

УДК 621.396.969.3

М.В. Миронов, А.А. Мещеряков, Г.С. Шарыгин, Н.А. Сулова, Е.В. Рогожников, В.В. Фирсов

Влияние многолучевости на точность оценки разности моментов прихода сигналов на трассах «Земля – космический аппарат»

Анализируется погрешность оценки разности моментов прихода радиосигналов в два приемных пункта, расположенных на космических аппаратах системы радиомониторинга. Приводятся результаты моделирования и обработки экспериментальных данных, полученных при регистрации сигналов навигационной системы GPS и сигналов наземного источника радиоизлучения трёхсантиметрового диапазона.

Ключевые слова: боковое излучение, многолучевость, оценка разности моментов прихода, корреляционная функция.

В настоящее время рассматривается возможность проектирования и разработки космической пассивной системы радиомониторинга наземных источников излучения (ИРИ) [1, 2]. Система может быть использована с целью выявления несанкционированных источников излучения, проверки соблюдения технических ограничений на параметры излучающей аппаратуры, для определения координат терпящих бедствие судов и для решения ряда других задач.

Для определения координат объектов был выбран разностно-дальномерный метод (РДМ), поскольку для его реализации не требуется большого количества бортовой аппаратуры, многоканальных приемников, сложных антенных систем, а также желательно размещение спутников на низковысотных орбитах [3, 4].

Как известно, разностно-дальномерный метод использует измерения разностей моментов прихода сигнала в несколько пунктов наблюдения (ПН), находящихся на некоторых расстояниях друг от друга [5]. При решении задач радиомониторинга вид излученных сигналов неизвестен, при этом обнаружение может производиться по неэнергетическим параметрам, например по углу эллиптичности принятых сигналов [6]. Разность моментов прихода этих сигналов Δt в разнесенные пункты определяется по положению максимума их взаимно корреляционной функции (ВКФ), а погрешность измерения зависит от ширины спектра принятых сигналов. В общем случае точность оценки координат РДМ определяется выражением [7]

$$\sigma_x = c \cdot \sigma_{\Delta t} \cdot \Gamma, \quad (1)$$

где c – скорость света; $\sigma_{\Delta t}$ – среднеквадратическое отклонение (СКО) оценки разности моментов прихода сигнала в два ПН; Γ – геометрический фактор, характеризующий снижение точности оценки координат ИРИ, вызванное взаимным расположением источника излучения и пунктов наблюдения системы.

Постановка задачи. Система космического радиомониторинга предполагает прием бокового излучения направленных антенн наземных источников. При этом излучение по главному лепестку диаграммы направленности (ДН) антенны ИРИ производится вдоль земной поверхности, вызывая многочисленные отражения от элементов местности и местных предметов. Отраженные сигналы складываются с основным сигналом в приемной антенне, что приводит к искажениям формы сигналов и их спектров и соответственно к увеличению погрешности оценки разности моментов прихода. На рис. 1 приведена ситуация, при которой на борту космического аппарата (КА) системы мониторинга принимается прямой сигнал (R_0) и сигналы (R_i), отраженные от местности.

Цель, которую преследовали авторы данной статьи, состоит в определении погрешности оценки разностей моментов прихода сигналов с помощью математического моделирования и экспериментального подтверждения полученных результатов.

Математическая модель принимаемых сигналов. Для вычисления корреляционной функции необходимо определить модель сигнала, принимаемого на КА, которая сводится к заданию математического описания сигнала на входе канала распространения радиоволн (РРВ) и модели самого

канала РРВ. В настоящее время опубликовано большое число работ, посвященных методам численного расчета характеристик отражения радиолокационных объектов, обзор которых дан в [8]. Однако построение точной модели затруднено необходимостью учета огромного числа факторов и, как правило, нереализуемо из-за вычислительных проблем. Поэтому на практике более широкое распространение получили упрощенные модели, описывающие по отдельности те или иные характеристики отражения.

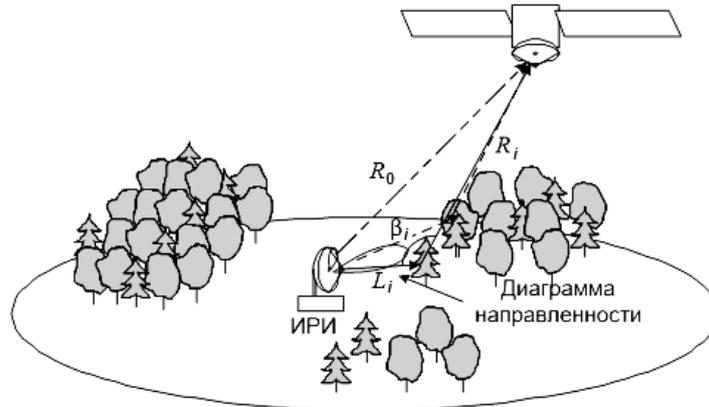


Рис. 1. Геометрия отражений от элементов местности

Способ математической записи принимаемого сигнала, предложенный в [9], рассматривается применительно к задаче отражения от большого числа независимых элементов. Согласно этой модели выражение для излученного сигнала имеет вид

$$s(t) = \text{Re}[u(t)\exp j\omega_0 t], \tag{2}$$

где $u(t)$ – комплексная огибающая сигнала $s(t)$, ω_0 – несущая частота.

Выражение для полного принятого сигнала записывается в виде [9]

$$y(t) = A \text{Re} \left[\sum_i \sigma_i u(t - r_i) \exp j[(\omega_0 - \omega_i)t - \omega_0 r_i - \theta_i] \right] + n(t), \tag{3}$$

где A – некоторая константа; σ_i – эффективная поверхность рассеяния каждого отражателя; ω_i – доплеровский сдвиг отраженного сигнала, измеренный в радианах в секунду; а r_i – его средняя пространственная задержка, выраженная в секундах; θ_i – случайная величина, характеризующая флуктуации r_i . Распределение величины θ_i полагается равномерным на интервале $(-\pi, +\pi)$, $n(t)$ – аддитивный гауссовский шум.

Точность определения разности моментов прихода в два ПН можно определить как

$$\sigma_{\Delta\tau}^2 = \sigma_{\tau_1}^2 + \sigma_{\tau_2}^2, \tag{4}$$

где $\sigma_{\tau_1}^2$, $\sigma_{\tau_2}^2$ – точность оценки момента прихода в первый и второй пункты наблюдения соответственно.

Если погрешности оценок в каждом пункте независимы и равны между собой, то выражение (4) примет вид

$$\sigma_{\Delta\tau}^2 = 2\sigma_{\tau}^2 \tag{5}$$

Точность определения момента прихода импульсного сигнала, наблюдаемого на фоне белого шума, определяется выражением [10]

$$\sigma_{\tau}^2 = \frac{1}{2q\Delta f_{\text{сиг}}^2}, \tag{6}$$

где σ_{τ}^2 – дисперсия оценки момента прихода; $q = \frac{2E}{N_0}$ – отношение сигнал/шум по энергии; $\Delta f_{\text{сиг}}$ – среднеквадратическая ширина спектра сигнала.

Результаты моделирования. Для исследования степени влияния отражений от элементов местности на точность оценки разности моментов прихода сигналов было проведено математическое моделирование в среде MATLAB. Цель моделирования – получить статистические характеристики разности моментов прихода для случая приема сигнала от ИРИ двумя пространственно разнесенными КА.

Оценка $\Delta\tau$ прихода радиосигнала в две пространственно разнесенные точки соответствует положению максимума модуля ВКФ сигналов, принятых в этих точках. Таким образом, для сигналов, зарегистрированных двумя пространственно разнесенными КА, можно записать:

$$\Delta\tau = \max(|R(\tau)|), \quad R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T s_1(t)s_2(t+\tau)dt, \quad (7)$$

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

Для количественного анализа ухудшения точности за счет отражений были рассмотрены однолучевой и многолучевой случаи распространения сигнала на трассе «Земля–КА». При моделировании в качестве входного сигнала была использована огибающая простого радиоимпульсного сигнала длительностью 300 нс, шаг дискретизации был выбран равным 11 нс. Такие параметры были выбраны для возможности сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными. Приведенные ниже результаты получены при следующих исходных данных: импульсная мощность ИРИ $P_{\text{пер}} = 200$ кВт, коэффициент усиления антенны ИРИ $G_{\text{пер}} = 20$ дБ, уровень боковых лепестков антенны ИРИ УБЛ = минус 25 дБ, коэффициент усиления приемной антенны $G_{\text{пр}} = 3$ дБ, длина волны $\lambda = 0,03$ см, высота орбиты спутников $R_0 = 1500$ км. Количество реализаций для усреднения равно 500. Согласно рис. 1 и выражению (3) для формирования сигнала, принятого в условиях многолучевости, необходимо задаться количеством отражателей, величиной их ЭПР и расположением на трассе. Количество отражателей на трассе принималось равным от 3 до 10, ЭПР каждого отражателя распределена по релейскому закону со средним значением $\bar{\sigma}_i = 40$ м². Отражатели расположены в области пространства перед ИРИ, максимальный продольный размер которой принимался равным 400 м. Отражатели на трассе случайным образом распределялись по областям пространства перед ИРИ, а их декартовы координаты имели равномерный закон распределения.

На рис. 2 приведена одна из реализаций огибающей принятого сигнала с учетом отражений, полученная при моделировании по выражению (3). Согласно результатам моделирования, амплитуда отраженных сигналов может быть больше амплитуды прямого сигнала. На рис. 3 приведены результаты расчетов среднеквадратической ошибки (СКО) оценки разности моментов прихода, полученные при моделировании, для трех случаев: потенциальная точность, однолучевой случай и многолучевой случай распространения сигналов.

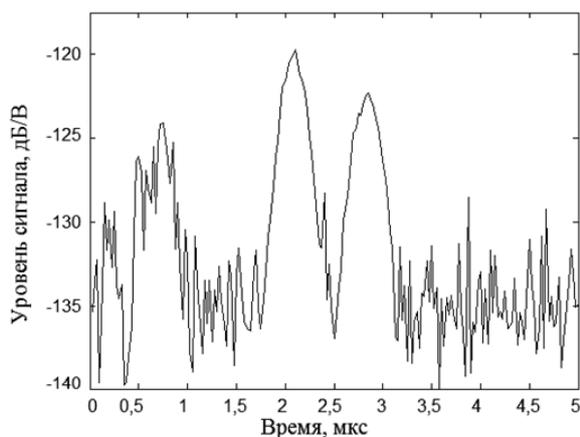


Рис. 2. Огибающая принятого сигнала

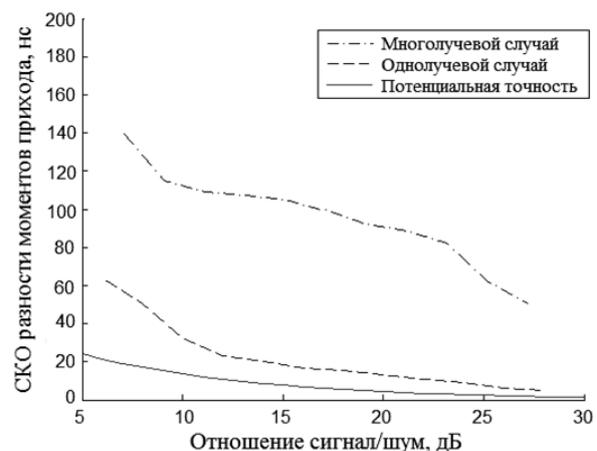


Рис. 3. СКП оценки разности моментов прихода радиоимпульсного сигнала

Как видно из результатов моделирования, при многолучевости точность оценки разности моментов прихода снижается более чем в 2 раза. Причиной понижения точности являются искажения

принимаемого сигнала за счет многолучевого распространения радиоволн, особенно когда амплитуда отраженных сигналов соизмерима или больше основного. В этом случае максимум взаимно корреляционной функции смещается в сторону импульса с большей амплитудой.

Результаты обработки экспериментальных данных. Поскольку провести натурный эксперимент невозможно, было предложено провести инверсный эксперимент по приему навигационных сигналов системы GPS [11] и определить погрешности оценки момента прихода за счет многолучевости.

Для проведения эксперимента использовалась направленная антенна в виде параболического зеркала диаметром 76 см и фокусным расстоянием 29 см, в фокусе которого установлена ненаправленная микрополосковая антенна. Направленная антенна установлена на поворотном устройстве, с помощью которого можно изменять угол места (УМ) антенны и осуществлять круговое сканирование в азимутальной плоскости.

В качестве регистрирующей аппаратуры использовались платы SiGe GN3S Sampler v3, которые состоят из радиочастотного тракта и аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с максимальной частотой дискретизации 16,368 МГц. В англоязычной литературе подобные устройства называются front-end. Данные в цифровом двоичном виде поступают в ЭВМ посредством протокола USB. Фотография приемного пункта приведена на рис. 4.

Были проведены экспериментальные исследования формы ДН используемой антенны на наземной трассе на территории полигона Научно-исследовательского института радиотехнических систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (НИИ РТС ТУСУРа). Для экспериментального исследования направленных свойств антенны на полигоне использовался специальный участок – антенный испытательный стенд, на котором размещена деревянная мачта высотой 12 м с площадкой для передающей аппаратуры и помещение с приемной и регистрирующей аппаратурой.

Расстояние между приемным и передающим пунктами стенда составляет 108 м. Между ними – покрытый травой участок полигона с углублением в его середине. Перепад высот участка у приемного и передающего пунктов составляет 3,7 м. Левая сторона участка выше правой с общим наклоном 6,8° относительно горизонтальной плоскости. На расстоянии 20–30 м справа и слева от линии приемник–передатчик растут деревья.

В качестве источника излучения использовался генератор сигналов высокой частоты Г4-83. Источник излучал радиоимпульсы длительностью 500 нс на частоте 1,575 ГГц. В качестве антенны источника излучения использовалась рупорная антенна с шириной ДН 15°. На рис. 5 приведена ДН параболической антенны, построенная по результатам измерений.



Рис. 4. Фотография приемного пункта

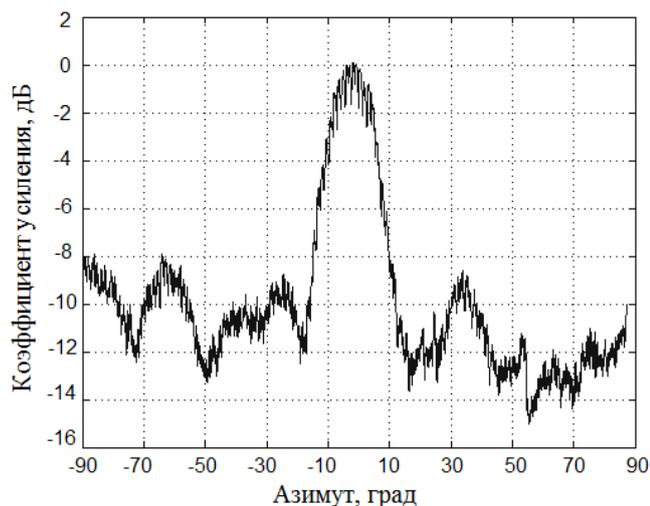


Рис. 5. Диаграмма направленности параболической антенны

Проведение эксперимента предусматривает регистрацию навигационных сигналов на направленную антенну в наведенном режиме. Как и при моделировании, рассматриваются две ситуации: приемная антенна направлена на конкретный спутник (однолучевой случай, принимаются только прямые сигналы); приемная антенна ориентирована вдоль земной поверхности и направлена на

объекты отражения (многолучевой случай). В обоих случаях выполняется регистрация файла. Далее обработка производится на ЭВМ: происходит поиск и обнаружение сигналов видимых спутников системы GPS, выделяется псевдодальномерный код каждого спутника и вычисляется взаимная корреляционная функция выделенного и опорного кодов.

На рис. 6 и 7 приведены примеры вычисления корреляционных функций псевдодальномерных кодов спутника № 12 для двух случаев соответственно.

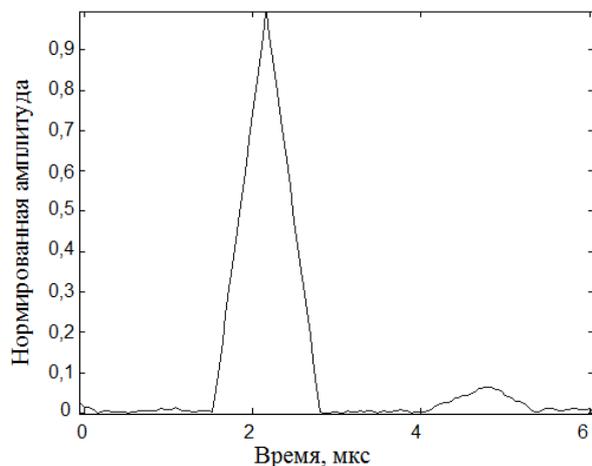


Рис. 6. Корреляционная функция псевдодальномерного кода для однолучевого случая

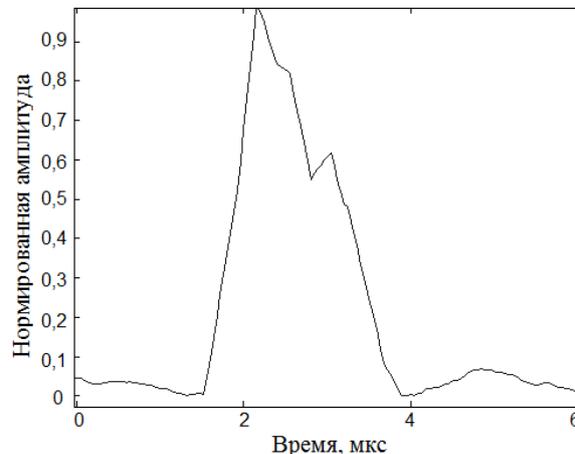


Рис. 7. Корреляционная функция псевдодальномерного кода для многолучевого случая

Из приведенных результатов видно, что во втором случае корреляционная функция искажена в результате приема отраженных сигналов, однако поскольку объекты находятся близко к приемному пункту, то невозможно разрешить их по времени. Также можно заметить, что передний фронт корреляционной функции не искажен, т.е. амплитуда прямого сигнала больше амплитуды отраженных сигналов. Объясняется это тем, что уровень боковых лепестков ДН используемой антенны достаточно высок ($-8...-10$ дБ) и не типичен для таких источников излучения, как радиолокационные станции.

Также на базе полигона НИИ РТС ТУСУРа в 2010 г. проводились экспериментальные исследования особенностей распространения импульсных сигналов на наземных трассах. Комплекс аппаратуры включает в себя мобильный передающий пункт трехсантиметрового диапазона и приемно-измерительный пункт [12]. В качестве источника излучения использовался радиопередающий комплекс РПК-1, который излучает импульсы длительностью 300 нс на частоте 9,6 ГГц, мощность излучения 200 кВт. Антенная система приемного пункта состоит из восьми прямоугольных рупоров, максимальное расстояние между которыми составляет 90 см. Исследования проводились на наземных трассах протяженностью 1–40 км.

Пример реализации огибающей принимаемых сигналов при разных углах отворота антенны передатчика от направления на приемный пункт приведен на рис. 8 и 9. Данные реализации получены на трассе протяженностью 17 км.

На рис. 8 приведен пример принятого сигнала для наведенного случая, т.е. когда передающая антенна направлена на приемную (однолучевое распространение). На рис. 9 приведен случай многолучевого распространения (ясно видны прямой сигнал и следующие за ним отраженные). Сравнивая результаты моделирования (см. рис. 2) и пример экспериментальных данных (см. рис. 9), можно увидеть качественное сходство полученных данных. Объяснить это можно тем, что уровень боковых лепестков двухпозиционной индикатрисы вторичного рассеяния местных предметов примерно одинаков в азимутальной и угломестной плоскостях. При этом амплитуда прямого сигнала может быть меньше амплитуды отраженного. Естественно, что наземные трассы и трассы типа «Земля–КА» отличаются характером распространения, однако для подтверждения качественной оценки разности моментов прихода сигнала можно использовать данные, полученные на наземных трассах.

Аналогично моделированию вычислим СКО оценки разности моментов прихода сигналов. Для вычисления корреляционной функции использовались сигналы антенн, разнесенных на максимальное расстояние. В качестве опорного используется сигнал, принятый в наведенном режиме. Результаты СКП оценки разности моментов прихода сигналов, полученные при обработке экспериментальных данных, приведены на рис. 10.

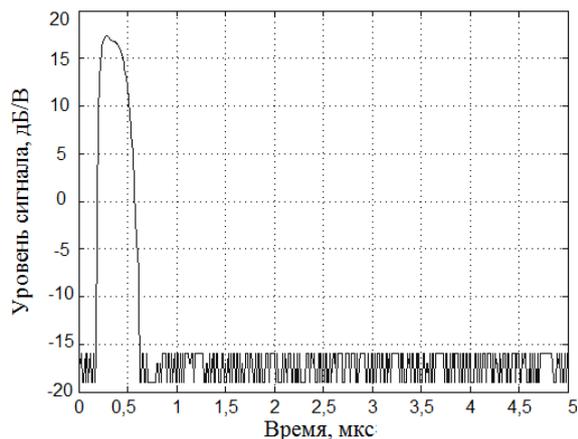


Рис. 8. Пример огибающей сигнала для однолучевого случая

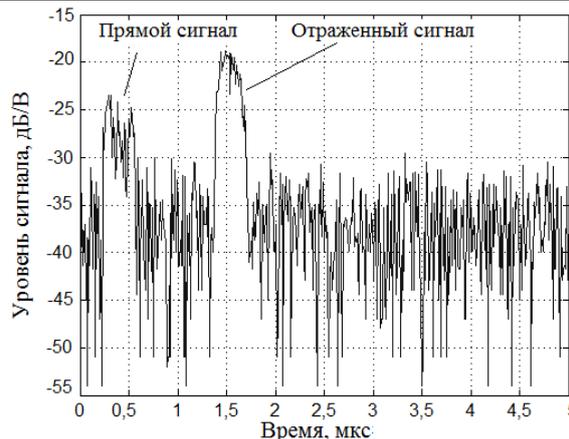


Рис. 9. Пример огибающей сигнала для многолучевого случая

Заключение. Согласно результатам моделирования, точность оценки разности моментов прихода вследствие многолучевого характера распространения ухудшается более чем в 2 раза при заданной длительности импульса (300 нс). Причиной ухудшения являются искажения принимаемого сигнала, которые приводят к смещению максимума взаимно корреляционной функции в сторону импульса с большей амплитудой.

1. В результате обработки принятых навигационных сигналов не выявлено ухудшения точности оценки разности моментов прихода, что объясняется использованием антенны с нетипично высоким уровнем боковых лепестков.

2. Обработка сигналов источника радиоизлучения, прошедших наземный канал распространения, приводит к качественно таким же результатам, которые были получены путем моделирования.

Литература

1. Миронов М.В. Структура космической пассивной системы мониторинга наземных источников радиоизлучения / М.В. Миронов, А.А. Будаев // Матер. науч.-техн. конф. молодых специалистов ОАО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева «Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем», посвященной 50-летию полета в космос Ю.А. Гагарина (Железногорск). – Железногорск: Изд. дом «Класс Плюс», 2011. – С. 30–32.
2. Parameters optimization of a low-orbit small satellites batching using the range-difference method in order to estimate radio sources coordinates / M.V. Mironov, V.A. Gromov, E.P. Voroshilin, G.S. Sharygin // Telecommunications and radio engineering (N.Y., United States). – 2011. – Vol. 70, issue 6. – P. 521–533.
3. 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.
4. Повышение точности определения координат разностно-дальномерным методом с использованием группировки низкоорбитальных малых космических аппаратов / В.А. Громов, Е.П. Ворошилин, М.В. Миронов, Г.С. Шарыгин // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2(22), ч. 2. – С. 14–16.
5. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.

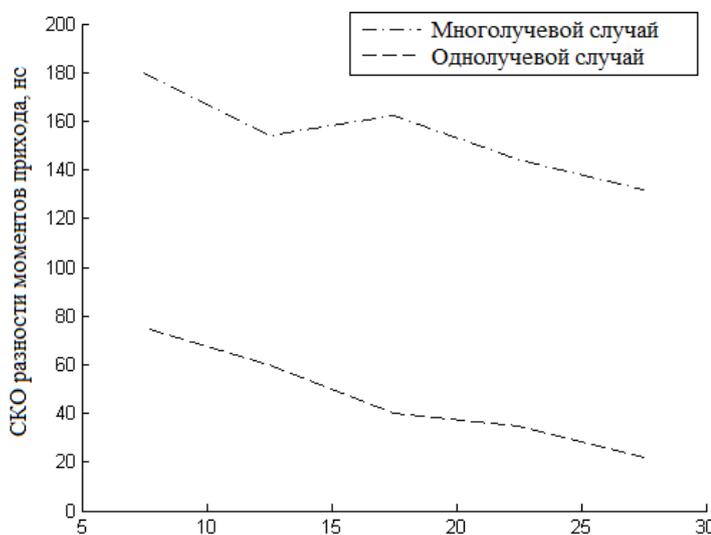


Рис. 10. СКП оценки разности моментов прихода радиоимпульсного сигнала

6. Угол эллиптичности электромагнитных сигналов и его использование для неэнергетического обнаружения, оптимального по критерию Неймана–Пирсона / В.А. Громов, Г.С. Шарыгин, М.В. Миронов // Изв. вузов. Физика (Томск). – 2012. – Т. 55, № 3. – С. 15–21.
7. Сайбель А.Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения. – М.: Оборонгиз, 1958. – 55 с.
8. Залевский Г.С. Обзор методов расчета вторичного излучения радиолокационных объектов // Системы обработки информации. – 2007. – №7 (65). – С. 16–24.
9. Кулемин Г.П. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами / Г.П. Кулемин, В.Б. Разказовский. – Киев: Наукова думка, 1987. – 231 с.
10. Денисов В.П. Радиотехнические системы / В.П. Денисов, Б.П. Дудко. – Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2006. – 253 с.
11. Миронов М.В. Использование сигналов системы GPS при проведении экспериментов в пассивных системах радиомониторинга / М.В. Миронов, В.В. Фирсов, А.С. Кустов // Матер. докл. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск). – Томск: В-Спектр, 2013. – Ч. 1. – С. 13–16.
12. Измерительный комплекс для исследования пространственно-временных искажений импульсных радиосигналов трехсантиметрового диапазона на наземных трассах / М.Е. Ровкин, М.В. Крутиков, А.А. Мещеряков и др. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 2006. – №6. – С. 7–12.

Миронов Михаил Владимирович

Ассистент, аспирант каф. радиотехнических систем ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 41-36-70

Эл. почта: mironov.mikhail.v@gmail.com

Мещеряков Александр Алексеевич

Ст. науч. сотрудник НИИ РТС ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 41-34-55

Эл. почта: msch@sibmail.com

Шарыгин Герман Сергеевич

Д-р техн. наук, профессор, зав. каф. РТС ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-38-98

Эл. почта: gssh@mail.tomsknet.ru

Суслова Наталья Андреевна

Лаборант НИИ РТС ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 41-36-70

Эл. почта: rioka@sibmail.com

Рогожников Евгений Васильевич

Ассистент, аспирант кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 41-34-71

Эл. почта: udzhon@mail.ru

Фирсов Вячеслав Валерьевич

Техник НИИ РТС ТУСУРа

Тел.: 8 (382-2) 41-36-70

Эл. почта: fisher702@mail.ru

Mironov M.V., Mescheryakov A.A., Sharygin G.S., Suslova N.A., Rogozhnikov E.V., Firsov V.V.

The influence of multipath on the accuracy of estimation of the time difference of signal arrival for propagation paths «Earth – satellite»

The paper analyzes the error of the estimation of the time difference of radio signal arrival at two reception points located on a spacecraft. The results of simulation and analysis of the experimental data obtained by reception of signals of the terrestrial three-centimeter range radio source are shown.

Keywords: lateral radiation, multipath, estimation of the time difference of arrival, correlation function.