

11;10.2

Оценка пространственно-поляризационной селекции антенн спутниковой навигации на основе анализа ошибки многолучевого распространения сигналов по двум отраженным сигналам

© А.Н. Верещагин, А.А. Ерохин, Е.Р. Гафаров, А.М. Александрин, Ю.П. Саломатов,
Е.А. Стригова, С.В. Поленга

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
E-mail: aeroxhin@sfu-kras.ru

Поступило в Редакцию 28 марта 2023 г.

В окончательной редакции 26 апреля 2023 г.

Принято к публикации 26 апреля 2023 г.

Проведена оценка ошибки, вносимой эффектом многолучевого распространения, в глобальных навигационных спутниковых системах для стационарного потребителя. На основе математической модели радиотрассы прямого и двух отраженных сигналов (многолучевая модель) получены результаты ошибки многолучевости для различных типов антенн высокоточного позиционирования.

Ключевые слова: антенна, глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), многолучевая интерференция, помехи, диаграмма направленности, огибающая ошибки многолучевости.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.12.55570.19569

Одним из важных требований конечного потребителя глобальных навигационных спутниковых систем является высокая точность определения местоположения. Ключевая составляющая погрешности измерения навигационных параметров носит название многолучевой интерференции, или многолучевости. Ошибки определения местоположения, связанные с многолучевостью, без использования специальных методов борьбы могут достигать заметной величины, превышая все остальные составляющие погрешности [1–3]. При этом точность позиционирования за счет негативного влияния многолучевости может ухудшаться (от единиц сантиметров до единиц и даже десятков метров).

Многолучевость возникает в том случае, когда помимо прямого (полезного) сигнала от спутника в точку приема приходят паразитные отраженные сигналы. Возникают такие паразитные сигналы из-за отражения как от различных препятствий на пути распространения прямого сигнала (здания, сооружения и т.п.), так и от подстилающей поверхности. Отраженные сигналы приходят с различным запаздыванием, энергетикой и фазой.

Ранее в [4] была проведена оценка огибающей ошибки многолучевости на основе двухлучевой модели распространения радиосигнала. В настоящей работе рассмотрена многолучевая модель радиотрассы, в которой учтены отраженные сигналы как ниже, так и выше горизонта. Такая модель позволит дать более полную картину при оценке многолучевой интерференции в сложной помеховой обстановке.

Рассмотрим многолучевое распространение сигнала и его влияние на оценку радионавигационных параметров, в частности на измерение псевдодалности приемником навигационных сигналов. Оценку предлагается провести на простой, но практически ценной модели: прием двух отраженных сигналов стационарным потребителем

(рис. 1). Отраженный сигнал 1 — от вертикального экрана конечных размеров, расположенного на некотором расстоянии от приемной антенны, отраженный сигнал 2 — от горизонтальной поверхности, на которой установлена мачта высотой H с приемной антенной.

Отраженный сигнал 1 дополнительно проходит расстояние $\Delta R_1 = S_1 + S_2$ до фазового центра антенны P . Отраженный сигнал 2 должен пройти дополнительное расстояние ΔR_2 до точки P .

В настоящее время существует ряд методов борьбы с многолучевостью [1,3–7], среди которых выделим наиболее существенный — использование антенны с диаграммой направленности специальной формы для уменьшения влияния отраженных сигналов, приходящих с низких углов. Для борьбы с многолучевым распространением сигнала при помощи пространственных характеристик были рассмотрены три антенны с различными формами диаграмм направленности [4], оценка которых представлена далее по результатам моделирования ошибки определения радионавигационных параметров для двух отраженных сигналов.

При моделировании прямой и отраженный сигналы можно рассматривать как суммарный многолучевой сигнал, описываемый следующими выражениями [1]:

$$I_k = A_{IQ,k} \cos(\delta\Phi_k) + n_I \sigma_{IQ,k},$$

$$Q_k = -A_{IQ,k} \sin(\delta\Phi_k) + n_Q \sigma_{IQ,k},$$

$$A_{IQ,k} = \frac{A_k L}{2} \operatorname{sinc}\left(\frac{(\omega_{d,k} - \tilde{\omega}_{d,k})T}{2}\right) \rho(\tau_k - \tilde{\tau}_k),$$

$$\sigma_{IQ,k}^2 = \sigma_{n,k}^2 L/2,$$

$$\delta\Phi_k = \operatorname{mod}\left(\frac{(\omega_{d,k} - \tilde{\omega}_{d,k})T}{2} + \phi_k + \theta_k \pi, 2\pi\right),$$

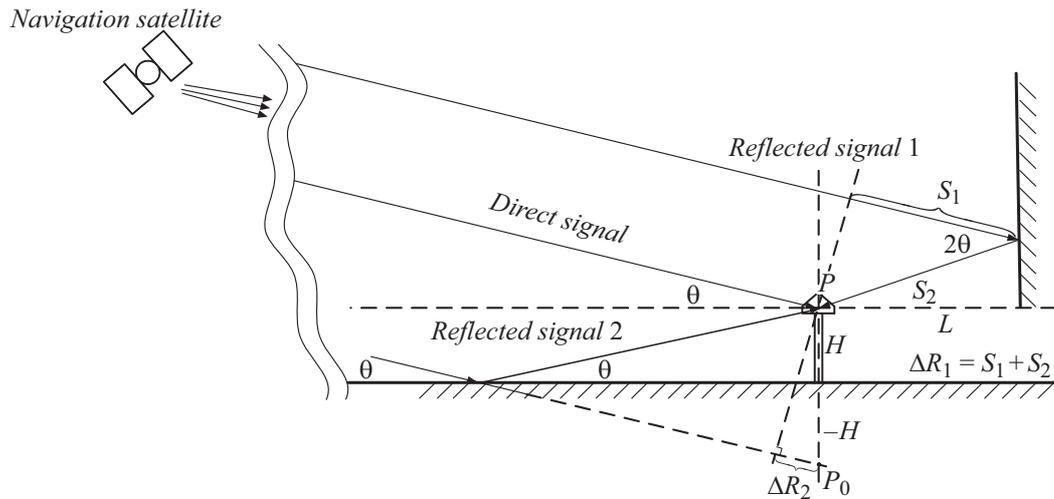


Рис. 1. Схема распространения двух отраженных сигналов.

где A_k — амплитуда навигационного сигнала на входе аналого-цифрового преобразователя (АЦП), $\sigma_{n,k}^2$ — дисперсия шума на входе АЦП, L — число тактов АЦП, участвующих в накоплении в корреляторе, $\tau_k, \tilde{\tau}_k$ — задержка дальномерного кода сигнала спутника и опорного сигнала коррелятора соответственно, $\omega_{d,k}, \tilde{\omega}_{d,k}$ — циклическая частота сигнала спутника и опорного сигнала коррелятора соответственно, ϕ_k — начальная фаза навигационного сигнала на k -м интервале, $\rho(x)$ — корреляционная функция дальномерного кода, n_I, n_Q — некоррелированные белые гауссовские шумы, $\delta\Phi_k$ — фаза на входе АЦП, θ_k — значение цифрового символа (-1 или 1), T — время накопления.

Тогда сигнал на выходе коррелятора для прямого и двух отраженных сигналов можно описать выражениями

$$\begin{aligned}
 I_k &= A_{IQ,k} \left[\cos(\delta\Phi_k) + K_{MP1,k} \cos(\delta\Phi_k + \Delta\Phi_{R1,k}) \right. \\
 &\quad \left. + K_{MP2,k} \cos(\delta\Phi_k + \Delta\Phi_{R2,k}) \right] + n_I \sigma_{IQ,k}, \\
 Q_k &= -A_{IQ,k} \left[\sin(\delta\Phi_k) + K_{MP1,k} \sin(\delta\Phi_k + \Delta\Phi_{R1,k}) \right. \\
 &\quad \left. + K_{MP2,k} \sin(\delta\Phi_k + \Delta\Phi_{R2,k}) \right] + n_Q \sigma_{IQ,k}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где $K_{MP1,k}$ — коэффициент ослабления отраженного сигнала относительно прямого на выходе коррелятора, $\Delta\Phi_{R1,k}$ — разность фаз прямого и отраженного сигналов; индексы 1 и 2 соответствуют первому и второму отраженным лучам.

При моделировании (1) использовался наиболее простой вариант оценки задержки — когерентный дискриминатор [1,2].

Моделирование проводилось в несколько этапов.

Первый этап. По данным альманаха рассчитывался прогноз положения навигационных космических аппаратов (НКА) ГЛОНАСС на интервале 7 суток для

антенны, установленной по следующим координатам: 56°N , $92^\circ 4'\text{E}$, высота 200 m над уровнем моря (приблизительные координаты Института инженерной физики и радиоэлектроники Сибирского федерального университета, Красноярск).

Второй этап. Для каждого НКА определялась видимость НКА с учетом расположения в 1.5 m от щита высотой 10 m , а также геометрия прямого и отраженных сигналов.

Третий этап. Осуществлялся расчет мощности и фазы прямого и отраженных сигналов для заданных приемных антенн. Дополнительно оценивалась идеальная антенна, диаграмма направленности которой имеет мгновенный перепад усиления от 0 до -25 dB при переходе через горизонт, а также не искажает фазу принимаемого сигнала [4]. В качестве отражающих поверхностей использовались бетон для отраженного от стены сигнала и асфальт для отраженного от земли сигнала [3]. Коэффициент отражения (коэффициент затухания) для бетона при нормальном падении на частоте L1, согласно [3], составляет 0.404 (-7.87 dB), для асфальта — 0.121 (-18.3 dB).

Четвертый этап. Проводилась корреляционная обработка смеси прямого и двух отраженных сигналов, а также определение ошибки оценки псевдодальности.

Результаты моделирования в части ошибки определения псевдодальности в зависимости от угла места представлены на рис. 2. Отсчет угла места проводился в соответствии с рис. 1, где $\theta = 0^\circ$ — направление на горизонт. Использованные диаграммы направленности антенны приведены в работе [4]. Данные о траектории движения НКА ГЛОНАСС моделировались на интервале 7 суток 23 часа 27 минут 28 секунд, чтобы охватить все трассы прохождения НКА относительно потребителя [6]. Результаты приведены для углов места до 70° (по причине малого количества отраженных сигналов от стены) для НКА вышеуказанного угла места.

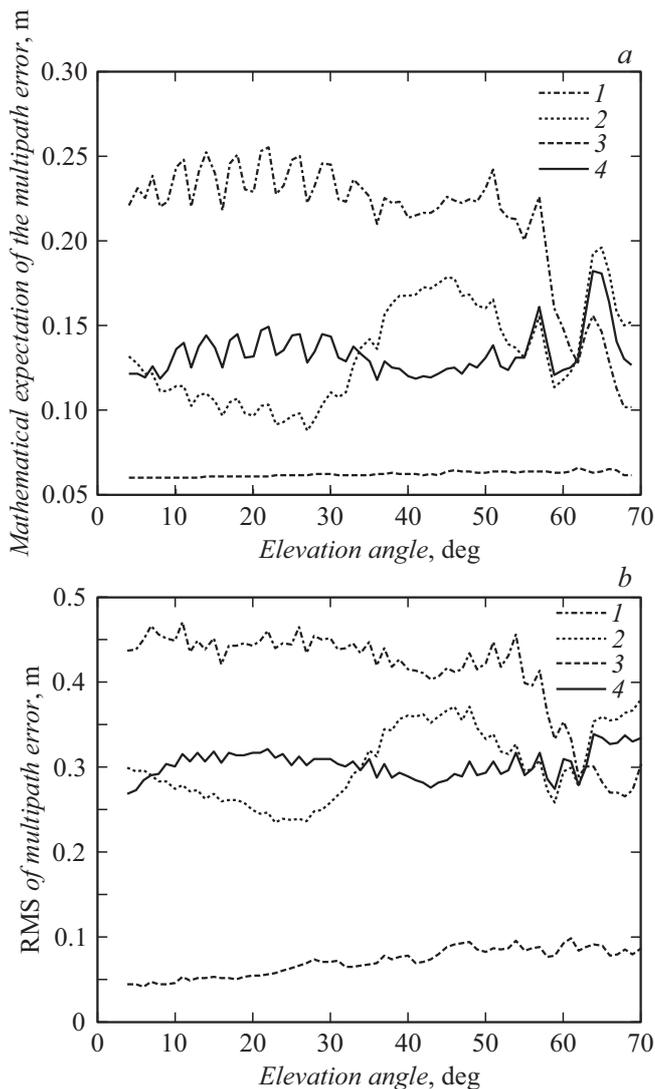


Рис. 2. Оценка влияния эффекта многолучевого распространения навигационных сигналов. *a* — математическое ожидание ошибки оценки псевдодалности, *b* — СКО ошибки оценки псевдодалности. 1 — антенна с гофрированным фланцем, 2 — спиральная антенна, 3 — идеальная антенна, 4 — спирально-щелевая антенна.

При оценке ошибки многолучевости спиральная антенна показывает наилучшие результаты в диапазоне углов $[7^\circ; 33^\circ]$ (среднеквадратическое отклонение (СКО) не более 0.3 м), где влияние многолучевой интерференции наиболее значительно [8]. Данный эффект обусловлен тем, что диаграмма направленности спиральной антенны имеет высокую крутизну [4] при переходе в нерабочую область углов. Классическое решение для борьбы с многолучевой интерференцией в виде антенны с гофрированным фланцем с продольным размером около 2λ показало наихудшие результаты в диапазоне углов $[3^\circ; 33^\circ]$, СКО около 0.45 м. Спирально-щелевая антенна имеет немного большее СКО, чем спиральная антенна, несмотря на низкую крутизну диаграммы [4].

Поэтому спирально-щелевая антенна может выступать в качестве хорошего поляризационного фильтра, а как известно [9], при помощи поляризационной селекции также можно достичь высокого подавления эффекта многолучевой интерференции.

Таким образом, результаты исследования многолучевой модели показали, что наименьшее влияние многолучевой интерференции наблюдается для спиральной антенны, поэтому с точки зрения повышения точности радионавигационных систем наиболее предпочтительным является использование антенн с высокой крутизной диаграммы направленности. При этом спиральная антенна имеет малые габариты и вес по сравнению с антенной с гофрированным фланцем.

Результаты коррелируют с полученными в нашей предыдущей работе [4]. Дальнейшее направление исследований — проведение эксперимента в условиях, приблизительно соответствующих описанным в настоящей работе.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке „Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности“ в рамках научного проекта № 2022102108922 „Высокоточная антенная система наземного сегмента ГЛОНАСС для применения на арктических территориях“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Р.В. Бакитько, Е.Н. Болденков, Н.Т. Булавский, В.В. Дворкин, В.С. Ефименко, В.Е. Косенко, В.Я. Нартов, А.И. Перов, А.Е. Перьков, В.В. Тюбалин, Ю.М. Урличич, В.Н. Харисов, В.Е. Чеботарев, А.Ю. Шатилов, *ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования* (Радиотехника, М., 2010), с. 230–245.
- [2] L. Zhang, V. Schwieger, *J. Appl. Geodesy*, **14** (2), 167 (2020). DOI: 10.1515/jag-2019-0059
- [3] *Springer handbook of global navigation satellite systems*, ed by P.J.G. Teunissen, O. Montenbruck (Springer International Publ., N.Y., 2017), p. 451.
- [4] А.А. Ерохин, Е.Р. Гафаров, А.М. Александрин, Р.О. Рязанцев, С.В. Поленга, Ю.П. Саломатов, Письма в ЖТФ, **48** (24), 30 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.24.54021.1924 [А.А. Erokhin, E.R. Gafarov, A.M. Alexandrin, R.O. Ryazantsev, S.V. Polenga, Yu.P. Salomatov, *Tech. Phys. Lett.*, **48** (12), 66 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.12.54952.19249].
- [5] F. Zimmermann, B. Schmitz, L. Klingbeil, H. Kuhlmann, *Sensors*, **19** (1), 25 (2019). DOI: 10.3390/s19010025

- [6] А.Н. Верещагин, Ю.Л. Фатеев, Успехи современной радиоэлектроники, № 9, 43 (2012).
- [7] А.В. Ячин, С.В. Сизасов, А.В. Гребенников, Успехи современной радиоэлектроники, № 11, 171 (2016).
- [8] Д.В. Татарников, А.А. Генералов, Журнал радиоэлектроники, № 1, 7 (2018). DOI: 10.30898/1684-1719-2018-1-7
- [9] A. Leick, L. Rapoport, D. Tatarnikov, *GPS satellite surveying* (John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2015), p. 578–600.