

11;10.2

Оценка пространственно-поляризационной селекции антенн спутниковой навигации на основе анализа ошибки огибающей многолучевой интерференции

© А.А. Ерохин, Е.Р. Гафаров, А.М. Александрин, Р.О. Рязанцев, С.В. Поленга, Ю.П. Саломатов

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

Поступило в Редакцию 16 мая 2022 г.

В окончательной редакции 24 октября 2022 г.

Принято к публикации 25 октября 2022 г.

Проведена оценка огибающей ошибки, вносимой эффектом многолучевого распространения в системах глобального позиционирования. На основе математической модели радиотрассы прямого и отраженного сигналов получены результаты ошибки многолучевости для различных типов антенн высокоточного позиционирования.

Ключевые слова: антенна, ГНСС, многолучевая интерференция, помехи, диаграмма направленности, огибающая ошибки многолучевости.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.24.54021.19249

В настоящее время в наземном сегменте глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), таких как GPS, ГЛОНАСС и др., острой является проблема многолучевой интерференции (МИ). Как отмечается в работах [1,2], МИ ухудшает точность определения местоположения за счет того, что антенна ГНСС принимает прямой (полезный) и отраженный (помеховый) сигналы. Помеховый сигнал возникает из-за отражения от подстилающего рельефа, окружающего антенну. Как правило, помеховый сигнал всегда присутствует при приеме прямого сигнала от спутника, однако существуют методы борьбы с МИ, реализуемые непосредственно в антенне: 1) поляризационная селекция; 2) пространственная селекция. Таким образом, целью настоящей работы является определение влияния антенн различных типов на точность позиционирования по ГНСС.

Известно [3], что при отражении сигнал изменяет свою поляризацию на противоположную (например, прямой сигнал имеет круговую поляризацию с правым вращением, а отраженный — с левым). Поляризационная селекция реализуется в антенне при помощи подавления поляризации неосновного типа, в ГНСС это левая круговая поляризация [4].

Пространственная селекция заключается в уменьшении излучения при переходе в нерабочую область углов. При этом чем более резким является этот переход (высокая крутизна диаграммы направленности (ДН)), тем меньше влияние помехового сигнала на ошибку определения координат. В идеальном случае крутизна ДН должна стремиться к бесконечности. У антенн базовых станций с экраном в виде гофрированного фланца (в англоязычной литературе choke ring) [5] обеспечивается подавление излучения в нерабочей области углов, но крутизна ДН составляет около 0.3 dB/deg. В последнее время исследуются цилиндрические спиральные антенны [6,7], крутизна ДН которых достигает 0.7–0.9 dB/deg.

Таким образом, представляет интерес оценка МИ, методы борьбы с которой реализованы при помощи пространственных характеристик в различных типах антенн ГНСС.

Для оценки влияния антенны на снижение эффекта МИ была разработана математическая модель. В основу модели положена отражательная трактовка распространения радиоволн с учетом сферичности Земли. При рассмотрении отражательной трактовки распространения радиоволн сферическая Земля заменяется плоской. При этом в точке отражения (точка C на рис. 1)

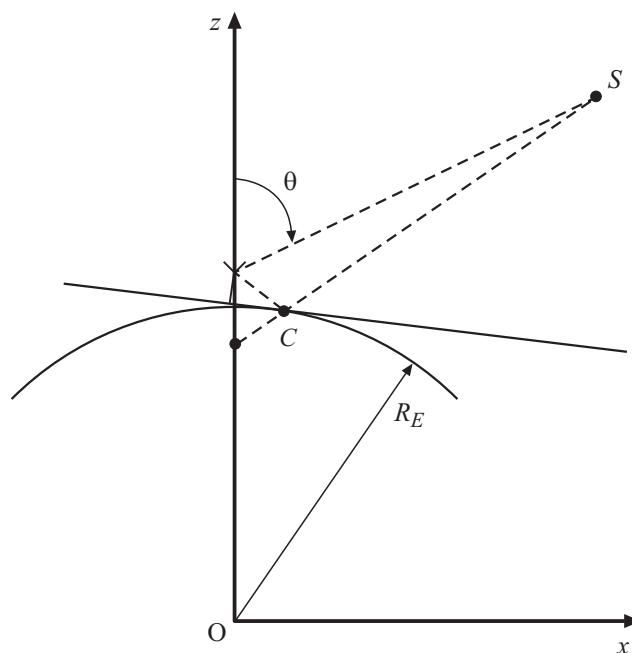


Рис. 1. Схема распространения радиоволн. S — спутник, C — точка отражения, R_E — радиус Земли, θ — угол ДН.

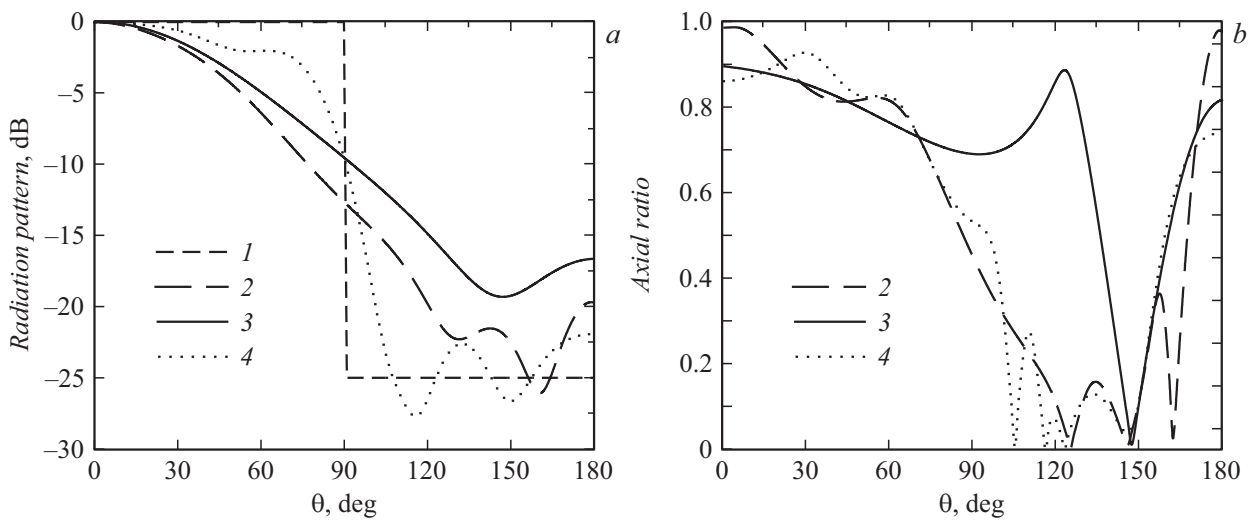


Рис. 2. Характеристики направленности: *a* — ДН, *b* — КЭ. 1 — идеальная антенна, 2 — антенна с гофрированным фланцем, 3 — спирально-щелевая антенна, 4 — спиральная антенна.

проводится касательная к поверхности сферической Земли. Касательная является поверхностью плоской Земли, относительно которой рассчитываются приведенные расстояния, пройденные прямой и отраженной волнами. Аналогичные модели распространения радиоволн для оценки точности позиционирования используются и другими авторами (см., например, [8]).

Также необходимо определить коэффициент отражения от поверхности Земли. Будем считать, что верхний слой и подстилающая среда имеют полубесконечные размеры. В качестве подстилающей поверхности используется морская вода; для определения ее диэлектрической проницаемости воспользуемся моделью, предложенной в работе [9]. Коэффициенты отражения для левой и правой круговой поляризаций можно записать в следующем виде:

$$R_{right} = \frac{1}{\sqrt{2}}(R_v + jR_h), \quad R_{left} = \frac{1}{\sqrt{2}}(R_v - jR_h), \quad (1)$$

где R_v , R_h — коэффициенты отражения для вертикальной и горизонтальной поляризаций соответственно.

Точность позиционирования можно оценить с помощью огибающей ошибки МИ (в англоязычной литературе *multipath envelope*) [3], которая может быть выражена в метрах и по величине равна ошибке определения псевдодальности. Частота дискретизации кодовых символов сигнала стандартной точности для системы ГЛОНАСС (частотный диапазон L1) составляет 511 kHz, что обуславливает ошибку МИ 14.7 м при приеме сигнала на изотропную антенну (при однократном отражении с коэффициентом отражения, равным 0.5; для морской воды коэффициент отражения выше: $R_{right}, R_{left} > 0.6$). Ошибка МИ по сигналу стандартной точности используется для относительного сравнения различных типов антенн.

Приведем графическое изображение огибающей ошибки МИ в виде ее зависимости от угла наблюдения

спутника ГНСС с учетом коэффициента отражения (1) и ДН приемной антенны. Огибающая ошибки МИ в соответствии с работой [3] задается в виде кусочно-линейной функции, аргументом которой является задержка отраженного сигнала относительно прямого. Данная задержка в применяемой модели была пересчитана в углы прихода полезного сигнала. В качестве приемных используем антенну с гофрированным фланцем размером около 2λ [5], спирально-щелевую антенну размером 0.5λ [4] или цилиндрическую спиральную антенну высотой 1.8λ [6]. Как отмечалось выше, каждая из этих антенн обладает различной крутизной ДН при переходе в нерабочую область углов и характеризуется различным уровнем поляризационной развязки — коэффициента эллиптичности (КЭ). Математическая модель огибающей ошибки МИ учитывает свойства поляризации и направленности антенн (в том числе крутизну ДН), поэтому является удобной для оценки по этим двум параметрам. ДН по абсолютному значению поля и КЭ антенн на центральной частоте L1 ГЛОНАСС приведены на рис. 2. Полученные результаты огибающей ошибки МИ представлены на рис. 3. Дополнительно на рис. 3 показана ошибка огибающей МИ для идеальной „столообразной“ ДН с шириной 180 deg, крутизной, равной бесконечности в направлении на горизонт ($\theta = 90$ deg), и уровнем заднего излучения -25 dB. Следует отметить, что при использовании других типов поверхностей результаты качественно будут схожи с полученными, а количественно ошибка огибающей МИ будет несколько меньше ввиду меньшего коэффициента отражения [8].

Как видно из приведенных кривых, ошибка МИ значительно повышается при углах от 50 до 90 deg в зависимости от типа антенны. Увеличение ошибки МИ связано с тем, что ширина ДН реальных антенн менее 180 deg. Для идеальной ДН резкого увеличения ошибки не наблюдается. Кроме того, на уровень ошибки МИ влияет и поляризационная ДН антенны, которая

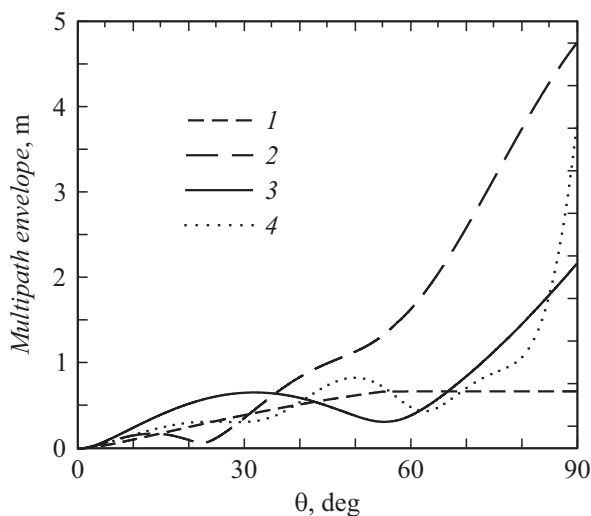


Рис. 3. Ошибка огибающей МИ. 1 — идеальная ДН, 2 — антенна с гофрированным фланцем, 3 — спирально-щелевая антенна, 4 — спиральная антенна.

меняется с правой поляризации в главном лепестке на левую в боковом (заднем) лепестке, поэтому даже для идеальной ДН ошибка МИ отлична от нуля.

Для реальных антенн с гофрированным фланцем и спирально-щелевой антенны крутизна ДН примерно одинакова, но за счет лучшей поляризационной развязки спирально-щелевая антенна характеризуется вдвое меньшей ошибкой МИ. Здесь важно отметить, что помимо МИ на точность позиционирования влияет КПД антенны. Снижение КПД пропорционально снижению точности определения псевдодалности, вызванному ростом отношения сигнал/шум. Конструкция спирально-щелевой антенны устроена так, чтобы обеспечить режим бегущей волны в питающей полосковой линии, оканчивающейся поглощающим элементом; следовательно, высокие значения поляризационной развязки достигаются за счет снижения КПД (до значений около 50%).

Указанного недостатка лишена цилиндрическая спиральная антенна, обладающая высоким КПД и высокой крутизной ДН. За счет этого антенна имеет низкую ошибку МИ, близкую к ошибке МИ идеальной антенны, вплоть до угла 80 deg (рис. 3). Рост ошибки МИ при углах более 80 deg обусловлен конечной крутизной ДН.

Таким образом, устойчивыми к МИ являются как антенны с высокой крутизной ДН, так и антенны с высокой поляризационной развязкой при переходе в нерабочую область углов ($\theta > 90$ deg). При этом КПД высокоточных антенн должен быть близок к 100%. С точки зрения проведенных исследований перспективным типом антенн для применения в наземном сегменте ГНСС являются спиральные антенны. Дальнейшие направления исследований связаны с решением задачи согласования спиральной антенны и анализом точностных характеристик во всем диапазоне частот ГНСС.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 2021101507823 („Антенны наземного сегмента ГЛОНАСС для использования на территориях Крайнего Севера“), а также проекта № 2022030108251 („Совершенствование систем радионавигации средневолнового диапазона“).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D.V. Tatarnikov, A.A. Generalov, in *Proc. of the Progress in Electromagnetics Research Symp. (PIERS)* (St. Petersburg, 2017), p. 800. DOI: 10.1109/PIERS.2017.8261851
- [2] E.R. Gafarov, A.V. Stankovsky, Yu.P. Salomatov, in *2017 Radiation and scattering of electromagnetic waves (RSEMW)* (IEEE, 2017), p. 311. DOI: 10.1109/RSEMW.2017.8103659
- [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] Е.Р. Гафаров, Ю.П. Саломатов, в сб. *Системы связи и радионавигации* (Красноярск, 2014), с. 102.
- [5] M.K. Emara, J. Hautcoeur, G. Panther, J.S. Wight, S. Gupta, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **67** (3), 2008 (2019). DOI: 10.1109/TAP.2019.2891553
- [6] E.R. Gafarov, A.A. Erokhin, Yu.P. Salomatov, in *2019 Radiation and scattering of electromagnetic waves (RSEMW)* (IEEE, 2019), p. 128. DOI: 10.1109/RSEMW.2019.8792704
- [7] D.V. Tatarnikov, A.P. Stepanenko, A.V. Astakhov, in *Proc. of the Progress in Electromagnetics Research Symp. (PIERS)* (St. Petersburg, 2017), p. 479. DOI: 10.1109/PIERS.2017.8261789
- [8] A. Leick, L. Rapoport, D. Tatarnikov, *GPS satellite surveying* (John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2015), p. 578–600.
- [9] T. Meissner, F.J. Wentz, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **42** (9), 1836 (2004). DOI: 10.1109/TGRS.2004.831888