

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.396.9

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-2-38-53>

Совместное использование станции активного подсвета и опорных источников сигналов при местоопределении наземных радиопередающих устройств, работающих через геостационарные ретрансляторы

Р. Д. Галл✉

ООО Научно-производственное предприятие "Новые технологии телекоммуникаций",
Санкт-Петербург, Россия

✉ roman942010@mail.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время часто наблюдаются случаи постановки помех пользователям спутниковых систем связи, использующих, в частности, космические аппараты-ретрансляторы, расположенные на геостационарной орбите, а также нелегального использования ресурса таких космических аппаратов. Подобные действия могут быть как непреднамеренными, так и целенаправленными, и, в частности, приводят к несоблюдению норм электромагнитной совместимости с другими пользователями спутниковой системы связи. Для оперативного и качественного реагирования служб радиоконтроля и операторов космических аппаратов на нелегальные действия актуальна разработка методов, позволяющих с необходимой точностью определять местоположение источника помехового радиоизлучения.

Цель работы. Разработка метода повышения точности определения координат наземных источников радиоизлучения, работающих через геостационарные спутники-ретрансляторы, за счет совместного использования станции активного подсвета и опорных источников сигналов.

Материалы и методы. Используются статистическая теория радиотехнических систем, теория цифровой обработки сигналов и метод имитационного моделирования.

Результаты. Разработан метод повышения точности местоопределения наземных источников радиоизлучения, работающих через геостационарные ретрансляторы, за счет совместного использования станции активного подсвета и опорных источников сигналов. Описан метод разрешения неоднозначности относительно истинного корреляционного пика опорного источника сигнала с помощью сигнала станции активного подсвета. Получено выражение для вероятности правильного решения при разрешении неоднозначности. В результате имитационного моделирования получена оценка точности геолокации при использовании разработанного метода в сравнении с известным методом, предполагающим использование трех реперных станций.

Заключение. Метод, описываемый в данной статье, позволяет достичь относительно высокой точности определения местоположения наземных источников радиоизлучения в интересующих регионах Земли, не требуя организационных и финансовых затрат по установке большого количества реперных станций.

Ключевые слова: геолокация, определение местоположения, геостационарный спутник, метод TDOA–TDOA, реперная станция, станция активного подсвета, опорный источник сигнала

Для цитирования: Галл Р. Д. Совместное использование станции активного подсвета и опорных источников сигналов при местоопределении наземных радиопередающих устройств, работающих через геостационарные ретрансляторы // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 2. С. 38–53. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-2-38-53

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 15.01.2021; принята к публикации после рецензирования 13.03.2021; опубликована онлайн 29.04.2021

Shared Operation of a Barrage Jammer and Reference Signal Sources for Determining Ground-Based Radio Transmitters Operating via Geostationary Relay Satellites

Roman D. Gall 

"New Telecommunication Technologies" RPE Co. Ltd., St Peterburg, Russia

 roman942010@mail.ru

Abstract

Introduction. There are incidences of jamming the users of satellite communication systems, who apply e.g. geostationary relay satellites, and the illegal use of such satellite resources. These actions can be both intentional and unintentional, and, among other things, be caused by non-compliance with electromagnetic compatibility standards on part of other users of satellite communication systems. For a prompt and high-quality response of radio monitoring services and satellite operators to these illegal actions, it seems urgent to develop methods for accurate determination of the geolocation of radio emission sources.

Aim. To develop a method for improving the accuracy of determining the coordinates of ground-based radio emission sources operating via geostationary relay satellites based on shared operation of a barrage jammer and reference signal sources.

Materials and methods. The research was conducted using the statistical theory of radio engineering systems, the theory of digital signal processing and the method of simulation.

Results. A method was developed for improving the geolocation accuracy of ground-based radio emission sources operating via geostationary relay satellites based on shared operation of a barrage jammer and reference signal sources. A method for resolving ambiguity regarding the true correlation peak of a reference source signal using a signal from a barrage jammer was described. An expression was obtained for the probability of a correct solution when resolving such ambiguity. As a result, the estimates of geolocation accuracy obtained using the developed method were compared with those obtained by a conventional method relying on the usage of 3 different reference stations.

Conclusions. The method proposed in this paper makes it possible to achieve a relatively high accuracy when determining the geolocation of ground-based radio emission sources in the Earth's regions of interest, at the same time as involving no organizational and financial costs for the installation of a large number of reference stations.

Keywords: geolocation, positioning determining, geostationary relay satellite, TDOA–TDOA method, reference station, barrage jammer, reference signal source

For citation: Gall R. D. Shared Operation of a Barrage Jammer and Reference Signal Sources for Determining Ground-Based Radio Transmitters Operating via Geostationary Relay Satellites. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 2, pp. 38–53. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-2-38-53

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Submitted 15.01.2021; accepted 13.03.2021; published online 29.04.2021

Введение. В настоящее время на геостационарной орбите (ГСО) расположено множество космических аппаратов (КА), ретранслирующих сигналы земных спутниковых систем связи. Наряду с использованием ресурсов КА по прямому назначению отмечается как непреднамеренное, так и целенаправленное незаконное использование ресурса геостационарных спутников-ретрансляторов (СР), а также создание

помех легальным пользователям. В этой связи актуальной является задача определения местоположения (ОМП) (геолокации) источников радиоизлучения (ИРИ), сигналы которых ретранслируются геостационарными СР. Имея данные о местоположении нарушителя, службы радиоконтроля, а также операторы геостационарных СР смогут оперативно реагировать на незаконное использование ресурса КА.

Совместное использование станции активного подсвета и опорных источников сигналов при местопределении наземных радиопередающих устройств, работающих через геостационарные ретрансляторы

Shared Operation of a Barrage Jammer and Reference Signal Sources for Determining Ground-Based Radio Transmitters Operating via Geostationary Relay Satellites

В основу геолокации положены следующие свойства системы передачи информации с использованием геостационарных СР [1–3]:

- наличие паразитного излучения сигнала ИРИ за счет боковых лепестков ДН его антенны;
- наличие большого количества КА на ГСО, что позволяет сформировать базу ОМП;
- неидеальность синхронных орбит, в силу чего образуется доплеровское смещение частоты ИРИ.

Целью настоящей статьи является разработка метода повышения точности определения координат наземных ИРИ, работающих через геостационарные СР, за счет совместного использования станции активного подсвета и опорных источников сигналов.

В настоящее время известно несколько методов построения линии положения ИРИ на поверхности Земли. Линия может быть построена разностно-дальномерным методом (Time Difference of Arrival – TDOA) и на основании смещения частот сигналов, поступающих от ИРИ (Frequency Difference of Arrival – FDOA). Для определения ОМП ИРИ необходимо найти точку пересечения двух линий положения на поверхности Земли, каждая из которых может быть построена как по методу TDOA, так и FDOA [4–9]. В статье рассмотрено построение обеих линий положения по методу TDOA.

Метод TDOA (разностно-дальномерный) заключается в построении линии положения, соответствующей разности времен распространения сигнала, принятого с двух геостационарных СР. На рис. 1 изображена схема построения линии положения по этому методу.

ИРИ основным лепестком диаграммы направленности (ДН) излучает сигнал в направлении СР₂, расположенного на расстоянии $d_{ИРИ-СР_2}$ от ИРИ. Боковым лепестком он излучает сигнал в направлении СР₁, находящегося на расстоянии $d_{ИРИ-СР_1}$. Ретранслированные сигналы принимаются комплексом геолокации (КГ), находящимся на расстояниях $d_{СР_1-КГ}$ от СР₁ и $d_{СР_2-КГ}$ от СР₂.

Для определения координат ИРИ методом TDOA–TDOA требуется построение двух линий положения (каждой по методу TDOA), для чего необходимы 3 СР: 2 вспомогательных

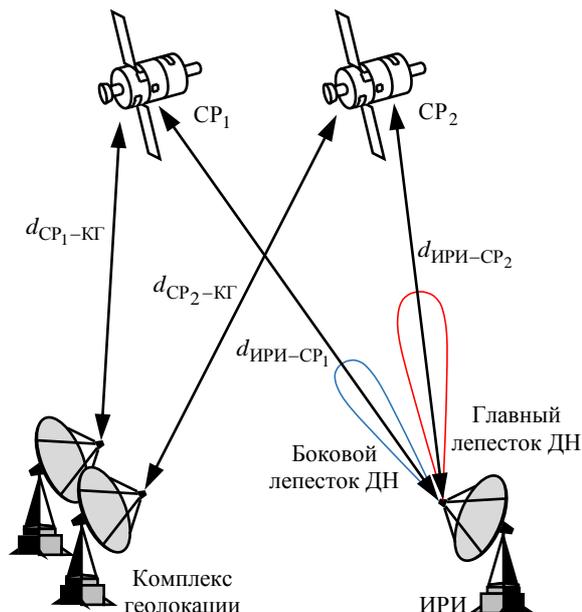


Рис. 1. Схема построения линии положения по методу TDOA

Fig. 1. TDOA method for calculating the position line (СР₁ и СР₃) и основной (СР₂). Одна линия положения строится на основании оценки разности времен прихода сигнала ИРИ с СР₂ и СР₁, другая – на основании оценки разности времен прихода сигнала ИРИ с СР₂ и СР₃. Вычисление координат ИРИ сводится к поиску минимума функции невязки:

$$f_{TDOA-TDOA}(x, y, z) = \min_{x, y, z \in \mathbb{R}} \left\{ \left[d_{ИРИ-СР_2}(x, y, z) + d_{СР_2-КГ} - d_{ИРИ-СР_1}(x, y, z) + d_{СР_1-КГ} - c\Delta\tau_{21} \right]^2 + \left[d_{ИРИ-СР_2}(x, y, z) + d_{СР_2-КГ} - d_{ИРИ-СР_3}(x, y, z) + d_{СР_3-КГ} - c\Delta\tau_{23} \right]^2 \right\},$$

где $\Delta\tau_{21}$ – разность времен прихода в КГ сигналов ИРИ, ретранслированных СР₂ и СР₁; $\Delta\tau_{23}$ – разность времен прихода в КГ сигналов ИРИ, ретранслированных СР₂ и СР₃. При расчетах следует учитывать нелинейное ограничение, соответствующее условию нахождения ИРИ на поверхности Земли:

$$\left(\frac{x}{R_e} \right)^2 + \left(\frac{y}{R_e} \right)^2 + \left(\frac{z\sqrt{1-e_z^2}}{R_e} \right)^2 - 1 = 0,$$

где x, y, z – координаты ИРИ в системе ECEF (Earth centered, Earth fixed); R_e – экваториальный радиус Земли; e_z – эксцентриситет земного эллипсоида.

Оценка моментов прихода сигналов ИРИ Δt осуществляется фиксацией экстремума взаимной функции неопределенности (ВФН) между принятыми сигналами:

$$A(\tau, f) = \int_0^T s_1(t) s_2^*(t + \tau) \exp(-j2\pi f t) dt,$$

где $s_1(t, f_1) = u(t) \exp(j2\pi f_1 t) + n_1(t)$, $s_2(t, f_2, \Delta t) = u(t - \Delta t) \exp[j2\pi f_2(t - \Delta t)] + n_2(t)$ – сигналы, принятые с основного и вспомогательного СР соответственно; T – время наблюдения, причем $u(t)$ – комплексный сигнал в основной полосе частот; f_1, f_2 – несущие частоты принятых сигналов; $n_1(t), n_2(t)$ – аддитивные шумовые составляющие.

Из [10] следует, что оценками максимального правдоподобия параметров Δt и Δf для модели сигнала, представляющего собой сумму неизвестного детерминированного сигнала и аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ), являются значения, максимизирующие модуль ВФН:

$$\hat{\Delta t}, \hat{\Delta f} = \arg \max_{\Delta t, \Delta f} |A(\Delta t, \Delta f)|.$$

При воздействии на сигналы АБГШ отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе коррелятора, вычисляющего ВФН, для комплексных сигналов в основной полосе составляет [11]:

$$\gamma_{\text{вых}} = BT\gamma_{\text{эф}},$$

где B – шумовая полоса сигналов; $\gamma_{\text{эф}}$ – эффективное значение ОСШ (ЭОСШ) сигналов на входе коррелятора, определяемое из выражения

$$\frac{1}{\gamma_{\text{эф}}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\gamma_1} + \frac{1}{\gamma_2} + \frac{1}{\gamma_1 \gamma_2} \right).$$

Здесь γ_1, γ_2 – ОСШ сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$ соответственно на входе коррелятора. Величина BT называется энергетическим выигрышем вычисления корреляции (ЭВК) (processing gain – PG).

Для сигнала с прямоугольным спектром среднеквадратическое отклонение (СКО) оценки

$\hat{\Delta t}$, соответствующее границе Крамера–Рао, определяется выражением [11]:

$$\sigma_{\Delta \hat{t}} \approx \frac{0.55}{B_s} \frac{1}{\sqrt{BT\gamma_{\text{эф}}}}, \quad (1)$$

где B_s – ширина полосы сигнала. Далее в качестве СКО оценки TDOA будем принимать это значение, так как оценки максимального правдоподобия являются асимптотически эффективными.

Методы. Можно выделить ряд основных факторов, влияющих на точность геолокации методом TDOA–TDOA:

- точность оценки координат используемых СР;
- расстояние между используемыми СР (база геолокации), взаимное положение СР и ИРИ (геометрический фактор);
- отличие фактической формы Земли от референц-эллипсоида;
- ширина полосы сигнала B_s ;
- энергетический выигрыш вычисления корреляции BT ;
- ЭОСШ в принятом сигнале $\gamma_{\text{эф}}$;
- нестабильность частоты гетеродина СР, интервал стационарности параметра TDOA Δt и прочие факторы.

Степень влияния перечисленных факторов на точность ОМП ИРИ различна и может являться темой отдельного исследования. В настоящей статье рассмотрено влияние первого фактора (точности оценки координат используемых СР) при фиксированных значениях остальных параметров. Далее представлен разработанный метод, позволяющий повысить точность геолокации наземных ИРИ за счет предварительной оценки координат используемых СР.

Координаты большинства геостационарных СР находятся в свободном доступе в сети Интернет в формате TLE – двухстрочном формате данных, представляющем собой набор элементов орбиты спутника [12]. Ошибки ОМП ИРИ при использовании данных TLE могут составлять тысячи километров [13], что недопустимо для решения задачи определения позиции ИРИ.

Известен метод уточнения координат СР, заключающийся в использовании трех реперных станций (РС), которые по команде КГ синхронно излучают известные взаимно ортогональные сигналы, представляющие собой модулированные псевдослучайные последовательности, с мощно-

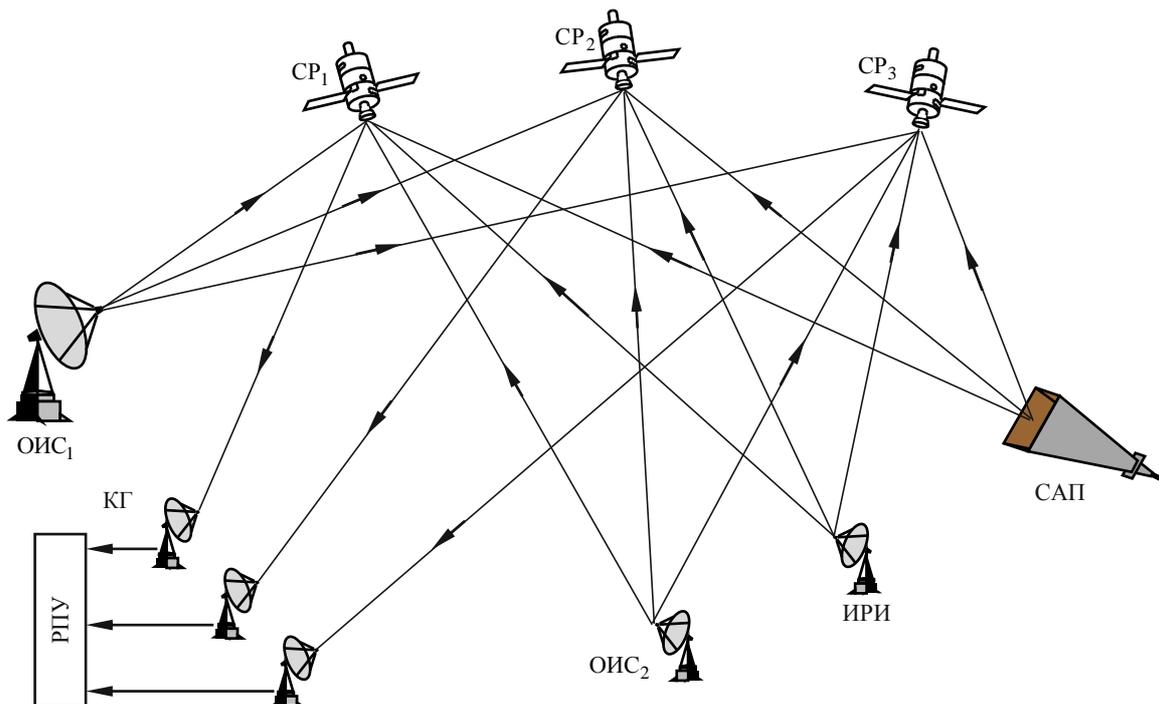


Рис. 2. Схема системы геолокации, работающей по предложенному методу
 Fig. 2. A diagram of a geolocation system working according to the proposed method

стью ниже уровня шумов спутниковых транспондеров. В КГ на основании оценки времени распространения сигналов от каждой из трех РС суммарно-дальномерным методом вычисляются координаты РС [14, 15]. Недостатки описанного метода – необходимость развертывания трех РС на разнесенных друг от друга на сотни километров площадках, что может быть организационно, экономически или технически затруднительно или невозможно. Поскольку области с максимальной точностью будут располагаться вблизи РС, ее достижение в том или ином регионе Земли влечет необходимость физического перемещения РС в интересующий регион, что зачастую невозможно.

Результаты. Предложенный в настоящей статье метод совместного использования станции активного подсвета (САП) и опорных источников сигналов (ОИС) позволяет устранить описанные недостатки использования трех РС. Разработанный метод заключается в использовании одной САП и двух ОИС с известными координатами. Схема системы геолокации, работающей по предложенному методу, показана на рис. 2. Геолоцируемый ИРИ работает через CP_2 , поэтому CP_2 – основной, CP_1 и CP_3 – вспомогательные. ОИС₁ и ОИС₂ – легальные источники сигнала, работающие через тот же спутник CP_2 , что и геолоцируемый ИРИ.

Сигналы, передаваемые по боковым лепесткам ДН ОИС₁ и ОИС₂, как и геолоцируемого ИРИ, ретранслируются вспомогательными CP_1 и CP_3 . САП представляет собой радиопередатчик с антенно-фидерной системой, обеспечивающей диаграмму направленности шириной примерно 30° (например, рупорного типа), что позволяет облучать одновременно как основной, так и вспомогательные РС. ОСШ сигнала САП должно быть достаточно низким (не больше –20 дБ), чтобы не создавать помех легальным системам связи. В состав КГ входят 3 антенны, присоединенные к многоканальному когерентному радиоприемному устройству (РПУ). В КГ синхронно когерентно записываются сигналы ИРИ, ОИС₁, ОИС₂ и САП.

Позиции элементов системы описываются координатами:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{КГ} &= [x_{КГ}, y_{КГ}, z_{КГ}]^T - \text{КГ}; \\ \mathbf{x}_1 &= [x_{ОИС_1}, y_{ОИС_1}, z_{ОИС_1}]^T - \text{ОИС}_1; \\ \mathbf{x}_2 &= [x_{ОИС_2}, y_{ОИС_2}, z_{ОИС_2}]^T - \text{ОИС}_2; \\ \mathbf{x}_3 &= [x_{САП}, y_{САП}, z_{САП}]^T - \text{САП}; \\ \mathbf{x}_{CP_1} &= [x_{CP_1}, y_{CP_1}, z_{CP_1}]^T - CP_1; \end{aligned}$$

$$\mathbf{x}_{CP_2} = [x_{CP_2}, y_{CP_2}, z_{CP_2}]^T - CP_2;$$

$$\mathbf{x}_{CP_3} = [x_{CP_3}, y_{CP_3}, z_{CP_3}]^T - CP_3$$

("T" – символ транспонирования).

Координаты КГ, ОИС₁, ОИС₂, САП и CP₂ считаются известными (например, полученными по TLE). Уточнение координат ведется на основе синхронно записанных в КГ сигналов, принятых с направлений на CP₁ – CP₃. Далее будем рассматривать только пару основной/вспомогательный спутник-ретранслятор CP₂ и CP₁, так как для пары CP₂ и CP₃ рассуждения и выкладки будут аналогичны.

Введем также обозначения исходных координат, подлежащих уточнению:

$$\mathbf{x}_{CP_1}^{исх} = [x_{CP_1}^{исх}, y_{CP_1}^{исх}, z_{CP_1}^{исх}]^T - CP_1;$$

$$\mathbf{x}_{CP_2}^{исх} = [x_{CP_2}^{исх}, y_{CP_2}^{исх}, z_{CP_2}^{исх}]^T - CP_2.$$

Будем исходить из утверждения, что на точность линии положения TDOA существенно влияет не ошибка оценки абсолютных координат основного и вспомогательного CP, а ошибка оценки положения вспомогательного CP относительно основного. Тогда можно считать оценкой координат CP₂ его исходные координаты: $\hat{\mathbf{x}}_{CP_2} = \mathbf{x}_{CP_2}^{исх}$.

Выражение для нахождения оценки координат CP₁ будет получено далее.

Справедливо следующее равенство:

$$\begin{aligned} & \sqrt{(\mathbf{x}_{CP_2} - \mathbf{x}_i)^T (\mathbf{x}_{CP_2} - \mathbf{x}_i) +} \\ & + \sqrt{(\mathbf{x}_{CP_2} - \mathbf{x}_{КГ})^T (\mathbf{x}_{CP_2} - \mathbf{x}_{КГ}) -} \\ & - \sqrt{(\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_i)^T (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_i) -} \\ & - \sqrt{(\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_{КГ})^T (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_{КГ})} = c\Delta\tau_i, \\ & i = 1, 2, 3, \end{aligned}$$

где c – скорость света; $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$ – разность моментов времени прибытия в КГ сигналов ОИС₁ и ОИС₂ со CP₂ и CP₁ соответственно; $\Delta\tau_3$ – разность моментов времени прибытия в КГ сигнала САП со CP₂ и CP₁.

Обозначим

$$\begin{aligned} r_i &= \sqrt{(\mathbf{x}_{CP_2} - \mathbf{x}_i)^T (\mathbf{x}_{CP_2} - \mathbf{x}_i) +} \\ & + \sqrt{(\mathbf{x}_{CP_2} - \mathbf{x}_{КГ})^T (\mathbf{x}_{CP_2} - \mathbf{x}_{КГ})}, \\ & i = 1, 2, 3, \end{aligned}$$

и возведем полученное выражение в квадрат:

$$\begin{aligned} & (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_i)^T (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_i) + \\ & + (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_{КГ})^T (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_{КГ}) + \\ & + 2 \left[(\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_i)^T (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_i) \times \right. \\ & \left. \times (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_{КГ})^T (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_{КГ}) \right]^{1/2} = \\ & = r_i^2 - 2cr_i\Delta\tau_i + c^2\Delta\tau_i^2, i = 1, 2, 3. \end{aligned}$$

Обозначим:

$$\begin{aligned} a_i &= r_i^4 + 6c^2r_i^2\Delta\tau_i^2 + \\ & + c^4\Delta\tau_i^4 - 4cr_i^3\Delta\tau_i - 4c^3r_i\Delta\tau_i^3; \\ b_i &= -2(r_i^2 - 2cr_i\Delta\tau_i + c^2\Delta\tau_i^2), i = 1, 2, 3. \end{aligned}$$

Тогда:

$$\begin{aligned} & 2(\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_i)^T (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_i) \times \\ & \times (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_{КГ})^T (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_{КГ}) = \\ & = a_i + (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_i)^T (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_i) \times \\ & \times (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_i)^T (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_i) + \\ & + (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_{КГ})^T (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_{КГ}) \times \\ & \times (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_{КГ})^T (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_{КГ}) + \\ & + b_i (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_i)^T (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_i) + \\ & + b_i (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_{КГ})^T (\mathbf{x}_{CP_1} - \mathbf{x}_{КГ}), i = 1, 2, 3. \end{aligned}$$

Раскрыв скобки и обозначив

$$\begin{aligned} d_i &= \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_i, g = \mathbf{x}_{КГ}^T \mathbf{x}_{КГ}, \\ k_i &= a_i + (d_i - g)^2 + b_i (d_i + g), \end{aligned}$$

получим:

$$\begin{aligned} & \left(8\mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_{CP_1} \mathbf{x}_{КГ}^T - 4\mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_{CP_1} \mathbf{x}_i^T - \right. \\ & \left. - 4\mathbf{x}_{КГ}^T \mathbf{x}_{CP_1} \mathbf{x}_{КГ}^T - 2b_i \mathbf{x}_{CP_1}^T \right) \mathbf{x}_{CP_1} + \\ & + \left(4d_i \mathbf{x}_i^T + 4g \mathbf{x}_{КГ}^T + 2b_i \mathbf{x}_i^T + \right. \\ & \left. + 2b_i \mathbf{x}_{КГ}^T - 4g \mathbf{x}_i^T - 4d_i \mathbf{x}_{КГ}^T \right) \mathbf{x}_{CP_1} - k_i = 0, \\ & i = 1, 2, 3. \end{aligned}$$

Полученное выражение представляет собой систему трех уравнений второго порядка с тремя неизвестными. Решение данной системы уравнений дает оценку координат CP_1 \hat{x}_{CP_1} . При этом в качестве значений $\Delta\tau_i$ используются оценки $\Delta\hat{\tau}_i$ ($i = 1, 2, 3$), метод нахождения которых описан далее, а в качестве координат CP_2 , как было отмечено ранее, используется значение $x_{CP_2} = x_{CP_2}^{исх}$, которое не подвергается уточнению.

Рассмотрим метод нахождения оценок $\Delta\hat{\tau}_i$ ($i = 1, 2, 3$). Оценки максимального правдоподобия $\Delta\hat{\tau}_1$ и $\Delta\hat{\tau}_2$ находятся максимизацией модуля ВФН сигналов ОИС₁ и ОИС₂, принятых со CP_2 и CP_1 . Параметр

$$\Delta\tau_3 = \tau_{САП-CP_2-КГ} - \tau_{САП-CP_1-КГ}$$

представляет собой разность моментов времени прибытия в КГ сигнала САП, ретранслированного CP_2 $\tau_{САП-CP_2-КГ}$ и CP_1 $\tau_{САП-CP_1-КГ}$, причем

$$\tau_{САП-CP_i-КГ} = t_{зап}^{CP_i} + \Delta\tau_{САП}^{CP_i} - t_{изл}, \quad i = 1, 2,$$

где $t_{зап}^{CP_i}$ ($i = 1, 2$) – абсолютное время начала записи в КГ сигнала, принятого со CP_i ; $\Delta\tau_{САП}^{CP_i}$ ($i = 1, 2$) – смещение начала сигнала САП относительно начала записанного сигнала со CP_i ; $t_{изл}$ – абсолютное время начала излучения САП. Так как записи сигналов со CP_2 и CP_1 в КГ осуществляются синхронно, т. е. $t_{зап}^{CP_1} = t_{зап}^{CP_2}$, то

$$\Delta\tau_3 = \Delta\tau_{САП}^{CP_2} - \Delta\tau_{САП}^{CP_1}.$$

Таким образом, для нахождения оценки $\Delta\hat{\tau}_3$ следует найти оценки параметров $\Delta\hat{\tau}_{САП}^{CP_2}$ и $\Delta\hat{\tau}_{САП}^{CP_1}$, тогда $\Delta\hat{\tau}_3 = \Delta\hat{\tau}_{САП}^{CP_2} - \Delta\hat{\tau}_{САП}^{CP_1}$. В качестве оценок указанных параметров будем использовать оценки максимального правдоподобия, полученные при максимизации ВФН сигнала, принятого со CP_i ($i = 1, 2$) и известного излученного сигнала САП. В данном случае при расчете ВФН $s_1(t) = u(t)$ – известный эталонный сигнал, излучаемый САП;

$$s_2(t) = u\left(t - \Delta\tau_{САП}^{CP_i}\right) \exp\left[j2\pi\Delta f\left(t - \Delta\tau_{САП}^{CP_i}\right)\right] + n(t)$$

– смещенный по частоте и по времени сигнал САП, находящийся в записи сигнала, принятого со CP_i ($i = 1, 2$) под шумами транспондера. При полосе сигнала САП 30 МГц (что соответствует типичному значению ширины полосы спутникового транспондера) и длительности записи 2 с ЭВК составит 77.8 дБ, что при требуемом ОСШ на выходе коррелятора в 20 дБ позволит обнаружить сигнал САП с ОСШ = –57.8 дБ.

Рассмотрим точность оценок $\Delta\hat{\tau}_i$ ($i = 1, 2, 3$). СКО оценок $\Delta\hat{\tau}_1$ и $\Delta\hat{\tau}_2$ вычисляются по формуле (1). Так как оценка $\Delta\hat{\tau}_3$ равна разности двух независимых случайных величин $\Delta\hat{\tau}_{САП}^{CP_2}$ и $\Delta\hat{\tau}_{САП}^{CP_1}$, то СКО оценки $\Delta\hat{\tau}_3$ в случае одинаковых значений СКО оценок $\Delta\hat{\tau}_{САП}^{CP_2}$ и $\Delta\hat{\tau}_{САП}^{CP_1}$ имеет вид

$$\sigma_{\Delta\hat{\tau}_3} \approx \frac{0.55}{B_s} \frac{1}{\sqrt{BT\gamma_{вх}}},$$

где $\gamma_{вх}$ – ОСШ сигнала САП в синхронных записях сигналов, поступивших от CP_2 и CP_1 (в обоих приемных каналах будем считать ОСШ одинаковым).

Важным является тот факт, что оператор КГ имеет возможность влиять на значения $\sigma_{\Delta\hat{\tau}_1}$ и $\sigma_{\Delta\hat{\tau}_2}$, только лишь изменяя длительность записи T , при этом СКО будут меняться пропорционально $T^{1/2}$. В лучшем случае может существовать возможность выбора сигнала ОИС с максимальной шириной полосы B_s из конечного набора работающих легальных источников радиоизлучения, координаты которых известны. На значение $\sigma_{\Delta\hat{\tau}_3}$ указанные ограничения не накладываются, так как ширину полосы B_s сигнала САП выбирает сам разработчик системы геолокации или оператор КГ с целью достижения требуемого значения $\sigma_{\Delta\hat{\tau}_3}$ и сохранения при этом скрытности при работе САП. Таким образом, можно выбрать такую ширину полосы B сигнала САП, при которой $\sigma_{\Delta\hat{\tau}_3}$ будет значительно меньше, чем $\sigma_{\Delta\hat{\tau}_1}$ и

$\sigma_{\Delta\hat{\tau}_2}$, что позволит существенно повысить точность ОМП ИРИ в регионе расположения САП.

Как было описано ранее, поиск оценок $\Delta\hat{\tau}_1$ и $\Delta\hat{\tau}_2$ сигналов ОИС осуществляется в соответствии со стратегией максимального правдоподобия максимизацией модуля ВФН принятых сигналов. Однако в реальных условиях сигнал ОИС не всегда присутствует в сигнале, принятом со вспомогательного СР (например, если ОИС не облучается вспомогательным СР). Таким образом, процедура уточнения позиций СР является двухэтапной: на первом этапе выполняется различение двух гипотез: нулевой – наличие в сигнале вспомогательного СР лишь АБГШ $[H_0 : s_2(t) = n(t)]$ и единичной – наличие в этом сигнале суммы смещенного по времени и по частоте сигнала ОИС и АБГШ

$$\{H_1 : s_2(t) = u(t - \Delta\tau) \exp[j2\pi f_2(t - \Delta\tau)] + n(t)\}.$$

На втором этапе при принятии решения о справедливости гипотезы H_1 оценивается параметр $\Delta\tau$.

При такой организации процедуры целесообразно использовать обобщенный метод отношения правдоподобия, в соответствии с которым необходимо максимизировать модуль ВФН, после чего сравнить полученное значение максимума с пороговым значением Λ . Если порог не превышен, то принимается решение о справедливости гипотезы H_0 ; в противном случае принимается гипотеза H_1 , а в качестве оценок $\Delta\hat{\tau}$ и $\Delta\hat{f}$ – аргументы максимума ВФН. В качестве порога Λ целесообразно выбрать порог по критерию Неймана–Пирсона.

На практике нередко наблюдаются ситуации, когда модуль ВФН имеет сразу несколько (m) локальных максимумов, превышающих порог Λ и соответствующих различным задержкам $\Delta\tau_i$ ($i = 1, \dots, m$). При этом истинным корреляционным откликом сигнала ОИС является локальный максимум, соответствующий некоторому значению $\Delta\tau_k$ и в общем случае не являющийся глобальным максимумом модуля ВФН. Указанная ситуация может иметь ряд причин, например: автокорреляционная функция сигнала ОИС может иметь множество побочных локальных максимумов, которые вследствие воздействия шума

на ВФН могут превысить основной максимум; шумовой выброс на ВФН может превысить по модулю корреляционный отклик ОИС; в записанных сигналах с основного и вспомогательного СР, помимо собственно сигнала ОИС и АБГШ могут присутствовать помеховые сигналы сторонних ИРИ (вследствие, например, недостаточной поляризационной развязки, приводящей к "просачиванию" сигналов ортогональных поляризаций, нарушения нормы боковых лепестков ДН сторонних ИРИ либо использования режима "несущая в несущей"), из-за чего ВФН является суперпозицией ВФН всех сигналов в записи. Таким образом, появляется неоднозначность относительно корреляционного пика, вызванного именно сигналом ОИС. Очевидно, что при ошибке в выборе корреляционного отклика при оценке параметра $\Delta\tau$ полученная оценка будет смещенной, а оценка координат СР будет произведена с существенной ошибкой. Разработанный метод совместного использования сигналов ОИС и САП позволяет разрешить неоднозначность при поиске корреляционного пика сигнала ОИС. Рассмотрим метод разрешения неоднозначности подробнее.

Не умаляя общности, рассмотрим случай, когда модуль ВФН сигналов некоторого ОИС, принятых с основного СР₂ и вспомогательного СР₁, имеет 2 локальных максимума, превышающих порог Λ и соответствующих задержкам $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$, а модуль ВФН сигналов этого же ОИС, принятых с основного СР₂ и вспомогательного СР₃, имеет один локальный максимум, превышающий порог и соответствующий задержке $\Delta\tau_{СР_3}$. Задача состоит в определении истинного пика ОИС из $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$. Пусть истинным (соответствующим сигналу ОИС) является пик, соответствующий $\Delta\tau_1$. Метод разрешения неоднозначности заключается в следующем: с помощью сигнала САП производится оценка координат СР₁, СР₂ и СР₃ (метод, в соответствии с которым производится оценка координат СР по сигналу САП, описан далее), далее методом TDOA–TDOA выполняется ОМП ОИС. Для построения одной линии положения используется оценка задержки $\Delta\tau_{СР_3}$, а для построения другой линии положения используются последовательно оценки задержек $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$. В результате будут получены 2 варианта оценки координат ОИС.

Рассмотрим декартовую систему координат $x_{\text{ОИС}} y_{\text{ОИС}}$ на плоскости. Начало этой системы соответствует истинному положению ОИС, система координат расположена в плоскости горизонта, ось $x_{\text{ОИС}}$ направлена на север, ось $y_{\text{ОИС}}$ – на восток. Пусть $\hat{\mathbf{x}}_{\text{ОИС}}^{\text{ист}} = [\hat{x}_{\text{ОИС}}^{\text{ист}}, \hat{y}_{\text{ОИС}}^{\text{ист}}]^T$ – оценка координат ОИС в системе $x_{\text{ОИС}} y_{\text{ОИС}}$, полученная по истинной задержке $\Delta\tau_1$, $\hat{\mathbf{x}}_{\text{ОИС}}^{\text{ложн}} = [\hat{x}_{\text{ОИС}}^{\text{ложн}}, \hat{y}_{\text{ОИС}}^{\text{ложн}}]^T$ – координаты в этой же системе, полученные по ложной задержке $\Delta\tau_2$.

Оценка $\hat{\mathbf{x}}_{\text{ОИС}}^{\text{ист}}$ является случайной величиной, характеризующей ошибку ОМП ОИС. В литературе, как правило, ошибка ОМП рассматривается как двумерная нормально распределенная центрированная случайная величина с плотностью вероятности [16]

$$p_{\hat{\mathbf{x}}_{\text{ОИС}}^{\text{ист}}}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2\pi|\Sigma|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\mathbf{x}^T \Sigma^{-1} \mathbf{x}\right),$$

где

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{\hat{x}_{\text{ОИС}}}^2 & \rho_{\hat{x}_{\text{ОИС}} \hat{y}_{\text{ОИС}}} \sigma_{\hat{x}_{\text{ОИС}}} \sigma_{\hat{y}_{\text{ОИС}}} \\ \rho_{\hat{x}_{\text{ОИС}} \hat{y}_{\text{ОИС}}} \sigma_{\hat{x}_{\text{ОИС}}} \sigma_{\hat{y}_{\text{ОИС}}} & \sigma_{\hat{y}_{\text{ОИС}}}^2 \end{bmatrix}$$

– ковариационная матрица, причем $\sigma_{\hat{x}_{\text{ОИС}}}$ и $\sigma_{\hat{y}_{\text{ОИС}}}$ – СКО случайных величин $\hat{x}_{\text{ОИС}}^{\text{ист}}$ и $\hat{y}_{\text{ОИС}}^{\text{ист}}$ соответственно; $\rho_{\hat{x}_{\text{ОИС}} \hat{y}_{\text{ОИС}}}$ – коэффициент корреляции случайных величин $\hat{x}_{\text{ОИС}}^{\text{ист}}$ и $\hat{y}_{\text{ОИС}}^{\text{ист}}$; $|\cdot|$ – символ определителя матрицы. Если известны значения СКО отклонений точек линий положения в рассчитанной позиции ИРИ σ_{TDOA_1} и σ_{TDOA_2} , а также угол, под которым пересекаются линии положения, можно вычислить параметры $\rho_{\hat{x}_{\text{ОИС}} \hat{y}_{\text{ОИС}}}$, $\sigma_{\hat{x}_{\text{ОИС}}}$ и $\sigma_{\hat{y}_{\text{ОИС}}}$.

Так как ложный пик на ВФН с одинаковой априорной вероятностью может соответствовать любой задержке $\Delta\tau_2$ из диапазона значений, определяемого пересечением зон радиовидимости основного и вспомогательного СР, $\hat{\mathbf{x}}_{\text{ОИС}}^{\text{ложн}}$ можно рассматривать как случайную величину,

имеющую двумерное равномерное распределение с плотностью вероятности

$$p_{\hat{\mathbf{x}}_{\text{ОИС}}^{\text{ложн}}}(\mathbf{x}) = 1/S,$$

где S – площадь участка поверхности Земли, являющегося областью пересечения зон радиовидимости используемых СР.

Задача выбора истинного пика сводится к задаче различения двух гипотез: H_0 – первый пик истинный, второй пик ложный и H_1 – второй пик истинный, первый – ложный. Так как $\hat{\mathbf{x}}_{\text{ОИС}}^{\text{ист}}$ и $\hat{\mathbf{x}}_{\text{ОИС}}^{\text{ложн}}$ – независимые случайные величины, их совместные условные (при справедливости гипотез H_0 либо H_1) плотности вероятности факторизуемы и имеют вид

$$\begin{aligned} p_{\hat{\mathbf{x}}_{\text{ОИС}}^{\text{ист}}, \hat{\mathbf{x}}_{\text{ОИС}}^{\text{ложн}}}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2/H_0) &= \\ &= \frac{1}{2\pi S |\Sigma|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\mathbf{x}_1^T \Sigma^{-1} \mathbf{x}_1\right); \\ p_{\hat{\mathbf{x}}_{\text{ОИС}}^{\text{ист}}, \hat{\mathbf{x}}_{\text{ОИС}}^{\text{ложн}}}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2/H_1) &= \\ &= \frac{1}{2\pi S |\Sigma|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\mathbf{x}_2^T \Sigma^{-1} \mathbf{x}_2\right), \end{aligned}$$

где \mathbf{x}_1 и \mathbf{x}_2 – координаты, полученные по первому и второму пикам соответственно; Σ^{-1} – матрица, обратная Σ . Тогда правило принятия решения, оптимальное по критерию максимума отношения правдоподобий, сводится к следующему: если $\mathbf{x}_2^T \Sigma^{-1} \mathbf{x}_2 > \mathbf{x}_1^T \Sigma^{-1} \mathbf{x}_1$, решение принимается в пользу $\Delta\tau_1$, в противном случае – в пользу $\Delta\tau_2$.

На практике не всегда имеется достаточное количество априорных данных для вычисления параметров $\rho_{\hat{x}_{\text{ОИС}} \hat{y}_{\text{ОИС}}}$, $\sigma_{\hat{x}_{\text{ОИС}}}$ и $\sigma_{\hat{y}_{\text{ОИС}}}$. В таком случае не представляется возможным при выборе истинного пика использовать критерий максимума отношения правдоподобий. Тогда можно использовать следующее правило: решение принимается в пользу того из двух пиков, для которого расстояние между рассчитанным по методу TDOA–TDOA положением ОИС и истинным (известным) положением ОИС минимально. Если

$$\mathbf{x}_1^T \mathbf{x}_1 < \mathbf{x}_2^T \mathbf{x}_2, \quad (2)$$

то решение принимается в пользу $\Delta\tau_1$, в противном случае – в пользу $\Delta\tau_2$.

Найдем вероятность принятия правильного решения $P_{\text{пр}}$ в пользу истинной задержки $\Delta\tau_1$, которая равна вероятности выполнения неравенства (2).

Введем обозначение: $d_{\text{ложн}} = \sqrt{\mathbf{x}_2^T \mathbf{x}_2}$ и будем рассматривать его как параметр. Перейдем от коррелированных (в общем случае) случайных величин $\hat{x}_{\text{ОИС}}^{\text{ист}}$ и $\hat{y}_{\text{ОИС}}^{\text{ист}}$ к случайным величинам $\hat{x}'_{\text{ОИС}}$ и $\hat{y}'_{\text{ОИС}}$ с помощью линейного преобразования:

$$\begin{aligned}\hat{x}'_{\text{ОИС}} &= \hat{x}_{\text{ОИС}}^{\text{ист}} \cos \alpha + \hat{y}_{\text{ОИС}}^{\text{ист}} \sin \alpha; \\ \hat{y}'_{\text{ОИС}} &= -\hat{x}_{\text{ОИС}}^{\text{ист}} \sin \alpha + \hat{y}_{\text{ОИС}}^{\text{ист}} \cos \alpha,\end{aligned}$$

где

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{2\rho \hat{x}_{\text{ОИС}} \hat{y}_{\text{ОИС}} \sigma_{\hat{x}_{\text{ОИС}}} \sigma_{\hat{y}_{\text{ОИС}}}}{\sigma_{\hat{x}_{\text{ОИС}}}^2 - \sigma_{\hat{y}_{\text{ОИС}}}^2} \right)$$

при $\sigma_{\hat{x}_{\text{ОИС}}} \neq \sigma_{\hat{y}_{\text{ОИС}}}$;

$$\alpha = \frac{\pi}{4} \text{ при } \sigma_{\hat{x}_{\text{ОИС}}} = \sigma_{\hat{y}_{\text{ОИС}}}.$$

В результате указанного линейного преобразования осуществляется переход к нормально распределенным центрированным независимым случайным величинам $\hat{x}'_{\text{ОИС}}$ и $\hat{y}'_{\text{ОИС}}$. СКО полученных случайных величин равны:

$$\begin{aligned}\sigma_{\hat{x}'_{\text{ОИС}}} &= \left(\sigma_{\hat{x}_{\text{ОИС}}}^2 \cos^2 \alpha + \right. \\ &+ \rho \hat{x}_{\text{ОИС}} \hat{y}_{\text{ОИС}} \sigma_{\hat{x}_{\text{ОИС}}} \sigma_{\hat{y}_{\text{ОИС}}} \sin 2\alpha + \left. \sigma_{\hat{y}_{\text{ОИС}}}^2 \sin^2 \alpha \right)^{1/2}; \\ \sigma_{\hat{y}'_{\text{ОИС}}} &= \left(\sigma_{\hat{x}_{\text{ОИС}}}^2 \sin^2 \alpha - \right. \\ &- \rho \hat{x}_{\text{ОИС}} \hat{y}_{\text{ОИС}} \sigma_{\hat{x}_{\text{ОИС}}} \sigma_{\hat{y}_{\text{ОИС}}} \sin 2\alpha + \left. \sigma_{\hat{y}_{\text{ОИС}}}^2 \cos^2 \alpha \right)^{1/2}.\end{aligned}$$

Поскольку

$$\mathbf{x}_1^T \mathbf{x}_1 = (\hat{x}'_{\text{ОИС}})^2 + (\hat{y}'_{\text{ОИС}})^2,$$

вероятность $P_{\text{пр}}$ можно записать как

$$P_{\text{пр}} = P \left\{ (\hat{x}'_{\text{ОИС}})^2 + (\hat{y}'_{\text{ОИС}})^2 < d_{\text{ложн}}^2 \right\}.$$

Для вычисления вероятности выполнения представленного неравенства требуется найти плотность вероятности суммы квадратов двух независимых нормально распределенных центрированных случайных величин, имеющих раз-

личное СКО. Случайная величина $\frac{(\hat{x}'_{\text{ОИС}})^2}{(\sigma_{\hat{x}'_{\text{ОИС}}})^2}$

имеет распределение χ -квадрат с одной степенью свободы $[\sim \chi^2(1)]$, которое, в свою очередь, совпадает с гамма-распределением: $\chi^2(1) = \Gamma(1/2, 2)$.

Так как $\frac{(\hat{x}'_{\text{ОИС}})^2}{(\sigma_{\hat{x}'_{\text{ОИС}}})^2} \sim \Gamma(1/2, 2)$, по свойству гам-

ма-распределения получим:

$$\begin{aligned}(\hat{x}'_{\text{ОИС}})^2 &\sim \Gamma \left[1/2, 2(\sigma_{\hat{x}'_{\text{ОИС}}})^2 \right]; \\ (\hat{y}'_{\text{ОИС}})^2 &\sim \Gamma \left[1/2, 2(\sigma_{\hat{y}'_{\text{ОИС}}})^2 \right].\end{aligned}$$

Таким образом, требуется найти сумму двух независимых случайных величин, имеющих гамма-распределения с параметром формы 1/2 и разными параметрами масштаба.

В общем случае случайная величина U , представляющая собой сумму q независимых случайных величин ζ_i , таких, что $\zeta_i \sim \Gamma(\alpha_i, \beta_i)$, $i = 1, \dots, q$, имеет плотность вероятности [17]:

$$p_U(u) = \begin{cases} C \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\delta_k u^{\rho+k-1} e^{-u/\beta_1}}{\Gamma(\rho+k) \beta_1^{\rho+k}}, & u > 0; \\ 0, & u \leq 0, \end{cases} \quad (3)$$

где

$$\begin{aligned}C &= \prod_{i=1}^q (\beta_1/\beta_i)^{\alpha_i}; \quad \delta_0 = 1; \\ \delta_{k+1} &= \frac{1}{k+1} \sum_{i=1}^{k+1} i \gamma_i \delta_{k+1-i}, \quad k = 1, 2, \dots; \\ \rho &= \sum_{i=1}^q \alpha_i,\end{aligned}$$

причем

$$\gamma_k = \frac{\sum_{i=1}^q \alpha_i (1 - \beta_1/\beta_i)^k}{k}, \quad k = 1, 2, \dots$$

Отсюда получим окончательное выражение для вероятности принятия правильного решения:

$$P_{\text{пр}} = \int_0^{d_{\text{ложн}}^2} p_U(u) du,$$

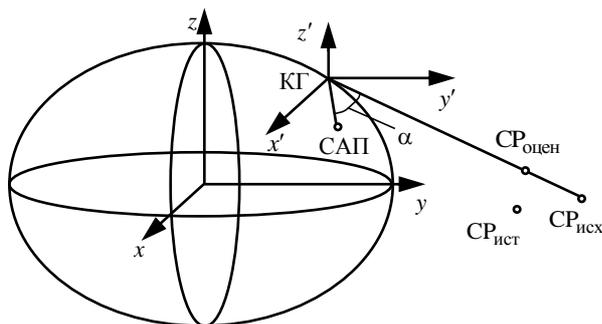


Рис. 3. Уточнение координат СР с помощью САП
 Fig. 3. Estimation of the relay satellite coordinates using a barrage jammer

где для расчета $p_U(u)$ по (3) принимаются $q=2$; $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$; $\beta_1 = 2(\sigma_{\dot{x}_{ОИС}})^2$; $\beta_2 = 2(\sigma_{\dot{y}_{ОИС}})^2$.

Как отмечено ранее, важным этапом предложенного метода является оценка координат СР с помощью сигнала САП, предшествующая ОМП ОИС по каждому из пиков. Рассмотрим принцип такой оценки. На рис. 3 xuz – система координат ЕСЕФ, $x'y'z'$ – топоцентрическая система координат, полученная параллельным переносом системы координат xuz таким образом, что начало системы $x'y'z'$ совпадает с позицией КГ. Тогда в системе $x'y'z'$ координаты КГ $\mathbf{x}'_{КГ} = [0, 0, 0]^T$, при этом в системе ЕСЕФ координаты КГ $\mathbf{x}_{КГ} = [x_{КГ}, y_{КГ}, z_{КГ}]^T$. В системе $x'y'z'$ координаты САП $\mathbf{x}'_{САП} = [x'_{САП}, y'_{САП}, z'_{САП}]^T$, исходные координаты СР, подлежащие уточнению (рис. 3, $\text{СР}_{ист}$) – $\mathbf{x}_{СР}^{ист} = [x_{СР}^{ист}, y_{СР}^{ист}, z_{СР}^{ист}]^T$, оценка координат СР (рис. 3, $\text{СР}_{оцен}$) – $\mathbf{x}'_{СР} = [x'_{СР}, y'_{СР}, z'_{СР}]^T$. На рис. 3 $\text{СР}_{ист}$ – истинное положение СР, α – угол между направлениями на САП и на $\text{СР}_{ист}$.

Так как для уточнения координат СР используется одна САП, возможна коррекция лишь по одной из координат. Рассмотрим коррекцию по наклонной дальности. Примем, что направление из начала координат системы $x'y'z'$ на $\text{СР}_{ист}$ совпадает с направлением на $\text{СР}_{оцен}$, а наклонная дальность до $\text{СР}_{оцен}$ такова, что должно выполняться равенство

$$\sqrt{(\mathbf{x}'_{СР} - \mathbf{x}'_{САП})^T (\mathbf{x}'_{СР} - \mathbf{x}'_{САП})} + \sqrt{(\mathbf{x}'_{СР} - \mathbf{x}'_{КГ})^T (\mathbf{x}'_{СР} - \mathbf{x}'_{КГ})} = c\Delta\hat{t}_{САП},$$

что равнозначно равенству

$$\sqrt{(\mathbf{x}'_{СР} - \mathbf{x}'_{САП})^T (\mathbf{x}'_{СР} - \mathbf{x}'_{САП})} + \sqrt{\mathbf{x}'_{СР}{}^T \mathbf{x}'_{СР}} = c\Delta\hat{t}_{САП},$$

где $\Delta\hat{t}_{САП}$ – оценка времени распространения сигнала САП на трассе САП – $\text{СР}_{ист}$ – КГ. Оценку $\Delta\hat{t}_{САП}$ следует вычислять описанным ранее способом (оценкой времени прихода сигнала САП в КГ на основе поиска максимума модуля ВФН).

Найдем выражение для вычисления оценки $\hat{\mathbf{x}}'_{СР}$, исходя из указанных требований. Учитывая требование совпадения направлений на $\text{СР}_{ист}$ и на $\text{СР}_{оцен}$, получаем равенство

$$\hat{\mathbf{x}}'_{СР} = \frac{d_{КГ-СР_{оцен}}}{\sqrt{(\mathbf{x}'_{СР}^{ист})^T \mathbf{x}'_{СР}^{ист}}} \mathbf{x}'_{СР}^{ист},$$

где $d_{КГ-СР_{оцен}}$ – расстояние между КГ и $\text{СР}_{оцен}$, которое, используя теорему косинусов, можно вычислить по формуле

$$d_{КГ-СР_{оцен}} = \frac{\mathbf{x}'_{САП}{}^T \mathbf{x}'_{САП} - (c\Delta\hat{t})^2}{2(\cos\alpha\sqrt{\mathbf{x}'_{САП}{}^T \mathbf{x}'_{САП}} - c\Delta\hat{t})},$$

косинус угла α вычисляется по формуле

$$\cos\alpha = \frac{(\mathbf{x}'_{САП})^T (\mathbf{x}'_{СР}^{ист})}{\sqrt{(\mathbf{x}'_{САП})^T \mathbf{x}'_{САП}} \sqrt{(\mathbf{x}'_{СР}^{ист})^T (\mathbf{x}'_{СР}^{ист})}}.$$

Оценка координат СР в системе ЕСЕФ будет равна $\hat{\mathbf{x}}_{СР} = \hat{\mathbf{x}}'_{СР} + \mathbf{x}_{КГ}$.

Точность геолокации ИРИ методом TDOA–TDOA с уточнением координат СР разработанным методом исследована в сравнении с точностью геолокации ИРИ методом TDOA–TDOA с уточнением координат с помощью трех РС. Оценка точности произведена имитационным моделированием. Параметры моделирования выбраны из типичных диапазонов значений, характерных для систем спутниковой связи, сигналы которых ретранслируются СР, расположенными на ГСО (таблица).

Типичные диапазоны значений параметров сигналов, ретранслируемых СР на ГСО
 Typical ranges of values for the parameters of signals relayed by geostationary relay satellites

Параметр	Типичный диапазон значений
Ширина полосы сигнала, Гц	$5 \cdot 10^3 \dots 30 \cdot 10^6$
ОСШ в сигнале с основного СР, дБ	7...20
ОСШ в сигнале со вспомогательного СР, дБ	-60...-40

Имитационное моделирование произведено для ширины полосы сигналов ИРИ и всех ОИС $B_s = 2$ МГц. ОСШ сигналов ИРИ и всех ОИС, принятых с основного СР₂, принято равным $\gamma_{\text{СР}_2} = 10$ дБ. ОСШ сигналов ИРИ и всех ОИС, принятых с вспомогательных СР₁ и СР₃, положено равным $\gamma_{\text{СР}_1} = \gamma_{\text{СР}_3} = -50$ дБ. При этом ЭОСШ $\gamma_{\text{эф}} \approx -47$ дБ, следовательно, для получения ОСШ на выходе коррелятора не менее $\gamma_{\text{вых}} \geq 20$ дБ требуется значение ЭВК, не меньшее 67 дБ, что требует как минимум $N = 0.5 \cdot 10^7$ комплексных отсчетов. В экспериментах с запасом принято $N = 10^8$ комплексных отсчетов, что соответствует длительности записи сигнала $T = 10^8 / (2 \cdot 10^6) = 50$ с. При этом СКО оценки

TDOA для ИРИ и всех ОИС составило $\sigma_{\Delta \hat{t}}^{\text{ОИС}} = \sigma_{\Delta \hat{t}}^{\text{ИРИ}} = 6.4493 \cdot 10^{-9}$ с. Ширина полосы сигналов САП принята равной 30 МГц, ОСШ сигнала САП – равной – 50 дБ. Длительность обнаружения сигнала САП принята равной 0.5 с, что позволяет получить ЭВК = 71.7 дБ и ОСШ на выходе коррелятора 24.7 дБ. Следовательно, СКО оценки времени прихода сигнала САП составит $\sigma_{\Delta \hat{t}}^{\text{САП}} = 1.0585 \cdot 10^{-9}$ с, при этом $\sigma_{\Delta \hat{t}_3} = 1.4969 \cdot 10^{-9}$ с.

Исходные координаты СР, принятые в модели, соответствуют номинальным координатам спутников на геостационарной орбите, долгота: 10° (основной СР₂), 7° (вспомогательный СР₁) и 13° (вспомогательный СР₃). Амплитуда колебаний СР соответствует типичным значениям на ГСО и равна 0.02° по широте и долготе и 10 км по высоте орбиты. Комплекс геолокации расположен в Санкт-Петербурге (60° с. ш., 30° в. д.). Моделируемые ИРИ располагаются в узлах сетки с шагом 10° по широте и по долготе на показанном на представленных далее рисунках участке земной поверхности. Для каждой координат ИРИ проведено 1000 экспериментов, ошибка ОМП



Рис. 4. Изолинии ошибки ОМП ИРИ, полученные методом TDOA–TDOA с уточнением координат СР с помощью трех РС. Значения ошибки указаны в километрах

Fig. 4. Isolines of the error in determining the radio emission source geolocation, km. TDOA–TDOA method with the relay satellite coordinates estimation using 3 reference stations

ИРИ в указанных координатах получена усреднением по всем экспериментам.

На рис. 4 показана зависимость ошибки ОМП ИРИ методом TDOA–TDOA от координат ИРИ в

случае, когда координаты СР уточнялись с помощью трех РС, размещенных в Санкт-Петербурге, Ростове-на-Дону и Казани. При заданных параметрах моделирования средняя ошибка ОМП

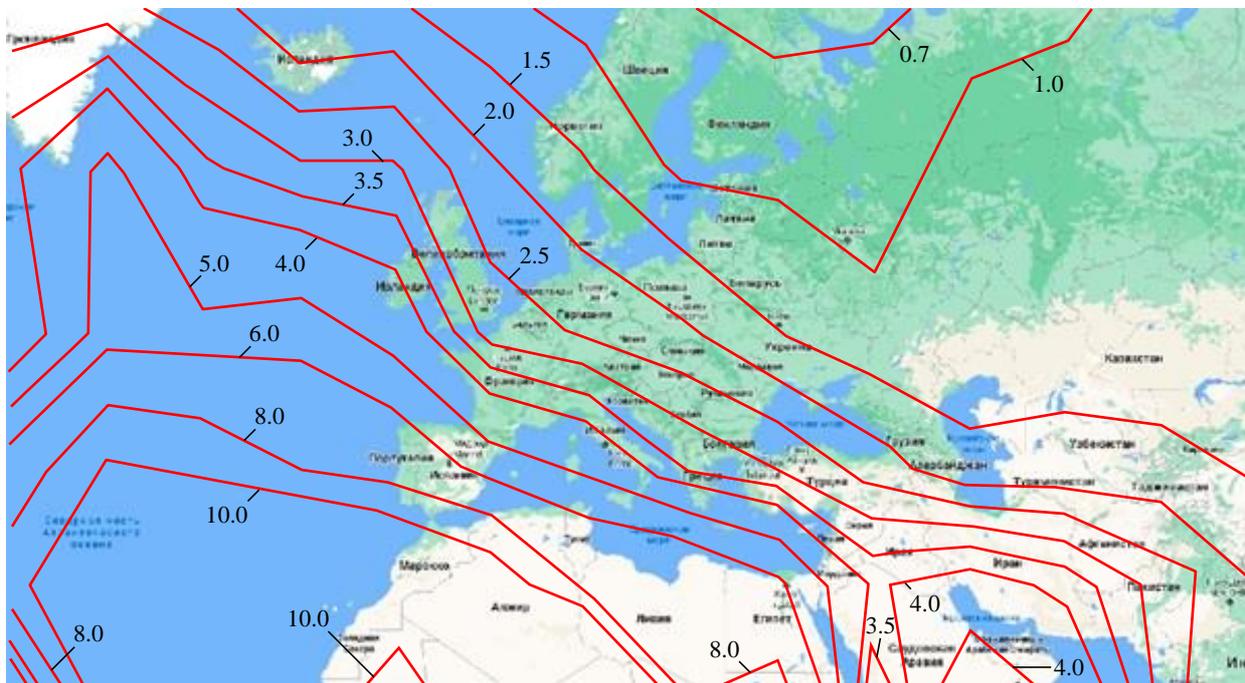


Рис. 5. Изолинии ошибки ОМП ИРИ, полученные методом TDOA–TDOA с уточнением координат СР разработанным методом. Значения ошибки указаны в километрах

Fig. 5. Isolines of the error in determining the radio emission source geolocation, km. TDOA–TDOA method with the relay satellite coordinates estimation using the developed method

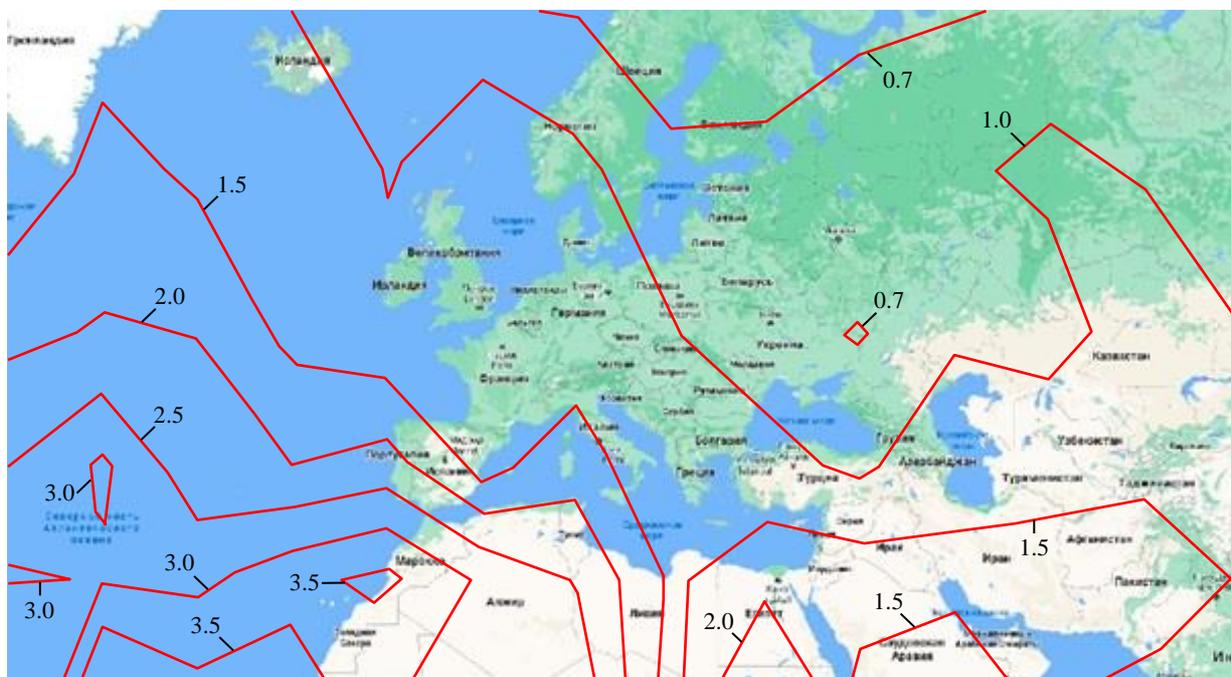


Рис. 6. Изолинии ошибки ОМП ИРИ. Метод TDOA–TDOA с уточнением координат СР разработанным методом. Фокусировка максимальной точности в интересующих регионах. Значения ошибки указаны в километрах

Fig. 6. Isolines of the error in determining the radio emission source geolocation, km. TDOA–TDOA method with the relay satellite coordinates estimation using the developed method. Maximum precision focusing in the regions of interest

ИРИ в глобальной зоне составила от сотен метров до единиц километров, при этом максимальная точность достигается вблизи мест расположения РС, что не позволяет производить фокусировку максимальной точности в произвольных интересующих регионах. Кроме того, одна или несколько РС могут оказываться не в луче СР.

На рис. 5, 6 показана зависимость ошибки ОМП ИРИ методом TDOA–TDOA от координат ИРИ при уточнении координат СР разработанным методом. На рис. 5 САП расположена в Санкт-Петербурге, ОИС расположены в Казани и Ростове-на-Дону. Из результатов, представленных на рис. 6 (ОИС расположены в Париже и Багдаде), следует, что разработанный метод позволяет оперативно увеличивать расстояние между ОИС и САП и фокусировать максимальную точность в требуемых регионах, а также выбирать те ОИС, которые находятся в луче СР. Это приводит к повышению точности по сравнению с методом использования трех РС.

Обсуждение. Разработанный метод совместного использования САП и ОИС позволяет оценивать координаты используемых СР для повы-

шения точности геолокации. Имитационное моделирование показало, что использование ОИС позволяет оперативно менять конфигурацию изолиний точности, фокусируя зоны максимальной точности, составляющей сотни метров – единицы километров, в интересующих регионах, для чего необходимо выбирать ОИС, расположенные в соответствующих регионах. При этом применение САП позволяет повысить точность ОМП ИРИ в регионе ее размещения, а также разрешить возможную неоднозначность относительно истинных пиков на ВФН сигналов ОИС. Максимальная точность ОМП ИРИ достигается в позициях САП, ОИС₁ и ОИС₂, а также внутри образованного ими треугольника. Кроме того, применение сигнала подсвета дает возможность производить компенсацию частотных нестабильностей и частотных отстроек спутниковых гетеродинов, что приводит к дополнительному выигрышу в точности ОМП ИРИ, в энергетике и в быстродействии. Это должно являться темой отдельного исследования.

Список литературы

1. Ho K. C., Chan Y. T. Geolocation of a known altitude object from TDOA and FDOA measurements // IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. 1997. Vol. 33, № 3. P. 770–783. doi: 10.1109/7.599239
2. Musicki D., Koch W. Geolocation using TDOA and FDOA Measurements // 11th Intern. Conf. on Information Fusion, Cologne, Germany, June 30–July 03, 2008. Piscataway: IEEE, 2008. P. 1–8.
3. Passive satellite localization using TDOA/FDOA/AOA measurements / Y. Z. Bin, W. Lei, C. P. Qun, L. A. Nan // Proc. of the 2011 IEEE Intern. Conf. on Intelligent Computing and Integrated Systems (ICISS); Guilin, China, 1–8 Jan. 2013. P. 1–5. doi: 10.1109/ANTHODOLOGY.2013.6784815
4. Алгоритм определения координат земных станций по сигналам спутников-ретрансляторов / Р. В. Волков, В. Н. Саяпин, В. В. Севидов, Л. М. Севидова // Теория и практика современной науки. 2016. № 10 (16). С. 69–72.
5. Оценка координат источника радиоизлучения на основе решения линеаризованной системы уравнений разностно-дальномерного метода / И. В. Гринь, Р. А. Ершов, О. А. Морозов, В. Р. Фидельман // Изв. высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2014. № 4(32). С. 71–81.
6. Yan H., Cao J. K., Chen L. Study on location accuracy of dual-satellite geolocation system // Proc. of the 10th Intern. Conf. on IEEE ICSP, Beijing, China, 24–28 Oct. 2010. Piscataway: IEEE, 2010. P. 107–110. doi: 10.1109/ICOSP.2010.5656806
7. Liu C., Yang L., Mihaylova L. S. Dual-Satellite Source Geolocation with Time and Frequency Offsets and Satellite Location Errors // 20th Intern. Conf. on Information Fusion (Fusion), Xi'an, China, 10–13 July 2017. Piscataway: IEEE, 2017. doi: 10.23919/ICIF.2017.8009716
8. New Method about TDOA Measurement for Satellite Interference Location / L. Ying, H. Daochao, H. Yunlei, H. Jianying // 8th Intern. Symp. on Antennas, Propagation and EM Theory, Kunming, China, 2–5 Nov. 2008. P. 1314–1317. doi: 10.1109/ISAPE.2008.4735467
9. Zhang W., Zhang G. Geolocation Algorithm of Interference Sources from FDOA Measurements Using Satellites Based on Taylor Series Expansion // IEEE 83rd Vehicular Technology Conf. (VTC Spring), Nanjing, China, 15–18 May 2016. Acc. № 16125476. doi: 10.1109/VTCSpring.2016.7504260
10. Stein S. Differential Delay/Doppler ML Estimation with Unknown Signals // IEEE Trans. on Signal Processing. 1993. Vol. 41, № 8. P. 2717–2719. doi: 10.1109/78.229901
11. Stein S. Algorithms for Ambiguity Function Processing // IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing. 1981. Vol. 29, № 3. P. 588–599. doi: 10.1109/TASSP.1981.1163621

12. Hoots F. R., Roehrich R. L. Spacetrack Rep. № 3. Models for propagation of NORAD Element Sets // Aerospace defense center, Peterson air force base. 1980. 91 p. URL: <https://celestrak.com/NORAD/documentation/spacetrk.pdf> (дата обращения 27.04.2021).

13. Галл Р. Д. Точность местоопределения наземных источников, использующих геостационарные ретрансляторы // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 6. С. 17–27.

14. Севидов В. В., Чемаров А. О. Определение координат спутников-ретрансляторов в разностно-дальномерной системе геолокации // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2015. № 3. С. 41–47.

15. Определение канонических параметров спутников-ретрансляторов по радиосигналам опорных реперных станций / Р. В. Волков, С. Р. Малышев, В. В. Севидов, А. Н. Симонов // Тр. Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. 2016. № 655. С. 88–92.

16. Space Electronic Reconnaissance: Localization Theories and Methods / Li Qiang, Guo Fucheng, Fan Yun, Zhou Yiyu, Xhou Caigen. John Wiley & Sons Singapore Pte Ltd., 2014. 416 p.

17. Moschopoulos P. G. The distribution of the sum of independent gamma random variables. Ann. Inst. Statist. Math. 1985. Vol. 37. P. 541–544.

Информация об авторе

Галл Роман Данилович – магистр по направлению "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" (2017), аспирант Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" (направление "Электроника, радиотехника и системы связи"), инженер-программист ООО «Научно-производственное предприятие "Новые технологии телекоммуникаций"» (ООО НПП "НТТ"), главный алгоритмист отдела геолокации. Сфера научных интересов – радиолокация, радионавигация, радиотехника, обработка сигналов.

Адрес: ООО НПП "НТТ", ул. Софьи Ковалевской, д. 20, корп. 1, лит. А, пом. 22Н, Санкт-Петербург, 195256, Россия

E-mail: roman942010@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5196-1213>

References

1. Ho K. C., Chan Y. T. Geolocation of a known altitude object from TDOA and FDOA measurements. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. 1997, vol. 33, no. 3, pp. 770–783. doi: 10.1109/7.599239

2. Musicki D., Koch W. Geolocation using TDOA and FDOA Measurements. 11th Intern. Conf. on Information Fusion, Cologne, Germany, June 30–July 03 2008. Piscataway, IEEE, 2008, pp. 1–8.

3. Bin Y. Z., Lei W., Qun C. P., Nan L. A. Passive satellite localization using TDOA/FDOA/AOA measurements. Proc. of the 2011 IEEE Intern. Conf. on Intelligent Computing and Integrated Systems (ICISS). Guilin, China, 1–8 Jan. 2013, pp. 1–5. doi: 10.1109/ANTHOLOGY.2013.6784815

4. Volkov R. V., Sayapin V. N., Sevidov V. V., Sevidova L. M. Algorithm for determining the coordinates of earth stations from the signals of relay satellites. Theory and practice of modern science. 2016, no. 10 (16), pp. 69–72. (In Russ.)

5. Grin' I. V., Ershov R. A., Morozov O. A., Fidel'man V. R. Estimation of the coordinates of the radio emission source based on the solution of the linearized system of equations of the difference-ranging method. J. of the Universities. Volga region. Technical science. 2014, no. 4 (32), pp. 71–81. (In Russ.)

6. Yan H., Cao J. K., Chen L. Study on location accuracy of dual-satellite geolocation system. Proc. of the 10th Intern. Conf. on IEEE ICSP, Beijing, China, Piscataway. 24–28 Oct. 2010, pp. 107–110, doi: 10.1109/ICOSP.2010.5656806

7. Liu C., Yang L., Mihaylova L. S. Dual-Satellite Source Geolocation with Time and Frequency Offsets and Satellite Location Errors. 20th Intern. Conf. on Information Fusion (Fusion), Xi'an, China, 10–13 July 2017. Piscataway, 2017. doi: 10.23919/ICIF.2017.8009716

8. Ying L., Daochao H., Yunlei H., Jianying H. New Method about TDOA Measurement for Satellite Interference Location. 8th Intern. Symp. on Antennas, Propagation and EM Theory, Kunming, China, 2–5 Nov. 2008, pp. 1314–1317. doi: 10.1109/ISAPE.2008.4735467

9. Zhang W., Zhang G. Geolocation Algorithm of Interference Sources from FDOA Measurements Using Satellites Based on Taylor Series Expansion. IEEE 83rd Vehicular Technology Conf. (VTC Spring), Nanjing, China, 15–18 May 2016. Acc. no. 16125476. doi: 10.1109/VTCSpring.2016.7504260

10. Stein S. Differential Delay/Doppler ML Estimation with Unknown Signals. IEEE Trans. on Signal Processing. 1993, vol. 41, no. 8, pp. 2717–2719. doi: 10.1109/78.229901

11. Stein S. Algorithms for Ambiguity Function Processing. IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing. 1981, vol. 29, no. 3, pp. 588–599. doi: 10.1109/TASSP.1981.1163621
12. Hoots F. R., Roehrich R. L. Spacetrack Rep. no. 3. Models for propagation of NORAD Element Sets. Aerospace defense center, Peterson air force base. 1980. 91 p. Available at: <https://celestrak.com/NORAD/documentation/spacetrk.pdf> (accessed 27.04.2021).
13. Gall R. D. Accuracy of Positioning of Ground Sources Using Geostationary Repeaters. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, no. 6, pp. 17–27. (In Russ.)
14. Sevidov V. V., Chemarov A. O. Determination of coordinates relay satellites in range-difference system geolocation. J. of the Russian Universities. Radioelectronics. 2015, no. 3, pp. 41–47. (In Russ.)
15. Volkov R. V., Malyshev S. R., Sevidov V. V., Simonov A. N. Determination of canonical parameters of relay satellites by radio signals of reference stations. Tr. Proc. of the A. F. Mozhaisky Military Space Academy. 2016, no. 655, pp. 88–92. (In Russ.)
16. Li Qiang, Guo Fucheng, Fan Yun, Zhou Yiyu, Xhou Caigen. Space Electronic Reconnaissance, Localization Theories and Methods. John Wiley & Sons Singapore Pte Ltd., 2014, 416 p.
17. Moschopoulos P. G. The distribution of the sum of independent gamma random variables. Ann. Inst. Statist. Math. 1985, vol. 37, pp. 541–544.

Information about the author

Roman D. Gall, Master in Infocommunication technologies and communication systems (2017), post-graduate student of the Saint Petersburg Electrotechnical University in Electronics, radio engineering and communication systems, engineer-programmer of "New Telecommunication Technologies" RPE Co. Ltd., chief algorithmist of the Geolocation Department. Area of expertise: radiolocation, radio navigation, radio engineering, signal processing. Address: New Telecommunication Technologies RPE Co. Ltd., 20 A Sofia Kovalevskaya St., Bld. 1, Room 22H, St Petersburg 195256, Russia
E-mail: roman942010@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5196-1213>
