

УЧЕТ ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ ДВИЖЕНИЕМ ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ РЕТРАНСЛЯТОРОВ, ПРИ МЕСТООПРЕДЕЛЕНИИ НАЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-8-22-29

Manuscript received 26 March 2021;
Accepted 17 May 2021

Галл Роман Даниилович,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет "ЛЭТИ",
г. Санкт-Петербург, Россия,
roman942010@mail.ru

Ключевые слова: геолокация, определение
местоположения, геостационарный спутник,
функция неопределенности, фазовые искажения

В настоящее время часто наблюдаются случаи незаконного использования ресурса спутников-ретрансляторов, расположенных на геостационарной орбите, и создания непреднамеренных и преднамеренных помех легальным пользователям спутниковых систем связи в том числе из-за несоблюдения норм мощности радиопередающих устройств и диаграмм направленности антенн, а также правил регулирования частотного спектра. Одним из возможных этапов реагирования со стороны радиочастотной службы и операторов спутниковых систем на подобные ситуации может являться оперативная оценка местоположения наземных источников помехового радиоизлучения, нарушающих установленные требования. Существующие методы оценки координат источников радиоизлучения, работающих через геостационарные спутники-ретрансляторы, предполагают вычисление взаимной функции неопределенности (ВФН) сигналов, принятых с нескольких спутников, ретранслирующих сигналы основного и боковых лепестков диаграммы направленности антенны геолокаруемого источника. При этом в случае низкого отношения сигнал/шум (ОСШ) в принятых сигналах требуется осуществлять длительную запись сигналов, и в таких случаях для достижения достаточного ОСШ на выходе коррелятора необходимо учитывать не только доплеровский сдвиг частоты между сигналами, но и изменение сдвига частоты, вызванное изменением векторов скоростей спутников-ретрансляторов. Целью работы является исследование длительности записи, при которой требуется учитывать фазовые искажения, вызванные изменением скорости спутника-ретранслятора, и их влияние на ОСШ на выходе коррелятора, а также разработка метода учета таких искажений. В качестве методов исследования были использованы метод имитационного моделирования, статистическая теория радиотехнических систем и теория цифровой обработки сигналов. В результате исследования была произведена оценка длительности записи сигналов, при которой доплеровский сдвиг частот можно считать константным; введено понятие модифицированной ВФН, учитывающей изменение доплеровского сдвига частот за счет его аппроксимации линейной функцией; произведена оценка максимальной длительности записи сигналов, при которой справедлива предложенная линейная аппроксимация. Сделан вывод, что в случае применения модифицированной ВФН минимальная длительность записи сигналов, при которой гарантированно не будет наблюдаться деградация ОСШ на выходе коррелятора, в 8.1 раз больше, чем при использовании традиционной ВФН.

Информация об авторе:

Галл Роман Даниилович, аспирант Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" (направление "Электроника, радиотехника и системы связи"), кафедра радиоэлектронных средств, Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Галл Р.Д. Учет фазовых искажений, вызванных движением геостационарных ретрансляторов, при местопределении наземных источников радиоизлучения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №8. С. 22-29.

For citation:

Gall R.D. (2021) Consideration of phase distortions caused by the movement of geostationary repeaters when locating ground-based radio emission sources. T-Comm, vol. 15, no.8, pp. 22-29. (in Russian)

Введение

В настоящее время наблюдается активное развитие систем спутниковой связи, повышение их значения в деятельности организаций, служб и государств, а также ужесточение требований к частотным и энергетическим параметрам передающих станций спутниковой связи. При этом зачастую фиксируются случаи непреднамеренного и преднамеренного создания помех пользователям, работающим через спутники-ретрансляторы (СР), расположенные на геостационарной орбите, а также нелегального использования ресурса таких СР. Таким образом, актуальной представляется задача определения местоположения (ОМП) наземных источников радиоизлучения (ИРИ), работающих через геостационарные СР, в интересах, в частности, радиочастотной службы и операторов спутниковых систем связи.

Из литературы известен ряд методов ОМП ИРИ, работающих через геостационарные СР, в частности: TDOA-TDOA (англ. Time Difference of Arrival, временная разность прибытия), TDOA-FDOA (англ. Frequency Difference of Arrival, частотная разность прибытия) и FDOA-FDOA [1-3].

Указанные методы сводятся к построению на поверхности Земли линий положения, полученных разностно-дальномерным (TDOA) либо разностно-доплеровским (FDOA) методом на основании оценки временной либо частотной разности прихода сигналов ИРИ, принятых с нескольких СР, ретранслирующих сигналы основного и боковых лепестков диаграммы направленности антенны ИРИ [4-7]. Для примера рассмотрим принцип построения линии положения методом TDOA, который заключается в построении линии положения, соответствующей разности времени распространения сигнала, принятого с двух геостационарных СР.

На рисунке 1 изображена схема построения линии положения по методу TDOA.

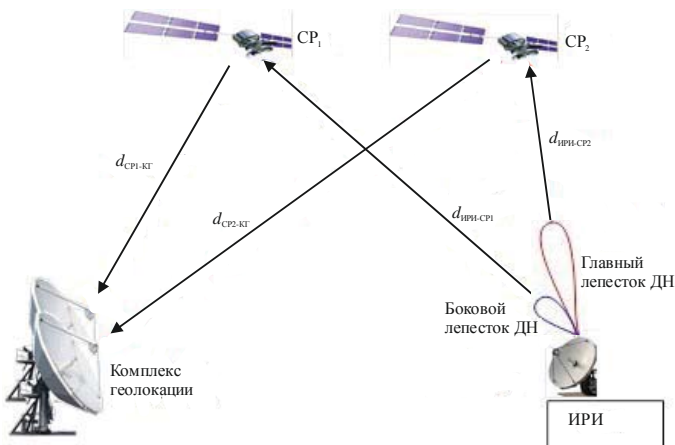


Рис. 1. Схема построения линии положения по методу TDOA

На рисунке 1 изображен ИРИ, основным лепестком диаграммы направленности излучающий сигнал в сторону СР₂. При этом боковым лепестком диаграммы направленности ИРИ излучает сигнал в сторону СР₁. Пусть $d_{ИРИ-СР1}$ – расстояние от ИРИ до СР₁, $d_{ИРИ-СР2}$ – расстояние от ИРИ до СР₂; $d_{СР1-КГ}$ – расстояние от СР₁ до комплекса геолокации (КГ), где осуществляется приём ретранслированных сигналов, $d_{СР2-КГ}$ – расстояние от СР₂ до КГ. Тогда разность времени прихода $\Delta\tau_{2-1}$ сигналов ИРИ в комплекс геолокации равна:

$$\Delta\tau_{2-1} = \frac{(d_{ИРИ-СР2} + d_{СР2-КГ}) - (d_{ИРИ-СР1} + d_{СР1-КГ})}{c},$$

где c – скорость света. Линия положения TDOA находится в результате решения последовательности оптимизационных задач, заключающихся в поиске минимума целевой функции невязки от двух аргументов (x, y) при фиксированном значении параметра z из заданного диапазона $z \in [z_{\min}, z_{\max}]$, где (x, y, z) – координаты ИРИ в декартовой системе:

$$f_{TDOA}(x, y) = \left[\begin{aligned} & (d_{ИРИ-СР2}(x, y, z) + d_{СР2-КГ}) - \\ & -(d_{ИРИ-СР1}(x, y, z) + d_{СР1-КГ}) - c \cdot \Delta\tau_{2-1} \end{aligned} \right]^2 \rightarrow \min_{x, y \in \mathbb{R}}$$

Условие нахождения ИРИ на поверхности Земли, аппроксимируемой референц-эллипсоидом, приводит к нелинейному ограничению в виде равенства:

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

где R_e – экваториальный радиус Земли, e_z – эксцентриситет земного эллипсоида.

Оценка параметров TDOA ($\Delta\tau$) и FDOA (Δf) осуществляется с помощью построения взаимной функции неопределенности (ВФН) между принятыми сигналами:

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

где $s_1(t) = u(t) \exp(j2\pi f_1 t) + n_1(t)$ и $s_2(t) = u(t - \Delta\tau) \exp[j2\pi f_2(t - \Delta\tau)] + n_2(t)$ – сигналы, принятые с основного и вспомогательного СР; f_1, f_2 – несущие частоты принятых сигналов; $u(t)$ – комплексный сигнал в основной полосе частот; $n_1(t), n_2(t)$ – аддитивные шумовые составляющие; T – время наблюдения. Из [8] следует, что оценками максимального правдоподобия параметров $\Delta\tau$ и Δf для модели сигнала, представляющего собой сумму неизвестного детерминированного сигнала и аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ), являются значения $\Delta\tau$ и Δf , максимизирующие модуль ВФН:

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

Таким образом, вычисление ВФН сигналов ИРИ, принятых с основного и вспомогательного СР, является необходимым этапом процедуры ОМП. В литературе и, соответственно, представленных выше рассуждениях сдвиг частоты между принятыми сигналами Δf , вызванный эффектом Доплера, считается константным, т.е. вектора скорости СР на интервале записи предполагаются неизменными. Однако в ряде случаев для получения достаточного отношения сигнал/шум (ОСШ) на выходе коррелятора требуется осуществлять запись сигналов на большем интервале, при этом необходимо учитывать изменение вектора скорости СР при поиске оценок параметров TDOA и FDOA методом максимизации модуля ВФН. В противном случае при увеличении длительности записи будет наблюдаться насыщение, а затем деградация ОСШ на выходе коррелятора. Целью работы является исследование длительности записи, при которой требуется учитывать фазовые искажения, вызванные изме-

нением скорости спутника-ретранслятора, и их влияние на ОСШ на выходе коррелятора, а также разработка метода учета таких искажений.

Модель сигнала

Модель сигнала, принимаемого со СР, которая будет использоваться ниже, имеет вид:

$$s(t) = pu(t - \tau) \exp [j(\varphi_{ИРИ}(t) + \varphi_{СР}(t) + \varphi_{д}(t))] + n(t),$$

где $u(t)$ – комплексный сигнал ИРИ в основной полосе частот; τ – задержка распространения сигнала ИРИ через СР до КГ; p – амплитудный множитель; $n(t)$ – АБГШ; фазы $\varphi_{ИРИ}(t)$, $\varphi_{СР}(t)$, $\varphi_{д}(t)$ с точностью до константной составляющей определяются выражениями:

$$\varphi_{ИРИ}(t) = 2\pi f_0 t,$$

$$\varphi_{СР}(t) = 2\pi \Delta f_{СР} t,$$

$$\varphi_{д}(t) = 2\pi \int (V_{СР-ИРИ}^R(t) \cdot \frac{f_0}{c} + V_{СР-КГ}^R(t) \cdot \frac{f_0 + \Delta f_{СР}}{c}) dt,$$

где $\Delta f_{СР}$ – значение переноса частоты в транспондере СР, $V_{СР-ИРИ}^R(t)$ – радиальная составляющая вектора скорости СР по отношению к ИРИ, $V_{СР-КГ}^R(t)$ – радиальная составляющая вектора скорости СР по отношению к КГ, f_0 – центральная частота излучения сигнала ИРИ. Так как ширина полосы сигнала ИРИ много меньше несущей частоты ($B_s \ll f_0$), то искажения фазы, вызванные движением СР, начинают оказывать значимое влияние на ОСШ на выходе коррелятора при меньшей длительности записи, чем искажения, вызванные изменением задержки распространения сигнала. В связи с этим в рассматриваемой модели сигнала будем считать задержку распространения (следовательно, и параметр TDOA $\Delta\tau$) на интервале записи неизменной ($\tau = \text{const}(t)$, $\Delta\tau = \text{const}(t)$).

Таким образом, параметр FDOA сигналов ИРИ, принимаемых с двух СР, будет равен:

$$\Delta f^{1-2}(t) = f_1^D(t) - f_2^D(t) =$$

$$= (V_{СР_1-ИРИ}^R(t) - V_{СР_2-ИРИ}^R(t)) \cdot \frac{f_0}{c} + (V_{СР_1-КГ}^R(t) - V_{СР_2-КГ}^R(t)) \cdot \frac{f_0 + \Delta f_{СР}}{c}.$$

Разность фаз между принятыми сигналами, вызванная рассматриваемым фактором, с точностью до постоянной составляющей равна:

$$\Delta\varphi_{д}^{1-2}(t) = 2\pi \int (f_1^D(t) - f_2^D(t)) dt.$$

Так как при вычислении ВФН предполагается, что параметр FDOA – константа от времени, т.е. разность фаз $\Delta\varphi_{д}^{1-2}(t)$ имеет линейную зависимость от времени, то при поиске оценки параметра FDOA наблюдается остаточная разность фаз, с точностью до постоянной составляющей равная:

$$\Delta\varphi_{д,ост}^{1-2}(t) = 2\pi \int (f_1^D(t) - f_2^D(t) - \Delta\hat{f}^{1-2}) dt =$$

$$= 2\pi \int (f_1^D(t) - f_2^D(t)) dt - \Delta\hat{f}^{1-2} t,$$

где $\Delta\hat{f}^{1-2}$ – оценка параметра FDOA, полученная при максимизации модуля ВФН. Как видно из представленного выражения, остаточная разность фаз меняется с течением времени, и на характер ее зависимости от времени влияют параметры движения СР. Очевидно, что при увеличении длительности записи растущий набег остаточной разности фаз будет приводить к деградации ОСШ на выходе коррелятора. Рассмотрим, при каких значениях набег остаточной разности фаз ОСШ на выходе коррелятора начинает уходить в насыщение, после чего деградировать. Также исследуем, при каких длительностях записи сигналов наблюдается критический набег остаточной разности фаз, приводящий к деградации ОСШ на выходе коррелятора.

Анализ фазовых искажений, вызванных движением геостационарных спутников-ретрансляторов

Для анализа фазовых искажений, вызванных движением СР, выберем следующие СР: Eutelsat 10A (номинальная позиция – 10° в.д.) и Eutelsat 16A (номинальная позиция – 16° в.д.), движение СР будет рассматриваться в соответствии с реальными TLE, распространяемыми через Интернет. TLE (от англ. two-line element set, двухстрочный набор элементов) – двухстрочный формат данных, представляющий собой набор элементов орбиты спутника [9]. Место расположения КГ выберем в Санкт-Петербурге (60° с.ш., 30° в.д.). Частоту излучения f_0 выберем в Ку-диапазоне ($f_0 = 14$ ГГц). Переносы частоты в транспондерах СР примем равными -2,3 ГГц ($\Delta f_1 = \Delta f_2 = -2,3$ ГГц). При указанных параметрах построим зависимость разности $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$ от времени на интервале суток для четырех различных позиций ИРИ: (15° с.ш., 17° з.д.), (25° с.ш., 51° в.д.), (56° с.ш., 4° з.д.), (59° с.ш., 40° в.д.) (рис. 2).

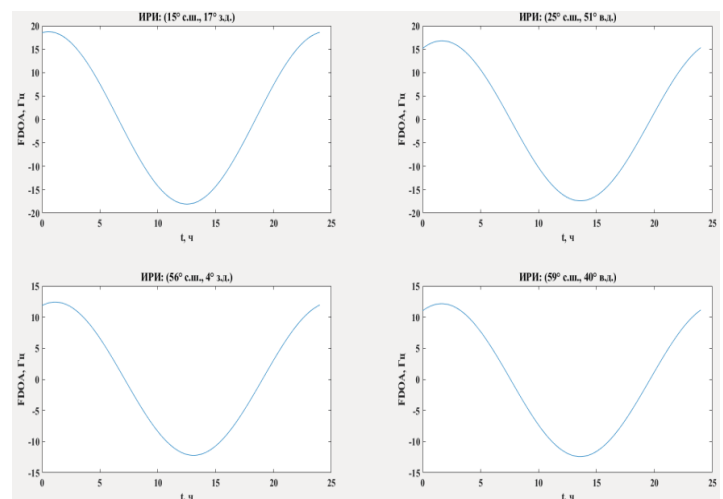


Рис. 2. График зависимости $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$ от времени

По рисунку 2 видно, что зависимость $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$ от времени имеет синусоидальный характер, при этом позиция ИРИ влияет на начальную фазу и амплитуду наблюдаемого процесса. Для дальнейших исследований выберем в качестве позиции ИРИ координаты 25° с.ш., 51° в.д.

Для определения моментов времени, когда разность $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$ имеет максимальную и минимальную (по модулю) скорость изменения, построим график зависимости производной $\frac{d(f_1^D(t) - f_2^D(t))}{dt}$ от времени (рис. 3).

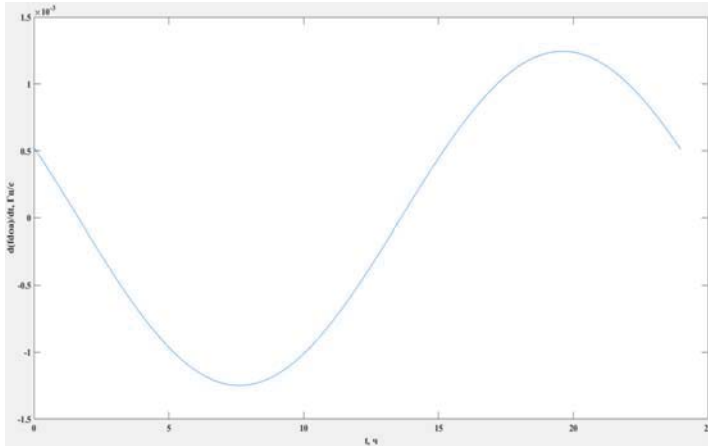


Рис. 3. График зависимости $\frac{d(f_1^D(t) - f_2^D(t))}{dt}$ от времени

При заданных значениях параметров производная $\frac{d(f_1^D(t) - f_2^D(t))}{dt}$ равна нулю в момент времени $t \approx 99$ мин и достигает максимума (по модулю) в момент времени $t \approx 457$ мин. Исходя из этого, выберем два интервала времени длительностью 6 минут каждый: первый, когда скорость изменения параметра $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$ по модулю минимальна (при рассматриваемых значениях параметров это интервал 96 - 102 мин), и второй, когда скорость изменения параметра $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$ по модулю максимальна (при рассматриваемых значениях параметров это интервал 454 - 460 мин). Графики зависимости $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$ от времени для на указанных интервалах представлены на рисунках 4 и 5.

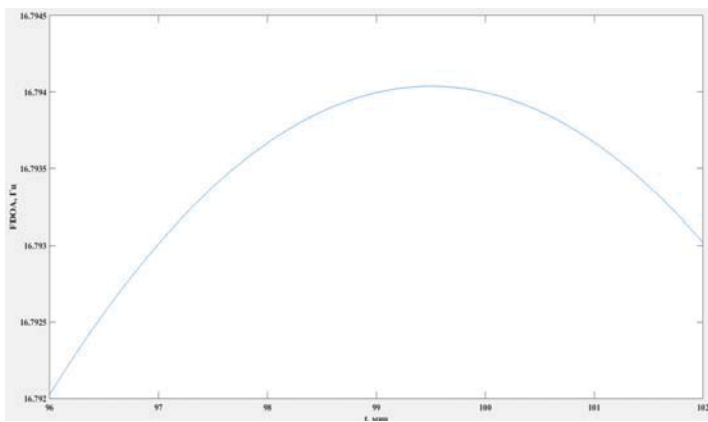


Рис. 4. График зависимости $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$ от времени при минимальной по модулю скорости изменения $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$

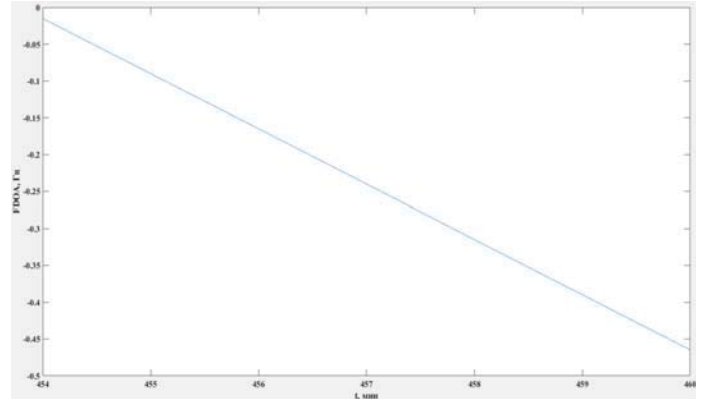


Рис. 5. График зависимости $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$ от времени при максимальной по модулю скорости изменения $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$

Исследуем, при какой длительности записи в рамках указанных интервалов и при каком набеге остаточной разности фаз $\Delta\varphi_{д,ост}^{1-2}$ будет наблюдаться насыщение и последующая деградация ОСШ на выходе коррелятора. Для этого сгенерируем сигнал $s_1(t)$, имеющий следующие характеристики: тип модуляции – QPSK с RRC-фильтрацией с коэффициентом сглаживания 0,35; символьная скорость – 50 кБод; частота дискретизации – 100 кГц; длительность записи – 6 минут. Также сгенерируем два сигнала $s_2(t)$, равных:

$$s_2(t) = s_1(t) \exp(j2\pi \int (f_1^D(t) - f_2^D(t)) dt) + n(t),$$

при этом в первом случае разность $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$, как было отмечено выше, будет взята из интервала 96 - 102 мин, во втором случае – из интервала 454 - 460 мин; ОСШ в обоих случаях зададим равным -40 дБ. Для каждого из двух рассматриваемых случаев будем осуществлять максимизацию модуля ВФН сигналов $s_1(t)$ и $s_2(t)$, пошагово увеличивая длительность коррелируемых сигналов, начиная с 10 секунд. Шаг частотного перебора при максимизации модуля ВФН будем вычислять в соответствии с выражением: $\Delta f_{ш} = \frac{1}{20T}$,

где T – длительность коррелируемых сигналов, что приведет к максимальному набегу фаз, вызванному исключительно ошибкой шага перебора, равному $\Delta\varphi_{ш} = 9^\circ$. При каждом значении длительности коррелируемых сигналов T будем вычислять два параметра: ОСШ на выходе коррелятора $\gamma_{вых}$, которое в соответствии с определением рассчитывается как отношение пиковой мощности сигнала на выходе коррелятора к средней мощности шума на выходе коррелятора, и набег остаточной разности фаз $\Delta\varphi_{д,ост,набег}^{1-2}$, который рассчитывается по формуле:

$$\Delta\varphi_{д,ост,набег}^{1-2} = \max(\Delta\varphi_{д,ост}^{1-2}(t)) - \min(\Delta\varphi_{д,ост}^{1-2}(t)), \quad t \in [0, T].$$

При наличии АБГШ и отсутствии прочих искажений $\gamma_{вых}$, выраженное в раз, вычисляется по формуле [10]:

$$\gamma_{вых} = BT\gamma_{эф},$$

где B и T – шумовая полоса и длительность сигналов соответственно, $\gamma_{эф}$ – эффективное значение ОСШ (ЭОСШ) сигналов на входе коррелятора, равное:

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

следовательно, $\gamma_{\text{вых}}$, выраженное в дБ, зависит линейно от $T_{\text{дБс}}$, где $T_{\text{дБс}}$ определяется в соответствии с выражением:

$$T_{\text{дБс}} = 10 \log_{10}(T),$$

причем производная $\frac{d\gamma_{\text{вых}}(T_{\text{дБс}})}{dT_{\text{дБс}}}$ равна единице. Поэтому

при построении графиков зависимости $\gamma_{\text{вых}}$ от времени для наглядности по оси абсцисс будем откладывать значения $T_{\text{дБс}}$, чтобы увидеть, в какой момент времени зависимость начнет отклоняться от линейной.

На рисунках 6 и 7 представлены график зависимости $\gamma_{\text{вых}}$ от $T_{\text{дБс}}$ и график зависимости $\Delta\varphi_{\text{д,ост,набег}}^{1-2}$ от T для интервала времени, соответствующего минимальной по модулю скорости изменения $(f_1^{\text{Д}}(t) - f_2^{\text{Д}}(t))$ (при рассматриваемых параметрах это интервал времени 96-102 мин).

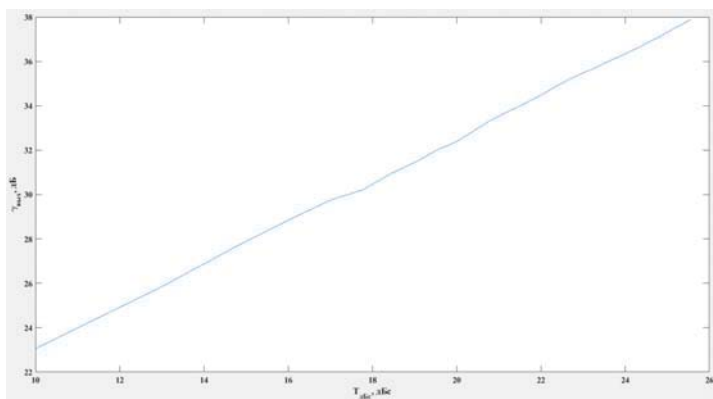


Рис. 6. График зависимости $\gamma_{\text{вых}}$ от $T_{\text{дБс}}$ при минимальной по модулю скорости изменения $(f_1^{\text{Д}}(t) - f_2^{\text{Д}}(t))$

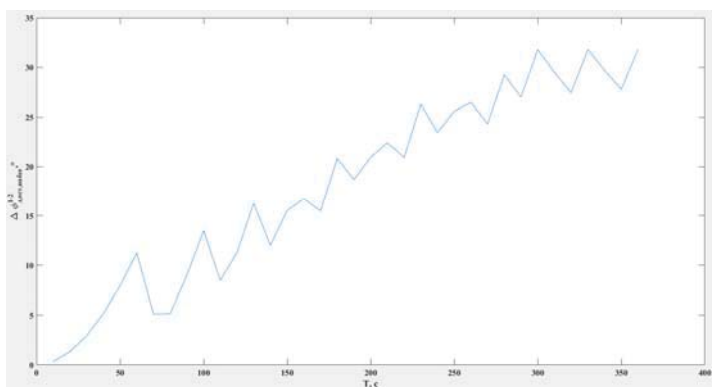


Рис. 7. График зависимости $\Delta\varphi_{\text{д,ост,набег}}^{1-2}$ (в градусах) от T при минимальной по модулю скорости изменения $(f_1^{\text{Д}}(t) - f_2^{\text{Д}}(t))$

По рисункам 6-7 видно, что при минимальной по модулю скорости изменения $(f_1^{\text{Д}}(t) - f_2^{\text{Д}}(t))$ на рассматриваемом интервале времени набег остаточной разности фаз не превышает 33° , а зависимость $\gamma_{\text{вых}}$ от $T_{\text{дБс}}$ имеет линейный характер на всем рассматриваемом интервале. Из этого следует, что в моменты суток, когда скорость изменения

$(f_1^{\text{Д}}(t) - f_2^{\text{Д}}(t))$ по модулю минимальна, разность $(f_1^{\text{Д}}(t) - f_2^{\text{Д}}(t))$ можно считать константной на интервале длительностью не менее 6 минут, при этом при увеличении длительности коррелируемых сигналов в пределах как минимум 6 минут деградации ОСШ на выходе коррелятора наблюдаться не будет. На рисунках 8 и 9 представлены график зависимости $\gamma_{\text{вых}}$ от $T_{\text{дБс}}$ и график зависимости $\Delta\varphi_{\text{д,ост,набег}}^{1-2}$ от T для интервала времени, соответствующего максимальной по модулю скорости изменения $(f_1^{\text{Д}}(t) - f_2^{\text{Д}}(t))$ (при рассматриваемых параметрах это интервал времени 454 - 460 мин).

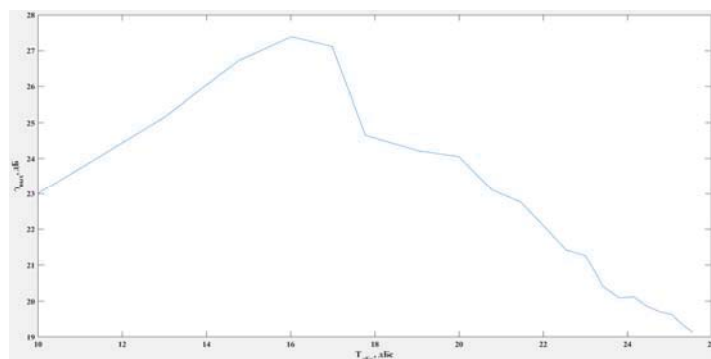


Рис. 8. График зависимости $\gamma_{\text{вых}}$ от $T_{\text{дБс}}$ при максимальной по модулю скорости изменения $(f_1^{\text{Д}}(t) - f_2^{\text{Д}}(t))$

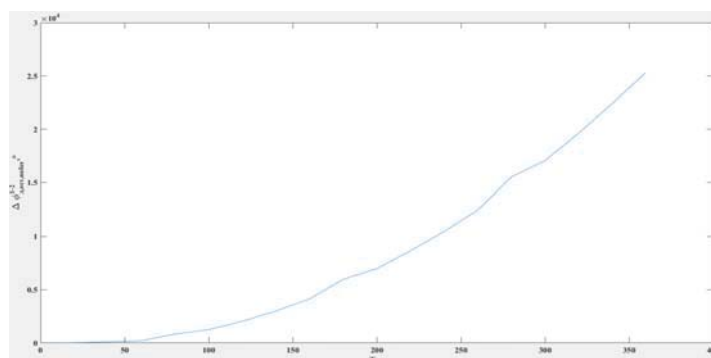


Рис. 9. График зависимости $\Delta\varphi_{\text{д,ост,набег}}^{1-2}$ (в градусах) от T при максимальной по модулю скорости изменения $(f_1^{\text{Д}}(t) - f_2^{\text{Д}}(t))$

По рисунку 8 видно, что при максимальной по модулю скорости изменения $(f_1^{\text{Д}}(t) - f_2^{\text{Д}}(t))$ зависимость $\gamma_{\text{вых}}$ от $T_{\text{дБс}}$ имеет близкий к линейному характер при $T \leq 40$ с, а при $T > 40$ с $\gamma_{\text{вых}}$ деградирует. Из графика на рисунке 9 следует, что набег остаточной разности фаз $\Delta\varphi_{\text{д,ост,набег}}^{1-2}$, соответствующий интервалу $T = 40$ с, равен 100° . Так как при максимальной по модулю скорости изменения $(f_1^{\text{Д}}(t) - f_2^{\text{Д}}(t))$ деградация $\gamma_{\text{вых}}$ начинается происходить при $\Delta\varphi_{\text{д,ост,набег}}^{1-2} = 100^\circ$, то при меньшей по модулю скорости изменения $(f_1^{\text{Д}}(t) - f_2^{\text{Д}}(t))$ деградация $\gamma_{\text{вых}}$ будет наблюдаться при аналогичных либо больших значениях $\Delta\varphi_{\text{д,ост,набег}}^{1-2}$.

Таким образом, при $\Delta\varphi_{д,ост,набег}^{1-2} < 100^\circ$ в любое время суток деградация $\gamma_{вых}$ гарантированно отсутствует, т.е. разность $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$ можно считать постоянной. Назовем интервал, на котором $\Delta\varphi_{д,ост,набег}^{1-2} < 100^\circ$, *интервалом стационарности FDOA* ($\tau_{стак}$) и построим график зависимости $\tau_{стак}$ от времени суток. При вычислении $\Delta\varphi_{д,ост,набег}^{1-2}$ в качестве \hat{f}^{1-2} будем использовать среднее значение разности $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$ на интервале рассмотрения (так как в пределах интервала стационарности FDOA разность $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$, как было отмечено выше, можно считать приближенно постоянной):

$$\hat{f}^{1-2} = \frac{\min((f_1^D(t) - f_2^D(t))) + \max((f_1^D(t) - f_2^D(t)))}{2}, t \in [0, T].$$

На рисунке 10 представлен график зависимости $\tau_{стак}$ от времени суток.

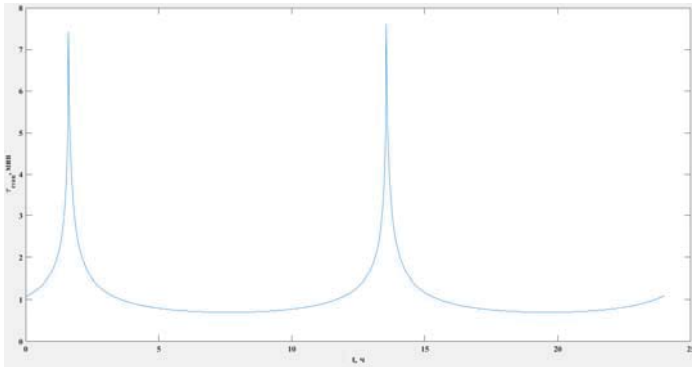


Рис. 10. График зависимости $\tau_{стак}$ от t на интервале суток

По рисунку 10 видно, что интервал стационарности FDOA на протяжении суток меняется в диапазоне 40...457 секунд, при этом значительную часть времени лежит в диапазоне 40...60 секунд.

Модифицированная взаимная функция неопределенности

На практике встречаются ситуации, когда длительности записи в 40-60 секунд недостаточно для получения требуемого энергетического выигрыша вычисления корреляции (ЭВК). В таких случаях, как показано выше, не представляется возможным считать параметр FDOA константным. Предложенный метод заключается в аппроксимации зависимости разности $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$ от времени линейной зависимостью:

$$f_1^D(t) - f_2^D(t) \approx f_0^{д,1-2} + (k_{f,д,1-2})t, t \in [0, T],$$

где $k_{f,д,1-2}$ – скорость изменения разности $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$ (другими словами, производная $\frac{d(f_1^D(t) - f_2^D(t))}{dt}$), Гц/с.

Тогда процедура вычисления оценки параметра TDOA ($\Delta\hat{\tau}$),

оценки $\hat{f}_0^{д,1-2}$ и оценки $\hat{k}_{f,д,1-2}$ сводится к максимизации функции, которую назовем *модифицированной ВФН* (A_M):

$$\Delta\hat{\tau}, \hat{f}_0^{д,1-2}, \hat{k}_{f,д,1-2} = \arg \max_{\Delta\tau, f_0^{д,1-2}, k_{f,д,1-2}} |A_M(\Delta\tau, f_0^{д,1-2}, k_{f,д,1-2})|,$$

где A_M определяется выражением:

$$A_M(\Delta\tau, f_0^{д,1-2}, k_{f,д,1-2}) = \int_0^T s_1(t) s_2^*(t + \Delta\tau) \exp(-j2\pi(f_0^{д,1-2} + \frac{k_{f,д,1-2}}{2}t)t) dt.$$

При этом остаточная разность фаз $\Delta\varphi_{д,ост}^{1-2}(t)$ будет равна:

$$\Delta\varphi_{д,ост}^{1-2}(t) = 2\pi(\int (f_1^D(t) - f_2^D(t))dt - (\hat{f}_0^{д,1-2} + \frac{\hat{k}_{f,д,1-2}}{2}t)t).$$

По рисунку 3 видно, что $k_{f,д,1-2}$ при заданных параметрах на интервале суток изменяется в пределах $-1,3 \cdot 10^{-3} \dots 1,3 \cdot 10^{-3}$ Гц/с. На рисунках 11 и 12 представлены график зависимости $\gamma_{вых}$ от $T_{дбс}$ и график зависимости $\Delta\varphi_{д,ост,набег}^{1-2}$ от T для интервала времени, соответствующего максимальной по модулю скорости изменения $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$ (при рассматриваемых параметрах это интервал времени 454 - 460 мин), при использовании предложенной линейной аппроксимации разности $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$ и, следовательно, максимизации модифицированной ВФН.

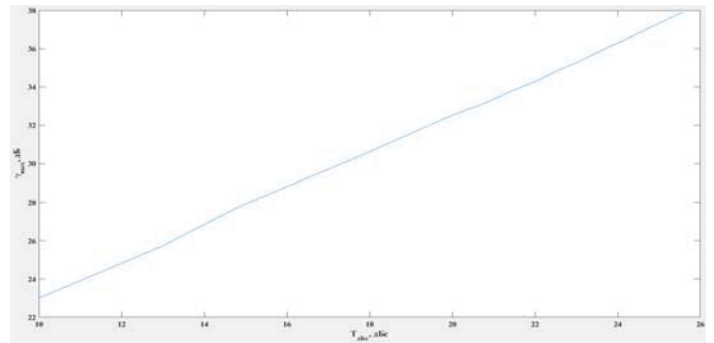


Рис. 11. График зависимости $\gamma_{вых}$ от $T_{дбс}$ при максимальной по модулю скорости изменения $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$ и максимизации модифицированной ВФН

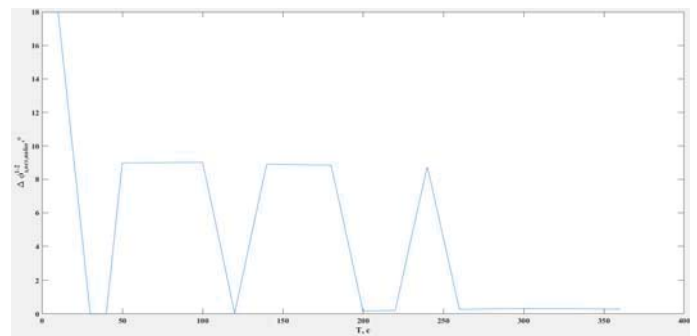


Рис. 12. График зависимости $\Delta\varphi_{д,ост,набег}^{1-2}$ (в градусах) от T при максимальной по модулю скорости изменения $(f_1^D(t) - f_2^D(t))$ и максимизации модифицированной ВФН

По рисунку 11 видно, что зависимость $\gamma_{\text{вых}}$ от $T_{\text{дбс}}$ имеет линейный характер, т.е. применение линейной аппроксимации разности $(f_1^{\text{д}}(t) - f_2^{\text{д}}(t))$ и максимизации модифицированной ВФН позволило устранить деградацию $\gamma_{\text{вых}}$ в рамках рассматриваемого интервала времени. По рисунку 12 видно, что набег остаточной разности фаз $\Delta\varphi_{\text{д,ост,набег}}^{1-2}$ при этом не превышает 18° и вызван главным образом ошибкой шага перебора параметров $f_0^{\text{д},1-2}$ и $k_{f,1-2}$.

Назовем интервал, на котором при использовании предложенной линейной аппроксимации $\Delta\varphi_{\text{д,ост,набег}}^{1-2} < 100^\circ$, интервалом стационарности производной $\frac{d(f_1^{\text{д}}(t) - f_2^{\text{д}}(t))}{dt}$ (обозначим его $\tau_{\text{стац}}^{\text{лин}}$) и построим график зависимости $\tau_{\text{стац}}^{\text{лин}}$ от времени суток. При вычислении $\Delta\varphi_{\text{д,ост,набег}}^{1-2}$ в качестве $\hat{f}_0^{\text{д},1-2}$ будем использовать начальное значение разности $(f_1^{\text{д}}(t) - f_2^{\text{д}}(t))$ на интервале рассмотрения T , а $\hat{k}_{f,1-2}$ вычислять как разность между конечным и начальным значениями разности $(f_1^{\text{д}}(t) - f_2^{\text{д}}(t))$, деленную на длительность интервала T . На рисунке 13 представлен график зависимости $\tau_{\text{стац}}^{\text{лин}}$ от времени суток.

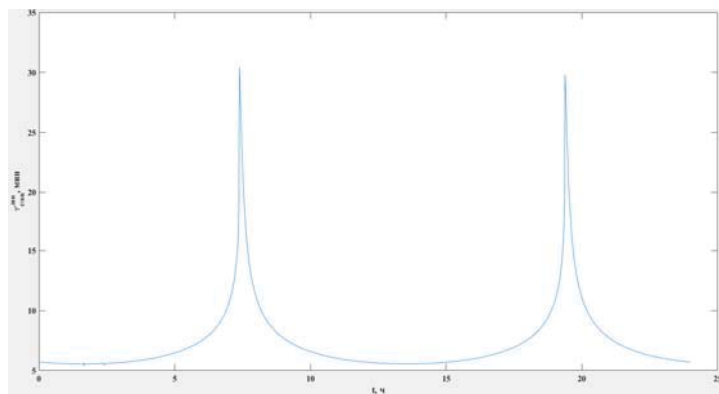


Рис. 13. График зависимости $\tau_{\text{стац}}^{\text{лин}}$ от t на интервале суток

По рисунку 13 видно, что $\tau_{\text{стац}}^{\text{лин}}$ на протяжении суток меняется в диапазоне 5,4...30,5 минут, при этом значительную часть времени лежит в диапазоне 5,4...10 минут.

Выводы

Имитационное моделирование показало, что применение ВФН, предполагающей неизменный на интервале записи параметр FDOA (следовательно, неизменные вектора скорости CP), в случае типичных параметров орбиты геостационарных CP не приводит к насыщению и дальнейшей деградации ОСШ на выходе коррелятора с увеличением количества коррелируемых отсчетов при максимальной длительно-

сти записи сигналов от порядка 40 секунд (для наихудшего случая максимальной по модулю производной FDOA) до порядка 7,5 минут (для наилучшего случая минимальной по модулю производной FDOA).

Применение предложенной в данной работе модифицированной ВФН, предполагающей перебор не только начального значения параметра FDOA, но и по производной параметра FDOA, позволяет избежать насыщения и деградации ОСШ на выходе коррелятора с увеличением количества коррелируемых отсчетов при максимальной длительности записи сигналов от порядка 5,4 минут (для наихудшего случая максимальной по модулю производной FDOA) до порядка 30,5 минут (для наилучшего случая минимальной по модулю производной FDOA). Следовательно, при использовании предложенной линейной аппроксимации и модифицированной ВФН минимальная длительность записи сигналов, при которой гарантированно не будет наблюдаться деградация ОСШ на выходе коррелятора, в $5,4 \cdot 60 / 40 = 8,1$ раз больше, чем при использовании традиционной ВФН.

Литература

1. Ho K.C., Chan Y.T. Geolocation of a known altitude object from TDOA and FDOA measurements // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 33, no. 3, pp. 770-783, 1997, doi: 10.1109/7.599239.
2. Musicki D., Koch W. Geolocation using TDOA and FDOA Measurements // 11th International Conference on Information Fusion, Cologne, Germany, June 30 2008-July, 2008.
3. Bin Y.Z., Lei W., Qun C.P., Nan L.A. Passive satellite localization using TDOA/FDOA/AOA measurements // Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Integrated Systems (ICISS); Guilin, China. 1-8 January 2013; pp. 1-5, doi: 10.1109/ANTHOLOGY.2013.6784815.
4. Волков P.B., Саятин B.H., Севидов B.B., Севидова Л.М. Алгоритм определения координат земных станций по сигналам спутников-ретрансляторов // Теория и практика современной науки. 2016. № 10(16). С. 69-72.
5. Гринь И.В., Ершов P.A., Морозов O.A., Фидельман B.P. Оценка координат источника радиоизлучения на основе решения линеаризованной системы уравнений разностно-дальномерного метода // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2014. № 4(32). С. 71-81.
6. Yan, H, Cao, JK, Chen, L. Study on location accuracy of dual-satellite geolocation system // Proceedings of the 10th international conference on IEEE ICSP, Beijing, China, 24-28 October 2010, pp. 107-110, doi: 10.1109/ICOSP.2010.5656806.
7. Liu, C., Yang, L. and Mihaylova, L.S. Dual-Satellite Source Geolocation with Time and Frequency Offsets and Satellite Location Errors // 2017 20th International Conference on Information Fusion (Fusion), 10-13 July 2017, Xi'an, China, doi 10.23919/ICIF.2017.8009716.
8. Stein S. Differential delay/Doppler ML estimation with unknown signals // IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 41, no. 8, pp. 2717-2719, Aug. 1993, doi: 10.1109/78.229901.
9. Hoofs 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.
10. Stein S. Algorithms for ambiguity function processing // IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. 29, pp. 588-599, June. 1981, doi: 10.1109/TASSP.1981.1163621.

CONSIDERATION OF PHASE DISTORTIONS CAUSED BY THE MOVEMENT OF GEOSTATIONARY REPEATERS WHEN LOCATING GROUND-BASED RADIO EMISSION SOURCES

Roman D. Gall, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg,
Russia roman942010@mail.ru

Abstract

Currently, there are often cases of illegal use of the resource of relay satellites located in geostationary orbit, and the creation of unintentional and deliberate interference with legal users of satellite communication systems, for example due to non-compliance with the power standards of radio transmitting devices and antenna radiation patterns, as well as the rules for the frequency spectrum regulating. One of the possible stages of the response by the radio frequency service and satellite systems operators to such situations may be an operational assessment of locating of the interference ground radio emission sources that violate the established requirements. The existing methods for estimating the coordinates of radio emission sources operating through geostationary satellites-repeaters involve calculating the Cross-Ambiguity Function (CAF) of signals received from several satellites that relay the signals of the main and side lobes of the antenna pattern of the geolocated source. In the case of a low received signals SNR, it is required to record signals for a long time, and in such cases, to achieve a sufficient SNR at the correlator output, it is necessary to take into account not only the Doppler frequency shift between the signals, but also the change in the frequency shift caused by the change in the velocity vectors of the repeater satellites. The aim of this work is to study the recording duration, at which it is required to take into account phase distortions caused by a change in the speed of the repeater satellite and their effect on the SNR at the correlator output, as well as to develop a method for accounting for such distortions. The theory of digital signal processing and the method of simulation were used as research methods. As a result of the study, an assessment was made of the duration of the signal recording, at which the Doppler frequency shift can be considered constant; introduced the concept of a modified CAF, which takes into account the change in the Doppler frequency shift due to its approximation by a linear function; the maximum duration of signal recording was estimated, at which the proposed linear approximation is valid. It is concluded that in the case of using the modified CAF, the minimum duration of signal recording, at which the absence of correlator output SNR degradation will be guaranteed, is 8.1 times greater than when using the traditional CAF.

Keywords: geolocation, positioning, geostationary satellite, ambiguity function, phase distortion.

References

1. K. C. Ho and Y. T. Chan, "Geolocation of a known altitude object from TDOA and FDOA measurements," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 33, no. 3, pp. 770-783, 1997, doi: 10.1109/7.599239.
2. D. Musicki and W. Koch, "Geolocation using TDOA and FDOA Measurements", *11th International Conference on Information Fusion*, Cologne, Germany, June 30 2008-July, 2008.
3. Bin Y.Z., Lei W., Qun C.P., Nan L.A., "Passive satellite localization using TDOA/FDOA/AOA measurements", *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Integrated Systems (ICISS)*; Guilin, China. 1-8 January 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. *Teoriya i praktika sovremennoi nauki* [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. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki* [Journal of the Universities. Volga region. Technical science]. 2014, no. 4(32), pp. 71-81. (In Russ.)
6. Yan, H, Cao, JK, Chen, L., "Study on location accuracy of dual-satellite geolocation system", *Proceedings of the 10th international conference on IEEE ICSP*, Beijing, China, 24-28 October 2010, pp.107-110, doi: 10.1109/ICOSP.2010.5656806.
7. Liu, C., Yang, L. and Mihaylova, L.S., "Dual-Satellite Source Geolocation with Time and Frequency Offsets and Satellite Location Errors", *2017 20th International Conference on Information Fusion (Fusion)*, 10 - 13 July 2017, Xi'an, China, doi: 10.23919/ICIF.2017.8009716.
8. S. Stein, "Differential delay/Doppler ML estimation with unknown signals," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 41, no. 8, pp. 2717-2719, Aug. 1993, doi: 10.1109/78.229901.
9. 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.
10. S. Stein, "Algorithms for ambiguity function processing," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. 29, pp. 588-599, June. 1981, doi: 10.1109/TASSP.1981.1163621.

Information about author:

Roman D. Gall, Post-graduate student of the Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (direction "Electronics, radio engineering and communication systems"), Department of Radioelectronic Means, Saint Petersburg, Russia