Пассивные методы определения координат спутников на геостационарной орбите

В. А. Варгаузин[1], П. А. Кистанов[2], Е. А. Щербинина[3]
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
[1]var@mail.spbstu.ru, [2]pakistanov@gmail.com, [3]lizspbstyle@gmail.com

***Аннотация*. Контроль за использованием частотного ресурса геостационарных спутников-ретрансляторов является важной составляющей работы систем спутниковой связи. Системы спутниковой геолокации позволяют определять местоположение земных станций, нелегитимно использующих частотный ресурс геостационарных спутников-ретрансляторов. Для эффективной работы системы спутниковой геолокации требуется знание координат спутников с высокой точностью. В работе рассматриваются пассивные методы определения координат спутника-ретранслятора путем приема и обработки сигналов от спутника-ретранслятора системой из разнесенных наземных станций. Проведено моделирование двух разностно-дальномерных методов с использованием численного алгоритма Нелдера–Мида для поиска минимума функционала и определения оценок координат. Результаты моделирования показали более высокую точность разностно-дальномерного метода, использующего все базы, образованные спутником-ретранслятором и земными станциями.**

Ключевые слова: геостационарный спутник, пассивные методы определения координат, разностно-дальномерный метод, Нелдер-Мид

I. Введение

Одной из причин снижения эффективности современных спутниковых систем связи (ССС) является несанкционированное использование их спутников-ретрансляторов (СР) посторонними земными станциями [1–4]. Системы спутниковой геолокации (СГЛ) позволяют определять местоположение таких земных станций, нелегитимно использующих частотный ресурс транспондеров геостационарных СР ССС [1–4]. Для эффективной работы системы СГЛ требуется знание координат СР с высокой точностью. Определение координат СР по известным эфемеридам [5] приводит к ошибкам в десятки километров. В свою очередь наличие таких ошибок в определении координат спутников приводит к аномальным ошибкам в работе системы СГЛ.

Для повышения точности в определении координат СР могут применяться активные системы из разнесенных наземных станций для приема и обработки сигналов. Активные системы используют дальномерные методы для определения координат и состоят не менее чем из трех базовых станций, легитимно излучающих сигнал на СР [6]. Очевидно, что для определения координат СР могут использоваться также инструменты пассивной радиолокации (не требующие излучения сигнала на СР), когда разнесенные земные станции принимают сигнал нелегитимного источника радиоизлучения (ИРИ), ретранслируемого СР. В пассивной системе может применяться широко используемый в наземных системах радиомониторинга двухэтапный разностно-дальномерный метод (РДМ), в котором на первом этапе измеряют разности времен распространения сигналов, а на втором этапе получают оценку местоположения желаемого объекта, излучающего радиосигнал. Можно выделить РДМ [7], основанный на использовании статистически независимых результатов измерений разностей времен распространения на «основных» базах из всех (РДМ №1), образованных парами СР и *i*-ая земная станция (ЗСi). В то же время остается открытым вопрос о целесообразности использовании всех баз (РДМ №2). Представляет интерес исследование применения разностно-дальномерного метода для определения координат СР и сравнение точности получаемых оценок двумя разностно-дальномерными методами.

II. Пассивные методы определения координат СР

Комплексную огибающую реализации анализируемого процесса на входе приемной антенны ЗСi (i = 1, 2, 3, 4) системы определения координат СР (рис.1) запишем в виде:

$$X_i(t) = \delta A_i \cdot S(t - \delta t_i) + N_i(t)$$

где $S(t)$ – комплексная огибающая сигнала нелегитимного ИРИ, δA_i и δt_i – соответственно суммарные затухание и время распространения в канале от ИРИ до СР и от СР до ЗСi.

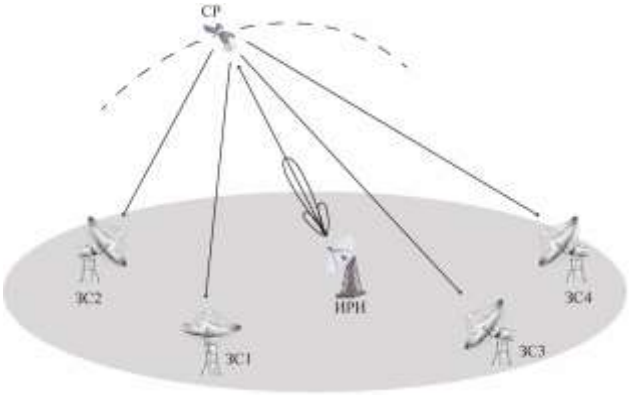


Рис. 1. Пассивная система определения координат СР

Аддитивная помеха $n_i(t)$ с комплексной огибающей $N_i(t)$ представляет собой нормально распределённый случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и спектральной плотностью средней мощности $\frac{N_{0i}}{2}$, характеризующий суммарное влияние статистически независимых аддитивных шумов при приёме сигнала ИРИ на СР и на $ЗС_i$. При этом шумы на антеннах ЗС полагаем статистически независимыми.

Информация о значении вектора координат СР $\mathbf{p}_{CP} = [x_{CP}, y_{CP}, z_{CP}]^T$ содержится в значениях $\delta t_i = \frac{\|\mathbf{p}_{ИРИ} - \mathbf{p}_{CP}\| + \|\mathbf{p}_{ЗС_i} - \mathbf{p}_{CP}\|}{c}$. При этом $\mathbf{p}_{ЗС_i} = [x_{ЗС_i}, y_{ЗС_i}, z_{ЗС_i}]^T$, $\mathbf{p}_{ИРИ} = [x_{ИРИ}, y_{ИРИ}, z_{ИРИ}]^T$ – векторы координат ЗСi и ИРИ, c – скорость света в вакууме. Далее будем считать координаты ЗСi точно известными.

На первом этапе осуществляется оценка значений разностей времен распространения $\delta t_{jk} = \delta t_j - \delta t_k$. Для РДМ №2 рассчитываются все шесть разностей: $j = 1,2,3,4,\ k = 1,2,3,4,\ i \neq j$, для РДМ №1 три разности относительно одной опорной ЗС1 ($j = 1, k = 2,3,4$). На втором этапе на основе полученных оценок $\hat{\delta t}_{jk}$ определяет оценку вектора $\mathbf{p}_{CP}$.

Оценки $\hat{\delta t}_{jk}$ определяются на основе поиска максимальных значений огибающих $L(\delta t_{jk})$ взаимнокорреляционных функций комплексных огибающих анализируемых процессов соответственно $X_j(t), X_k(t)$: $\hat{\delta t}_{jk} = \arg\max\{L(\delta t_{jk})\}$, где $L(\delta t_{jk}) = \left|\int_0^{T_a} X_j(t) X_k^*(t - \delta t_{jk}) dt\right|$ и T_a – интервал анализа. При этом этап обнаружения сигнала считается предварительно завершенным.

При использовании РДМ №1 определение оценки $\hat{\mathbf{p}}_{CP}$ вектора $\mathbf{p}_{CP}$ сводится к решению системы из трех уравнений, а для РДМ №2 из шести уравнений. Систему уравнений для РДМ №1 можно записать в виде:

$$\begin{cases} \|\mathbf{p}_{CP} - \mathbf{p}_{ЗС_1}\| - \|\mathbf{p}_{CP} - \mathbf{p}_{ЗС_2}\| - \hat{\delta t}_{12} \cdot c = \varepsilon_{12}, \\ \|\mathbf{p}_{CP} - \mathbf{p}_{ЗС_1}\| - \|\mathbf{p}_{CP} - \mathbf{p}_{ЗС_3}\| - \hat{\delta t}_{13} \cdot c = \varepsilon_{13}, \\ \|\mathbf{p}_{CP} - \mathbf{p}_{ЗС_1}\| - \|\mathbf{p}_{CP} - \mathbf{p}_{ЗС_4}\| - \hat{\delta t}_{14} \cdot c = \varepsilon_{14}. \end{cases}$$

где $\varepsilon_{12}, \varepsilon_{13}, \varepsilon_{14}$ – ошибки, обусловленные отличием $\hat{\delta t}_{1k}$ от δt_{1k}. Аналогично можно записать систему уравнения для РДМ №2. Задача решения такой системы представляет собой нелинейную задачу [1]. При абсолютно точных оценках задержек δt_{1k}, очевидно $\varepsilon_{12}, \varepsilon_{13}, \varepsilon_{14}$ оказываются равными нулю. В реальной ситуации величину $(\varepsilon_{12})^2 + (\varepsilon_{13})^2 + (\varepsilon_{14})^2$ можно рассматривать как невязку измерений $\hat{\delta t}_{1k}$ вектору $\mathbf{p}_{CP}$. Поэтому задача может быть решена методом наименьших квадратов.

Оценками $\hat{\mathbf{p}}_{CP} = [\hat{x}_{CP}, \hat{y}_{CP}, \hat{z}_{CP}]^T$ вектора координат $\mathbf{p}_{CP} = [x_{CP}, y_{CP}, z_{CP}]^T$ являются значения, минимизирующие квадратичный функционал

$f(x_{CP}, y_{CP}, z_{CP}) = (\varepsilon_{12})^2 + (\varepsilon_{13})^2 + (\varepsilon_{14})^2$ для РДМ №1,

$f(x_{CP}, y_{CP}, z_{CP}) = (\varepsilon_{12})^2 + (\varepsilon_{13})^2 + (\varepsilon_{14})^2 + (\varepsilon_{23})^2 + (\varepsilon_{24})^2 + (\varepsilon_{34})^2$

для РДМ №2 Поиск минимума функционала осуществляется различными численными методами, например, алгоритмами Нелдера–Мида [8,9] и Ньютона [10]. Достоинством первого является отсутствие необходимости вычисления производных и градиентов, что выгодно его отличает, от алгоритма Ньютона, который часто используется для решения задачи определения местоположения как при моделировании, так и в реальной аппаратуре. В качестве начальных условий для алгоритма могут использоваться координаты СР, полученные на основе эфемерид из открытой базы данных [11].

III. Моделирование

Оценка точности рассмотренных выше методов проводилась на основе статистического моделирования в среде Матлаб. Блок схема модели показана на рис. 2.

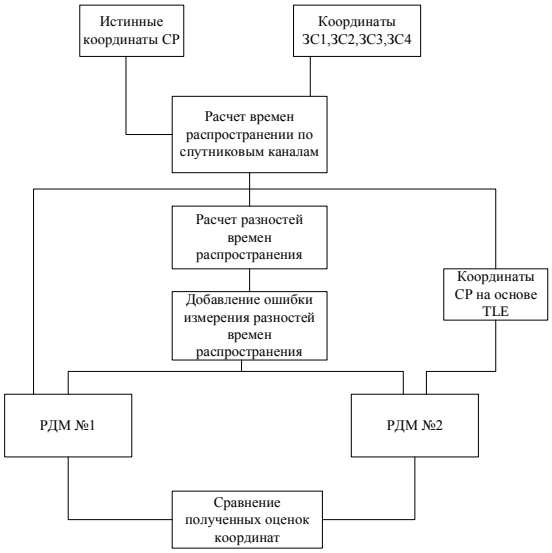
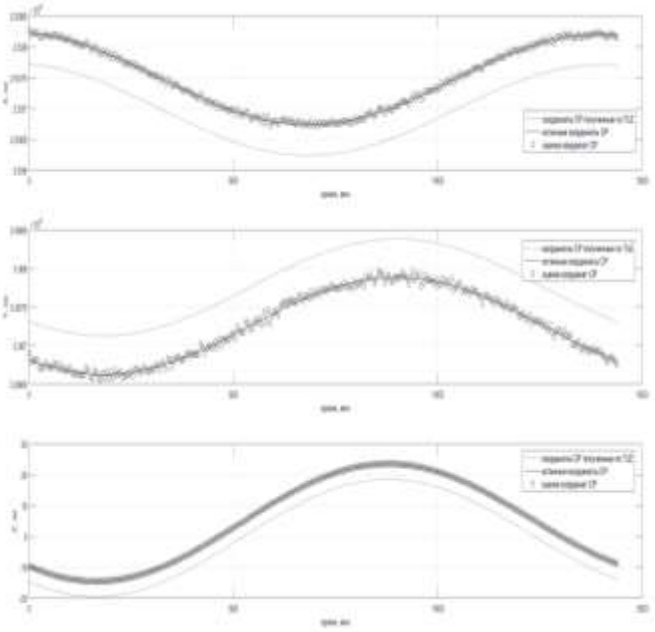


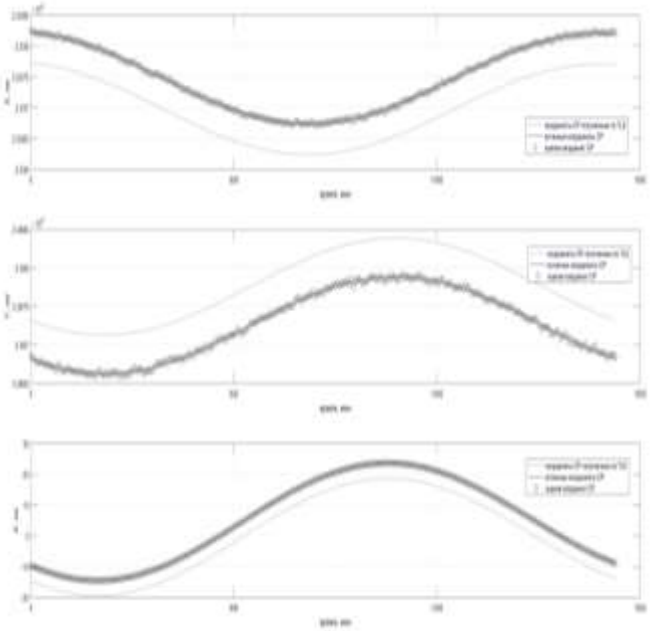
Рис. 2. Блок-схема модели

В качестве исходных данных задаются истинные координаты СР, таких как Ямал, Экспресс АМ6, Экспресс АМ7, и точно-известные координаты земных станций (разнесенных по территории Российской Федерации), по которым рассчитываются значения времен распространения от СР до земных станций. В работе осуществляется моделирование второго этапа РДМ, поэтому вводится значение ошибки измерения времени распространения, которое задается значением нормально распределенной случайной величины δ с математическим ожиданием $E\{\delta\}=0$ и изменяемом значении дисперсии $D\{\delta\}$. Координаты СР определяются путем минимизации квадратичного функционала численным алгоритмом Нелдера–Мида. Квадратичный функционал описывается при помощи симплекса (треугольника в n-мерном пространстве). Алгоритм Нелдера–Мида выполняется до тех пор, пока не достигнет предельных параметров, задаваемых пользователем. Оптимальным считается симплекс, в котором расстояния между вершинами не превышают заданную величину a, и, при этом различие между минимальным значением функционала в одной из вершин симплекса между значениями функционала в остальных вершинах симплекса не превышала величину b. Параметрами алгоритма также являются максимальное число итераций для поиска минимума и максимальное число вычислений значения функционала для поиска минимума. Начальными условиями для поиска оптимального симплекса являются координаты СР, вычисленные по эфемеридам, доступным в формате TLE (two-line element set) в каталоге военной организацией NORAD [11].

В качестве примера на рис 3 приведены результаты определения координат СР, Экспресс АМ6 за период времени сутки для двух разностно-дальномерных методов при $D\{\delta\}=1\cdot10^{-22}$ с^2.



№1(а)



№2 (б)

Рис. 3. Результаты определения координат СР, Экспресс АМ6 РДМ №1(а) и РДМ №2 (б)

Из рис. 3 видно, что для РДМ №2 отклонение от истинных координат меньше, чем для РДМ №1. Было проведено моделирование статистического эксперимента и получены оценки среднеквадратического отклонения координат в каждый момент времени для РДМ №1 и РДМ №2. Так, например, для n-го момент времени такие оценки равны 98 метра и 59 метров соответственно для РДМ №1 и РДМ №2.

Для точности определения системой СГЛ координат нелегитимной земной станции в единицы километров требуется точность координат СР не менее 100 метров [5]. Таким образом, полученные значения ошибок в определении координат СР для обоих методов являются допустимыми для корректной работы системы СГЛ.

IV. Заключение

В работе рассмотрена возможность применения пассивной системы определения координат СР разностно-дальномерными методами для эффективной работы системы СГЛ. Ошибка в определении координат для РДМ, использующего все базы, образованные СР и земными станциями, меньше на 40 % ошибки для РДМ, использующего только «основные» базы.

Для решения задачи определения координат СР показана возможность применения алгоритма Нелдера–Мида. В качестве параметров алгоритма рекомендуется использовать следующие значения: расстояние между вершинами симплекса 10^{-4}, различие между минимальным значением функционала в одной из вершин симплекса 10^{-3}, максимальное число итераций для поиска минимума *600*, максимальное число вычислений значения функционала для поиска минимума *600*.

Список литературы

[1] Chan M.H.: Application of a dual satellite geolocation system on locating sweeping interference. // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2012. 6(9). P. 1029–1034.

[2] Haworth D.P. Interference localization for EUTELSAT satellites–the first european transmitter location system. // International journal of satellite communications. 1997.15(4). P.155–183.

[3] Wu R., Zhang Y., Huang Y., Xiong J., Deng Z. A novel long-time accumulation method for double-satellite TDOA/FDOA interference localization. // J. Radio Science. 2018. 53(1). P.129–142.

[4] Analysis on parameter error of satellite interference location. / S. Zheng-bo, Y. Shang-Fu. // Asia-Pacific Radio Science Conference, IEEE, Qingdao, China, 2004. P. 265–268.

[5] Jeroen L. Geeraert, Jay W. Mcmahon. Dual-Satellite geolocation with ephemeris correction and uncertaintu mapping // IEE Transactions on Aerospace and electronic systems. 2020. vol.56, No1. P. 723-735.

[6] Севидов В.В., Чемаров А.О. Определение координат спутников-ретрансляторов в разностно-дальномерной системе геолокации // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2015. №3.

[7] Кистанов П.А., Титов А.А., Царик О.В., Цикин И.А., Щербинина Е.А. Сравнительная эффективность двух разностно-дальномерных методов спутниковой геолокации // Радиотехника. 2020. Т. 84, №12. С.17-30

[8] Martinez A., Aguado Agelet F., Alvarez Vázquez L. J., Hernando J. M., Mosteiro D.Optimal transmitter location in an indoor wireless system by Nelder–Mead method // Microwave and optical technology letters. 2000. 27(2). P. 146–148.

[9] Application of the Nedler-Mid optimization algorithm for the solution of the satellite geolocation problem by the time difference of arrival method. / V.A.Vargauzin, V.N. Potapichev // SPbPU Science Week. 2014. С. 8–10.

[10] Cao J. A new hybrid algorithm on TDOA localization in wireless sensor network // IEEE International Conference on Information and Automation. 2011. P. 606–610

[11] Celestrak orbit visualization, http://www.celestrak.com/NORAD/elements/geo.txt, last accessed 2021/02/1