал можно записать следующим образом [4]:

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

где  $s_{изл}(t)$  – излученный ИРИ сигнал,  $n(t)$  – аддитивный гауссов шум. Такая модель сигнала является несколько упрощенной, но в тоже 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 времени задержки прихода сигналов в МКА-ретрансляторы в таком случае может быть вычислено путем их взаимно-корреляционной обработки [5]. При этом оценка времени задержки поступления радиосигнала в две пространственно разнесенные точки соответствует положению максимума модуля взаимно-корреляционной функции сигналов, принятых в этих точках. Таким образом, для сигналов зарегистрированных двумя пространственно разнесенными МКА можно записать:

$$\tau^* = \max(|R(\tau)|), \quad (2)$$

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

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 1500км радиальная скорость порядка 7км/с), то будет наблюдаться доплеровское смещение частоты принимаемых сигналов.

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

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

где  $f$  – частота сигнала ИРИ,  $c_i$  – скорость  $i$  – ого МКА-ретранслятора,  $c$  – скорость распространения радиоволн в свободном пространстве.

Формула для вычисления взаимно-корреляционной функции цифровых сигналов 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 сигнала  $x_1(k), x_2(k)$ ,  $j$  – временной сдвиг одного сигнала относительно другого.

Для исследования степени влияния различных факторов на точность оценки времени задержки 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 100МГц до 20ГГц. Результаты, приведенные в статье, были получены при несущей частоте сигнала 1ГГц. Моделируя супергетеродинный приемник, сигнал переносили на частоту 10МГц. Далее сигнал оцифровывался с частотой 40МГц и оценивалась разность моментов прихода сигналов по формуле (2).

Истинное значение времени задержки сигнала между двумя МКА было задано равным 10 мкс. Огибающая сигнала сформирована с помощью оператора *tukeywin* [6]. Алгоритм вычисления *tukeywin(L, r)* следующий:

$$w(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi}{r} \frac{(t-1)}{L} - \pi \right) \right], & 0 < t < \frac{rL}{2} + 1; \\ 1, & \frac{rL}{2} + 1 \leq t \leq L - \frac{rL}{2}; \\ \frac{1}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi}{r} - \frac{(t-1)}{L} - \pi \right) \right], & L - \frac{rL}{2} < t. \end{cases} \quad (6)$$

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

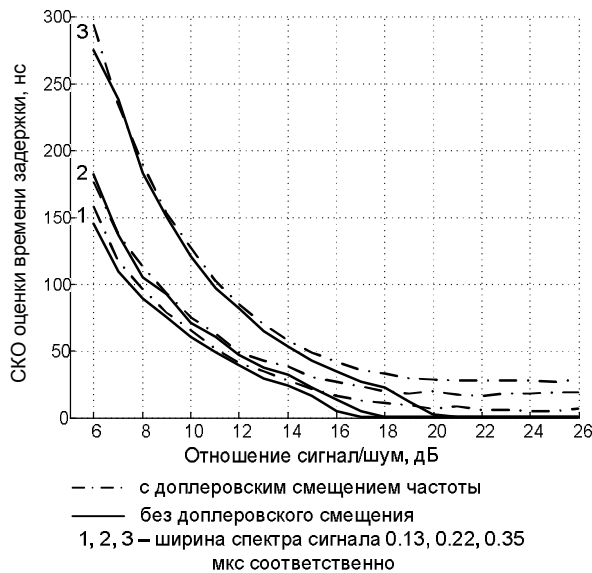
Модель сигнала на выходе приемника можно записать следующим образом:

$$s(t) = w(t) \cdot \sin(2\pi \cdot \Delta f \cdot t) + n(t), \quad (7)$$

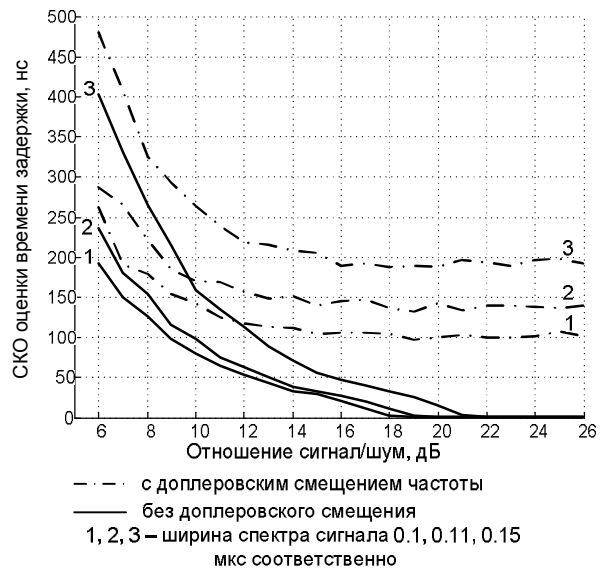
где  $\Delta f = f_s - f_g + f_d$  – частота сигнала после понижения, где  $f_s$  – несущая частота сигнала,  $f_g$  – частота гетеродина,  $f_d$  – доплеровское смещение частоты,  $n(t)$  – дельта коррелированный гауссов шум.

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  $-5\text{км/с}$  до  $5\text{км/с}$ . Если МКА движется по орбите по направлению в сторону ИРИ, то скорость МКА принимает положительное значение, в другом случае – отрицательное.

Результаты расчетов СКО оценки времени задержки сигналов, между пространственно-разнесенными пунктами (МКА), приведены на рисунках 1, 2.

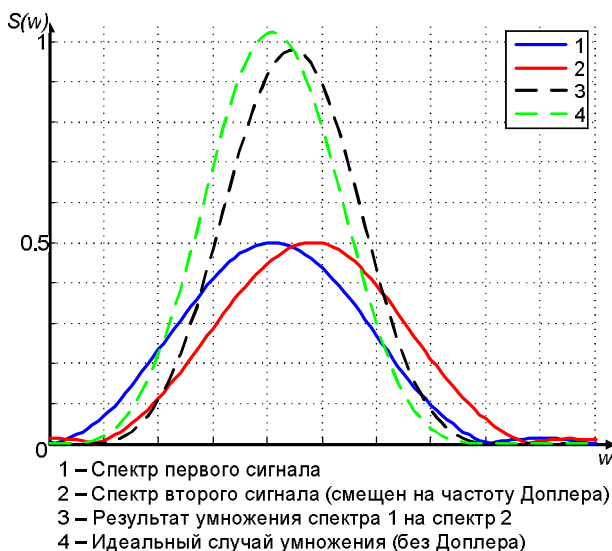


**Рис. 1. СКО оценки времени задержки радиоимпульсного сигнала (длительность сигнала 6.4 мкс)**

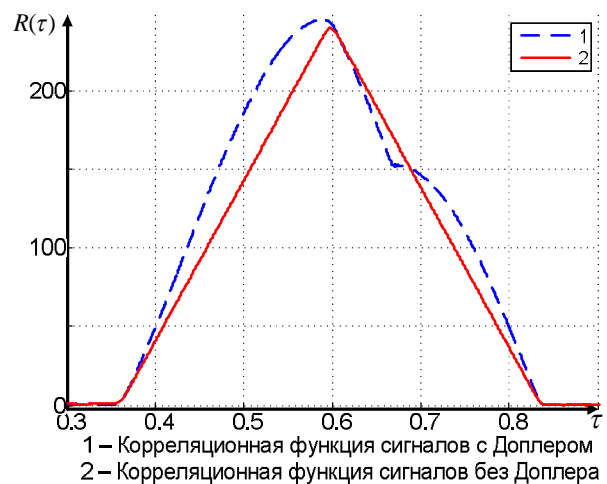


**Рис. 2. СКО оценки времени задержки радиоимпульсного сигнала (длительность сигнала 12.8 мкс)**

Расчеты показывают (рисунки 1, 2), что влияние доплеровского смещения частоты приводит к ухудшению точности оценки при больших отношениях сигнал/шум, где должна достигаться высокая точностей оценки. Происходит это из-за смещения спектров сигналов, в результате чего корреляционная обработка перестает быть оптимальной. В результате сглаживается область в районе максимума корреляционной функции и уменьшается отношение сигнал/шум (рисунок 3).



**Рис. 3. Влияние эффекта Доплера на вычисление ВКФ**



**Рис. 4. Пример ВКФ двух сигналов при доплеровском смещении частоты**

Этот эффект приводит к уменьшению точности оценки момента приходов. Пример взаимной корреляционной функции двух сигналов при доплеровском смещении частоты 16кГц (при скорости МКА 5км/с и несущей частоте сигнала 1ГГц) приведен на рисунке 4.

Для повышения точности определения оценки времени задержки 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:

$$S(\omega) = S_1(\omega) \cdot S_2(\omega + \Delta\omega_d - \Delta\omega'_d), \quad (8)$$

где  $S_1(\omega) \cdot S_2(\omega)$  – спектры сигналов,  $\Delta\omega_d$  – доплеровское смещение частоты,  $\Delta\omega'_d$  – оценка доплеровского смещения частоты.

Точность оценки частоты  $\Delta\omega'_d$  будет определять качество устранения влияния эффекта Доплера.

В литературе [7] активно применяют для этих целей методы основанные на вычислении центров тяжести спектров. Таким образом, алгоритм уменьшения влияния доплеровского смещения частоты на точность определения момента приходов имеет вид:

- 1) вычисление центров тяжести спектров принятых сигналов

$$C = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} j \left| \dot{z}_j \right|^2}{\sum_{j=0}^{N-1} \left| \dot{z}_j \right|^2} \quad (9)$$

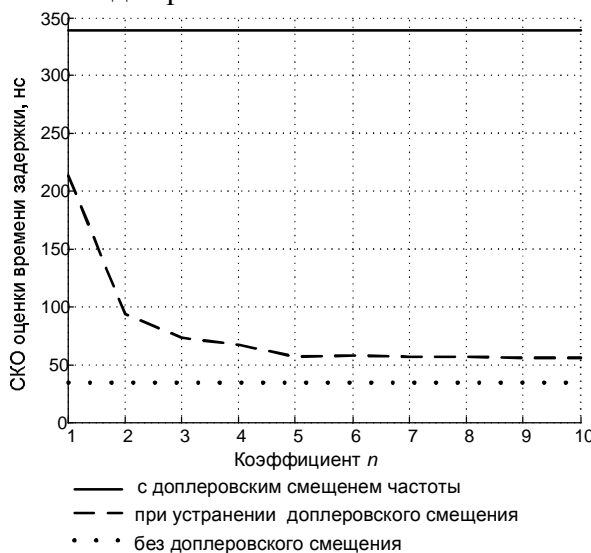
- 2) вычисление величины оценки смещения по центрам тяжести спектров принятых сигналов

$$\Delta\omega'_d = \omega_{cm1} - \omega_{cm2}; \quad (10)$$

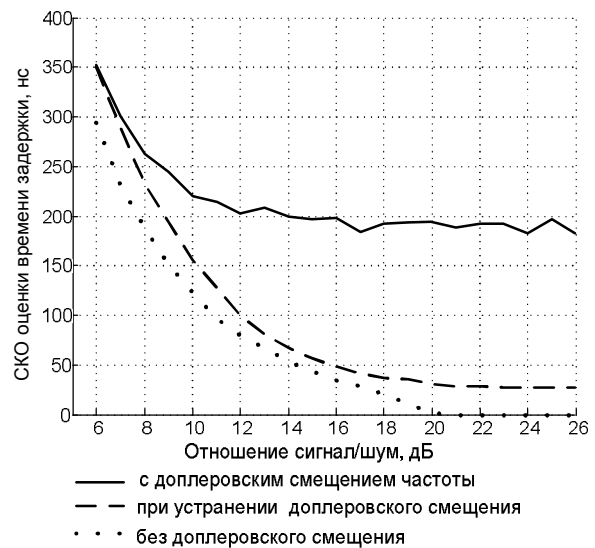
- 3) сдвиг спектра одного сигнала относительно второго на разностную частоту.

После этого производят вычисление оценки времени задержки между принятыми сигналами по формуле (2).

Для повышения точности оценки доплеровского смещения частоты применялась интерполяция спектра, путем добавления массиву, содержащему сигнал, нулевых отсчетов [8]. Их число выбиралось таким, чтобы длина обрабатываемого сигнала увеличилось в целое число раз  $n$ . На рисунке 5 приведены результаты расчетов СКО оценки времени задержки для радиоимпульсного сигнала (длительностью 25.6мкс), при отношении сигнал/шум 15дБ при увеличении разрешающей способности по частоте от 1 до 10 раз. На рисунке 6 приведены результаты расчетов СКО оценки времени задержки при моделировании с четырех кратным увеличением количества отсчетов сигнала для различных отношений сигнал/шум.



**Рис. 5. СКО оценки времени задержки радиоимпульсного сигнала при устранении эффекта Доплера**



**Рис. 6. СКО оценки времени задержки радиоимпульсного сигнала при устранении эффекта Доплера**

Из результатов расчетов (рисунки 5, 6) следует, что увеличивать разрешающую способность по частоте более чем в 4-5 раз не имеет смысла.

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 330кГц. 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. В статье 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.

*Статья написана в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОНТРАКТ № 02.740.11.0183)*

## **Литература**

1. Концепция перспективных пассивных космических систем радиомониторинга наземных источников излучения: отчет по НИР шифр 2009-1.1-411-043-017, выполненной в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (промежуточный). – Томск: ТУСУР, 2009. – С. 128–136.
2. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
3. Вознюк В. В. Зайцев С. А. Космическая система радиотехнического мониторинга на основе группировки низкоорбитальных малогабаритных космических аппаратов // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 6. С. 26–31.
4. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.
5. Вознюк В. В. Зайцев С. А. Толстоусов Д. А. Определение времени задержки сигналов сверхмалыми космическими аппаратами// Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 51, № 3. С. 13–17.
6. Потемкин В.Г. Вычисления в среде MATLAB. – М.: Диалог – МИФИ, 2004. - 720 с.
7. Пальчик О.В. Андреев В.Г. Обработка данных триангуляционного измерения// Цифровая обработка сигналов и ее применение; сборник докладов VI международной конференции. – Москва, 2004. – Т. 11. С. 197 – 200.
8. Марпл С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 547 с.