

УДК 621.396.96

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ МНОГОЛУЧЕВОСТИ НА КАЧЕСТВО СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОГО ЗАХОДА НА ПОСАДКУ

Г.В. Криницкий, М.Д. Леонова, Е.Н. Юрасова

Статья представлена профессором, доктором физико-математических наук А.И. Козловым

В настоящее время разработано множество методов, направленных на снижение влияния многолучевости на качество спутниковой навигации, однако ни один из них не гарантирует ее полного устранения. В данной статье представлен комплексный метод борьбы с многолучевым распространением сигналов, использующий преимущества основных существующих методов и позволяющий обеспечить категоризованную посадку самолетов.

Ключевые слова: спутниковая навигация, авиация, наземная система функционального дополнения, многолучевое распространение сигналов, пространственное разнесение антенн.

Введение

В настоящее время проводится внедрение наземных систем функциональных дополнений (GBAS) с целью улучшения характеристик глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). GBAS предназначена для использования в системах посадки самолетов для повышения точности и полноты информации о позиционировании (является заменой системы ILS).

Работа наземных систем функциональных дополнений основана на следующем принципе: антенны опорных приемников устанавливаются в точно известных местах, и по измеренным навигационным параметрам производится вычисление дифференциальных поправок по координатам, которые по радиоканалу передаются на воздушное судно (ВС).

Требования к наземным функциональным дополнениям для обеспечения категоризованной посадки ВС регламентируются международной организацией гражданской авиации ICAO.

Одна из составляющих погрешности измерения навигационных параметров вызывается так называемой многолучевостью ("multipath"). Она обусловлена интерференцией сигналов, принимаемых непосредственно от навигационных космических аппаратов (НКА) и сигналов НКА, отраженных от предметов, расположенных вблизи приемной антенны аппаратуры потребителя, а также от водных поверхностей, горных массивов и т.п.

Основные условия для возникновения многолучевого распространения сигнала: разность времени прихода прямого и отраженного сигнала должна быть меньше одного элемента псевдослучайной последовательности (для сигналов ГНСС при стандартной точности данная величина составляет 2 микросекунды), а расстояние до отражающего предмета не должно значительно превосходить размеры отражающего тела и радиус кривизны отражающего тела в точке отражения. Соответственно, многолучевость возникает из-за отражения от крупногабаритных объектов.

Ошибки, связанные с многолучевостью, без использования специальных методов борьбы могут достигать заметной величины, превышая все остальные составляющие погрешности [1]. Дифференциальный режим спутниковой навигации не позволяет устранить погрешность, вызываемую переотражениями сигнала, в отличие от погрешностей, возникающих при прохождении сигнала сквозь атмосферу.

Постановка задачи и методы решения

Погрешности, обусловленные влиянием многолучевости, возникают не только на наземной дифференциальной подсистеме, но и в бортовой навигационной аппаратуре. Эти погрешности можно снизить посредством выбора места размещения антенны на корпусе

самолета. Корпус участвует в формировании диаграммы направленности антенны, размещенной на его поверхности.

Существуют методы уменьшения влияния многолучевости, основанные на анализе формы взаимно корреляционной функции (ВКФ). Появление аномалий в навигационном сигнале приводит к искажению формы пика ВКФ принятого сигнала и опорного сигнала в навигационном приемнике[2].

Для определения наличия отраженных сигналов при анализе ВКФ оцениваются три основных параметра[3]:

$$SC_i = \frac{E_i - L_i}{2 \cdot P}, \quad (1)$$

$$TC_i = \frac{E_i + L_i}{2 \cdot P}, \quad (2)$$

$$RC_i = \frac{L_i}{2 \cdot P'} \quad (3)$$

где SC_i – симметрия пика ВКФ; TC_i – отклонение формы ВКФ от треугольной; RC_i – отклонение отсчетов ВКФ от расчетных; i – смещение относительно середины АКФ; P – середина пика АКФ; E_i – значение корреляции, соответствующее смещению i до корреляционного пика; L_i – значение корреляции, соответствующее смещению i после корреляционного пика.

На рис. 1 показаны типовые точки измерений на вершине корреляционного пика приемника [4].

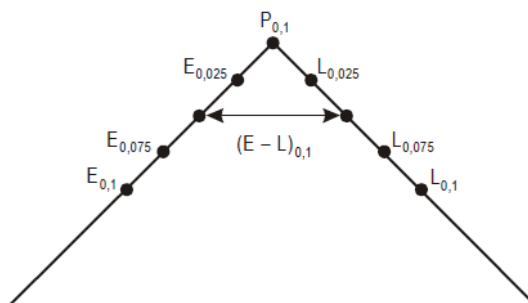


Рис. 1. Корреляционный пик и измеренные значения коррелятора [4]

В [5] рассматривается метод борьбы с отраженными сигналами, основанный на повторности значений погрешности, вызванной многолучевостью, для повторяющихся траекторий полета НКА относительно объекта. По результатам многосуточных измерений можно сформировать зависимость погрешности от направления прихода сигналов. В дальнейшем полученную зависимость можно использовать в реальном времени для корректировки результатов с учетом направления прихода НКА.

Данный метод эффективен для стационарного наземного функционального дополнения, но в случае использования мобильного варианта исполнения, при необходимости быстрого развертывания, многосуточные измерения отраженных сигналов не представляются возможными.

Также используется метод поляризационной селекции, он дает преимущество для разделения полезного сигнала и его однократного отражения. Но в случае наличия нескольких отражающих объектов данный метод малоэффективен.

Применение многоэлементных антенн в навигационной аппаратуре потребителя [6] может значительно уменьшить негативные эффекты, вызванные многолучевостью, при распространении радиоволн. При этом производится одновременный прием сигналов од-

ного передатчика несколькими приемниками на разнесенные в пространстве антенны (см. рис. 2).

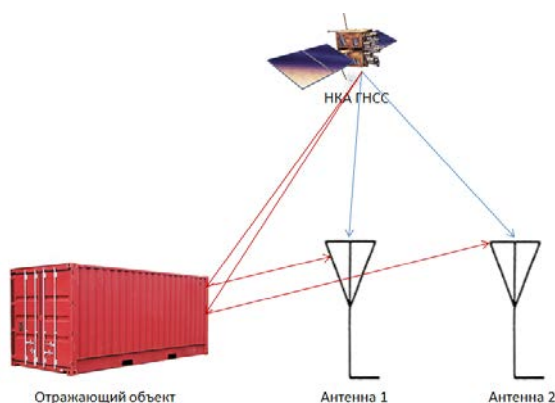


Рис. 2. Прием сигнала на разнесенные в пространстве антенны

Также возможно улучшить результаты уменьшения погрешности, вызванной многолучевым распространением сигналов, путем использования антенных систем, обеспечивающих большую пространственную избирательность. Можно существенно ослабить уровень помехи на входе приемника, формируя в направлении сигнала со спутника максимум диаграммы направленности приемной антенны, а в направлении отраженных сигналов – нули в диаграмме направленности.

Результаты проведения вычислительного эксперимента

Поскольку данные методы являются эвристическими, целесообразно исследовать их эффективность применительно к задачам наземных функциональных дополнений. Для этого в MATLAB была разработана математическая модель, демонстрирующая изменения корреляционной функции в зависимости от наличия, количества и ослабления отраженных сигналов в условиях ограниченной полосы частот принимаемого сигнала.

Программа моделирует работу навигационной аппаратуры, оснащенной двумя антеннами, разнесенными на расстояние, равное половине длины волны сигнала НКА. На пару антенн приходит сумма сигнала НКА и сигналов, отраженных от различных объектов.

В качестве основного сигнала используется псевдослучайный код (м-последовательность) спутников ГЛОНАСС PRS. Формируется отраженный сигнал PRS_r путем ослабления основного сигнала на g децибел, добавления задержки d и изменения фазы на p :

$$PRS_r(n) = 10^{\frac{g}{20}} \cdot PRS(n, d) \cdot e^{-j \cdot p \cdot n}. \quad (4)$$

К сумме сигналов $SUM = PRS + PRS_{ref}$ добавлен белый шум, имитирующий шум радиоприемного тракта. Ограничение полосы частот приемного тракта моделируется цифровым фильтром. Рассчитывается эталонная корреляция (автокорреляция COR_{PRS} м-последовательности дальномерного кода спутников ГЛОНАСС PRS) и взаимная корреляция $COR_{PRS, SUM}$ сигналов PRS и SUM:

$$COR_{PRS}(k) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N PRS_n \cdot PRS_{n-k}; \quad (5)$$

$$COR_{PRS, SUM}(k) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N PRS_n \cdot SUM_{n-k}. \quad (6)$$

На рис. 3 показано отличие формы корреляционной функции м-последовательности дальномерного кода спутников ГЛОНАСС в присутствии отражений от местных предметов (сплошная линия), от автокорреляционной функции (пунктирная линия) при приеме сигнала на одну антенну. Видно, что в данном случае по изменению формы корреляционной функции можно судить о наличии многолучевости, но разделение сигнала со спутника и отраженного сигнала не представляется возможным.

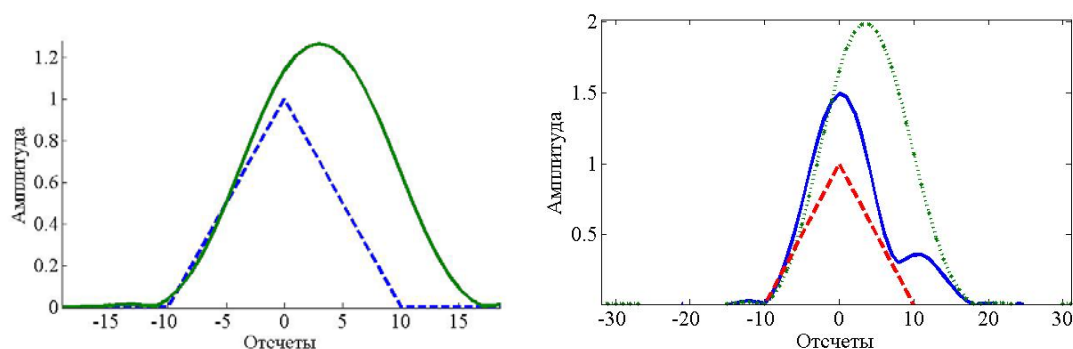


Рис. 3. Изменение формы корреляционной функции в условиях многолучевости

Рис. 4. Результат моделирования пространственно-временного разделения прямых и отраженных сигналов

Взаимная корреляция м-последовательности и суммы сигналов с двух антенн рассчитывается следующим образом:

$$COR_{PRS, (S_1 + S_2 \cdot e^{j\varphi})}(k) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N PRS_n \cdot (S_1 + S_2 \cdot e^{j\varphi})_{n-k}, \quad (7)$$

где S_1 и S_2 – сигналы, принятые на первую и вторую антенну соответственно, φ – разность фаз. Путем выбора φ формируется минимум в направлении отраженного сигнала, при этом его влияние на положение максимума корреляционной функции становится минимальным. (рис. 4). Критерием выбора φ может служить ширина пика корреляционной функции.

Выводы:

Проведенный вычислительный эксперимент показывает возможность учета направлений прихода сигналов в совокупности с анализом формы корреляционной функции для устранения влияния отраженных сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС принципы построения и функционирования // Издательство «Радиотехника» Москва, 2010
2. Bhuiyan M.Z., Zhang J., Lohan E.S., Wang W., Sand S. Analysis of multipath mitigation techniques with land mobile satellite channel model // Radioengineering, 2012, Vol.21, №4
3. Тюбалин В.В., Цветков А.О., Шувалов А.В. Алгоритмы обнаружения аномалий навигационных сигналов // Радиосвязь и радионавигация, 2013, №3
4. ИКАО. Международные стандарты и рекомендуемая практика. Приложение 10 к конвенции о международной гражданской авиации. Авиационная радиосвязь. Том I Радионавигационные средства // Издание шестое, 2006
5. Гребенников А.В., Сизасов С.В., Ячин А.В. Варианты применения угломерной аппаратуры ГНСС для уменьшения погрешности многолучевости // Радиосвязь и радионавигация, 2013, №3
6. Ying Chieh (Jay) Chuang, Inder J. Gupta Two stage beamformer for GNSS receiver antenna arrays// The Ohio State University, 2014

MULTIPATH MITIGATION TECHNIQUES IN SATELLITE NAVIGATION FOR PRECISE LANDING

Krinitzky G.V., Leonova M.D., Yurasova E.N.

There are a lot of methods of multipath mitigation, however none of them guarantee its full elimination. The complex method of multipath mitigation in the context of precise aircraft landing is presented in this article.

Keywords: satellite navigation, aircraft, ground-based augmentation system, multipath mitigation.

REFERENCES

1. Perov A.I., Harisov V.N. GLONASS printsipy postroeniya i funktsionirovaniya // Izdatel'stvo «Radio-tekhnika» Moskva, 2010
2. Bhuiyan M.Z., Zhang J., Lohan E.S., Wang W., Sand S. Analysis of multipath mitigation techniques with land mobile satellite channel model // Radioengineering, 2012, Vol.21, №4
3. Tyubalin V.V., TSvetkov A.O., SHuvalov A.V. Algoritmy obnaruzheniya anomaliiy navigatsionnykh signalov // Radiosvyaz' i radionavigatsiya, 2013, №3
4. ICAO. Mezhdunarodnye standarty i rekomenduemaya praktika. Prilozhenie 10 k konventsii o mezhdunarodnoy grazhdanskoy aviatsii. Aviatsionnaya radiosvyaz'. Tom I Radionavigatsionnye sredstva // Izdanie shestoe, 2006
5. Grebennikov A.V., Sizasov S.V., YAchinn A.V. Varianty primeneniya uglomernoy apparatury GNSS dlya umen'sheniya pogreshnosti mnogoluchevosti // Radiosvyaz' i radionavigatsiya, 2013, №3
6. Ying Chieh (Jay) Chuang, Inder J. Gupta Two stage beamformer for GNSS receiver antenna arrays// The Ohio State University, 2014

Сведения об авторах:

Криницкий Георгий Викторович, 1984 г.р., окончил МЭИ (ТУ) (2006), соискатель МГТУ ГА, область научных интересов: радионавигация, радиотехника, навигация и управление воздушным движением.

Леонова Мария Дмитриевна, 1985 г.р., окончила ТУ Ильменау (2007) и МЭИ (ТУ) (2009), область научных интересов: спутниковая радионавигация и управление воздушным движением, точная измерительная техника, биомедицина.

Юрасова Екатерина Николаевна, 1986 г.р. окончила МЭИ (ТУ) (2009), область научных интересов: радионавигация, радиотехника, навигация и управление воздушным движением.