

Анализ эффективности методов контроля доступности навигационных определений ГЛОНАСС/GPS для координатных систем интервального регулирования движения поездов

Д.С. Халиманов

Иркутский государственный университет путей сообщения

Аннотация: В настоящей статье предложено использование локальной дифференциальной системы (ЛДС) ведомственного назначения в качестве средства для контроля доступности навигационных определений ГЛОНАСС/GPS координатных систем интервального регулирования движения поездов (ИРДП). Рассмотрены метод дифференциальной коррекции псевдодальностей и метод прямой дифференциальной коррекции координат. Проведен анализ эффективности работы этих методов в программном комплексе Matlab, используя суточные дальномерные измерения стационарных GPS-станций, расположенных в Канаде.

Ключевые слова: спутниковая радионавигация, контроль доступности требуемых навигационных характеристик, точность позиционирования на транспорте.

Введение

Руководством ОАО «РЖД» поставлена задача повышения пропускной способности железных дорог, одним из способов решения которой является внедрение комплексной системы интервального регулирования движения поездов (ИРДП).

Реализация ИРДП с минимальным межпоездным интервалом возможна за счет использования следующих технологий:

1. Повышение допустимой скорости проследования светофора с желтым огнем более 60 км/ч за счет применения устройств безопасности, обеспечивающих расчет тормозной кривой к светофору с запрещающим показанием [1]. Реализация данной технологии требуется совершенствования локомотивных устройств безопасности в части повышения точности и надежности позиционирования за счет разработки новых алгоритмов обработки и использования спутниковых данных.

2. Гибридная система управления движением, которая реализует алгоритмы интервального регулирования на «хвост» впереди идущего

поезда. Фактически, регулирование «на хвост» впереди идущего поезда означает переход к координатной системе регулирования, где особую роль играет надежная и безопасная система позиционирования. Координатное управление здесь реализуется за счет реперных точек, которыми являются генераторы тональных рельсовых цепей и комплексного использования навигационных данных от бортовых устройств, таких, как спутниковые навигаторы ГЛОНАСС/GPS, одометры, датчики измерения ускорений [2].

Одной из проблем внедрения вышеуказанных технологий для организации ИРДП на Российских железных дорогах является использование в них аппаратуры спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS, поскольку текущая точность определения местоположения средствами ГЛОНАСС/GPS может меняться в значительных пределах. Это связано с тем, что на работу спутниковой навигации оказывает влияние тропосферная и ионосферная дальномерные погрешности, особенно в условиях геомагнитных возмущений [3].

Поскольку характер дальномерных погрешностей местоположения является плохо предсказуемым, то возникает задача контроля доступности требуемых навигационных характеристик (ТНХ) в режиме времени, близком к реальному.

Для систем ИРДП наилучшим средством контроля ТНХ могло бы стать использование локальных дифференциальных систем (ЛДС) ведомственного назначения.

Структурная схема предлагаемой системы контроля доступности навигационных параметров ГЛОНАСС/GPS на базе ЛДС представлена на рисунке 1.

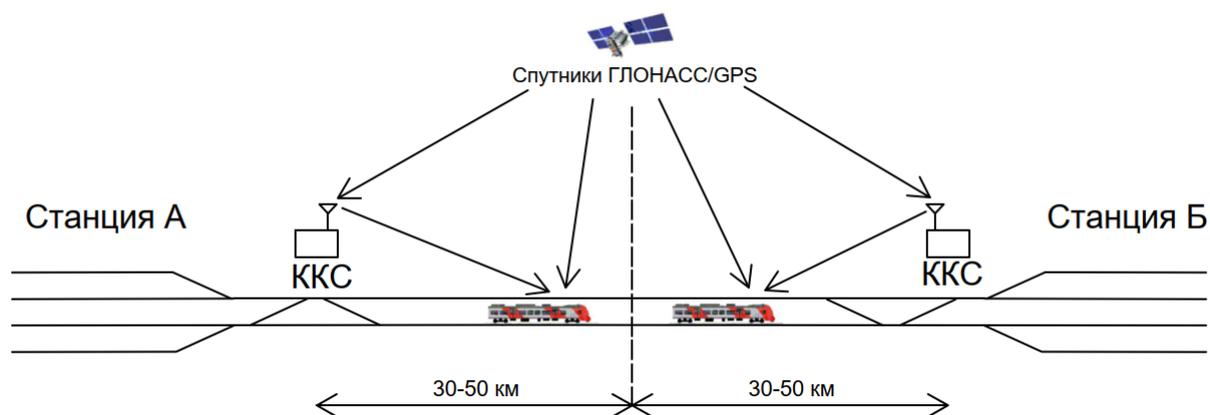


Рис. 1. – Структурная схема системы контроля доступности навигационных параметров ГЛОНАСС/GPS

Контрольно-корректирующая станция (ККС), расположенная в точке с известными координатами и дифференциальные поправки (ДП), которые передаются в аппаратуру навигации локомотива для увеличения точности определения местоположения, является основой ЛДС [4].

По радиоканалу сигнал от ККС передается в локомотив и содержит ДП к дальномерной погрешности видимых навигационных спутников и к погрешностям местоопределения в локальной декартовой системе координат. В состав этого сигнала включается и необходимая контрольная информация для оценки текущей доступности ТНХ в месте расположения пользователя.

Существует два метода локальной дифференциальной коррекции: метод коррекции псевдодальностей и метод прямой коррекции координат [4].

Первый метод является более гибким для использования в произвольной точке рабочей зоны ЛДС и позволяет расширить радиус рабочей зоны. Однако, при использовании этого метода возникают дополнительные сложности с контролем целостности сигналов отдельных спутников, особенно в случае сложных условий распространения радиоволн в точке расположения пользователя.

При использовании метода прямой дифференциальной коррекции координат предполагается, что для всех навигационных приемников,

расположенных в зоне действия дифференциальных поправок, рабочее созвездие НС одинаково и ошибки позиционирования в рабочей зоне имеют высокую пространственно-временную корреляцию. Альтернативным подходом, при использовании этого метода может стать формирование наборов ДП к координатам для различной конфигурации видимого навигационного созвездия и наборов соответствующей контрольной информации для оценки доступности ТНХ. При этом снимается требование одинакового рабочего созвездия на ККС и в навигационной аппаратуре локомотива.

В настоящей работе рассматривается проблема контроля доступности ТНХ пользователей ГЛОНАСС/GPS в реальном времени для систем ИРДП. Производится сравнительный анализ эффективности расчета контроля доступности ТНХ при использовании метода коррекции псевдодальностей и метода прямой коррекции координат.

Методы контроля доступности ТНХ для систем ИРДП

Рассмотрим метод контроля доступности ТНХ на плоскости при использовании ЛДС с коррекцией псевдодальностей. ККС вычисляет параметры целостности сегментов системы и ДП для компонент дальномерных погрешностей спутников, находящихся в зоне видимости, и отправляет их пользователю. С учетом поправок дальномерных погрешностей и реальной наблюдаемой геометрии спутников в аппаратуре пользователя системы в топоцентрической системе координат вычисляется текущий «уровень защиты» в горизонтальной плоскости (HPL). Локомотивный приемник сравнивает вычисленные уровни защиты с доверительными интервалами, установленными для горизонтальной плоскости (HAL). Доверительный интервал образуют границы «круга безопасности» - области пространства, в пределах которой должен фактически находиться пользователь, чтобы не нарушить ТНХ. Если уровнем

защиты выходит за пределы доверительного интервала, то формируется признак недоступности ТНХ в текущий момент времени [5].

Алгоритм оценки доступности ТНХ имеет следующий вид [6,7]:

$$\begin{aligned} HPL &= K_H \cdot d_{major} \\ d_{major} &= \sqrt{\frac{d_X^2 + d_Y^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{d_X^2 - d_Y^2}{2}\right)^2 + d_{XY}^2}}; \\ d_X^2 &= \sum_{i=1}^N s_{X,i}^2 \cdot \sigma_i^2; \quad d_Y^2 = \sum_{i=1}^N s_{Y,i}^2 \cdot \sigma_i^2; \\ d_{XY} &= \sum_{i=1}^N s_{X,i} \cdot s_{Y,i} \cdot \sigma_i^2; \\ \mathbf{S} &= \begin{vmatrix} S_{X,1} & S_{X,2} & \dots & S_{X,N} \\ S_{Y,1} & S_{Y,2} & \dots & S_{Y,N} \\ S_{V,1} & S_{V,2} & \dots & S_{V,N} \\ S_{t,1} & S_{t,2} & \dots & S_{t,N} \end{vmatrix} = (\mathbf{G}^T \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{G})^{-1} \cdot \mathbf{G}^T \cdot \mathbf{W}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $K_H = 6.0$ – коэффициент уровня защиты HPL; G – текущая геометрическая матрица направляющих косинусов "спутники-пользователь"; W – диагональная матрица дисперсии дальномерных погрешностей; σ_i – среднеквадратическое отклонение измеренных ионосферных дальномерных погрешностей для i -го спутника.

Рассмотрим метод контроля доступности ТНХ на плоскости при использовании ЛДС с прямой дифференциальной коррекцией координат. Мерой оценки точности координатных определений подвижного состава (ПС) является текущая абсолютная погрешность определения его пространственных координат в топоцентрической системе координат:

$$\Delta x_i = x_0 - x_i; \quad \Delta y_i = y_0 - y_i, \quad (2)$$

где: x_0, y_0 – истинные, а x_i, y_i – вычисленные в i -ый момент времени координаты ККС.

Для оценки непрерывности обслуживания пользователя ГЛОНАСС/GPS целесообразно ввести понятие сбой определения координат, которое заключается в выполнении условия:

$$(|\Delta x_i| > \Pi_{\Delta x}) \vee (|\Delta y_i| > \Pi_{\Delta y}) \quad (3)$$

где: $\Pi_{\Delta x}$, $\Pi_{\Delta y}$ – соответствующие пороговые значения погрешностей определения топоцентрических координат пользователя (2), которые называются границами круга безопасности.

Доступность ТНХ определяется с точки зрения полной вероятности доступности ТНХ в зоне покрытия ЛДС следующим образом:

$$W = P(C|A, B) \cdot W_{HDOP} \quad (4)$$

где А-событие, при котором оборудование ГЛОНАСС/GPS и ЛДС находится в рабочем состоянии;

В-событие, при котором навигационное оборудование локомотива исправно;

С-событие, при котором точность позиционирования соответствует ТНХ на этапе интервального регулирования движения поездов;

W_{HDOP} – индекс предупреждающий об опасном уровне ожидаемой погрешности позиционирования, как результат внезапного ухудшения геометрического фактора (HDOP).

Первый сомножитель в формуле (4) – $P(C|A, B)$ представляет собой условную вероятность нахождения ПС в круге безопасности, который определяется следующим образом [8]:

$$P(C|A, B) = P_{ТХ} \cdot P_{ТУ} \quad (5)$$

Вероятности выдерживания заданных норм точности позиционирования по продольной и боковой осям равны:

$$P_{TX} \{ \alpha < \Delta x_i < \beta \} = 0.5 \left[\Phi \left(\frac{\beta - M(\Delta x_i)}{\sigma_x} \right) - \Phi \left(\frac{\alpha - M(\Delta x_i)}{\sigma_x} \right) \right], \quad (6)$$
$$P_{TY} \{ \alpha < \Delta y_i < \beta \} = 0.5 \left[\Phi \left(\frac{\beta - M(\Delta y_i)}{\sigma_y} \right) - \Phi \left(\frac{\alpha - M(\Delta y_i)}{\sigma_y} \right) \right]$$

где: $\Phi(\dots)$ - функция Лапласа [9]; $M(\Delta x)$, $M(\Delta y)$, σ_x , σ_y , – математическое ожидание и СКО погрешностей определения пространственных координат ПС; α и β - допустимые минимальные и максимальные границы изменения погрешности определения координат по продольной и боковой осям.

Текущий индекс тревоги W_{HDOP} для железной дороги должен быть принят для оценки ожидаемой опасной погрешности только на плоскости в следующем виде:

$$W_{PDOP} = \begin{cases} 1, & (HDOP \leq \Pi_{HDOP}) \\ 0, & (HDOP > \Pi_{HDOP}) \end{cases}, \quad (7)$$

где Π_{HDOP} – пороговые значения погрешности геометрического фактора.

Апробация методов контроля доступности ТНХ для систем ИРДП

Анализ работы методов контроля доступности ТНХ проводился для случая автономной навигации без дифференциальной коррекции во время геомагнитной бури 22-23 июня 2015. Для проведения исследований мы использовали архивы данных RINEX 2.0 с 30-ти секундным временным разрешением регистрации дальномерных измерений. Каждый файл данных содержит суточные измерения всех видимых спутников GPS на одной из стационарных станций, расположенных в Канаде [10].

Расчет горизонтального уровня защиты (1) и вероятности доступности ТНХ (4) для стационарных станций выполнялся с использованием смоделированных дальномерных измерений и с учетом реальной

наблюдаемой геометрии спутников в программном комплексе MathLAB. Пороговые значения погрешностей определения топоцентрических координат пользователя для эксперимента были равны 5 м. На рисунках представлены расчеты для одной стационарной станции на интервале времени от 6.6 до 10 UT (Universal Time). Геометрический фактор на данном интервале времени не превышал порогового значения, равного 2.

На рисунке 2 представлено значение горизонтальной погрешности координаты станции, рассчитанное по формуле:

$$S_{xy} = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} \quad (8)$$

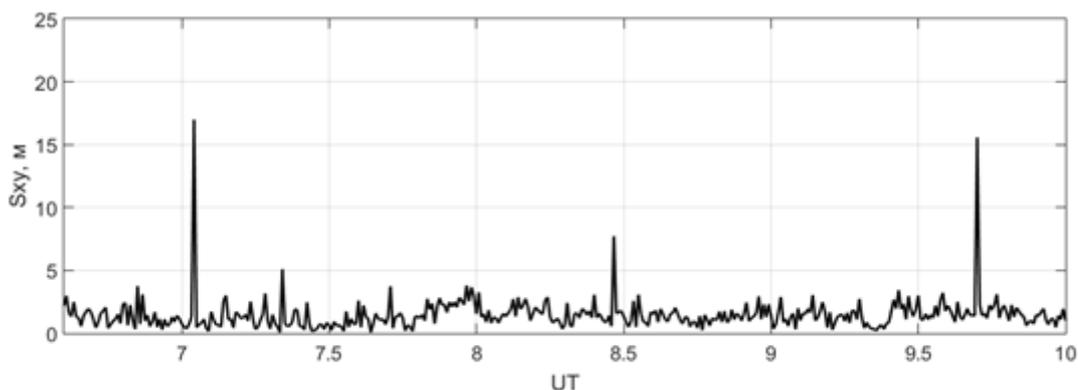


Рис. 2. – Величина горизонтальной погрешности координаты станции

На рисунке 3 представлено значение рассчитанного уровня защиты HPL, рассчитанное по значениям дальномерной погрешности.

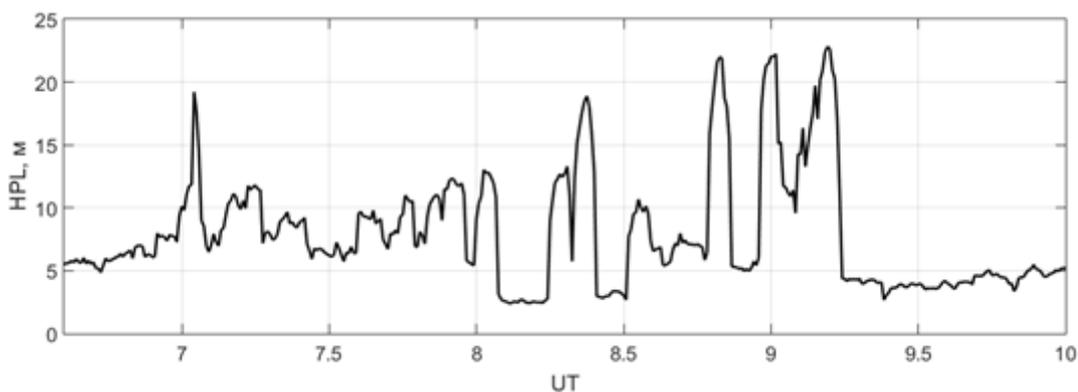


Рис. 3. – Величина уровня защиты HPL [10]

На рисунке 4 представлено значение вероятности доступности ТНХ, рассчитанное по значениям погрешностей координат.

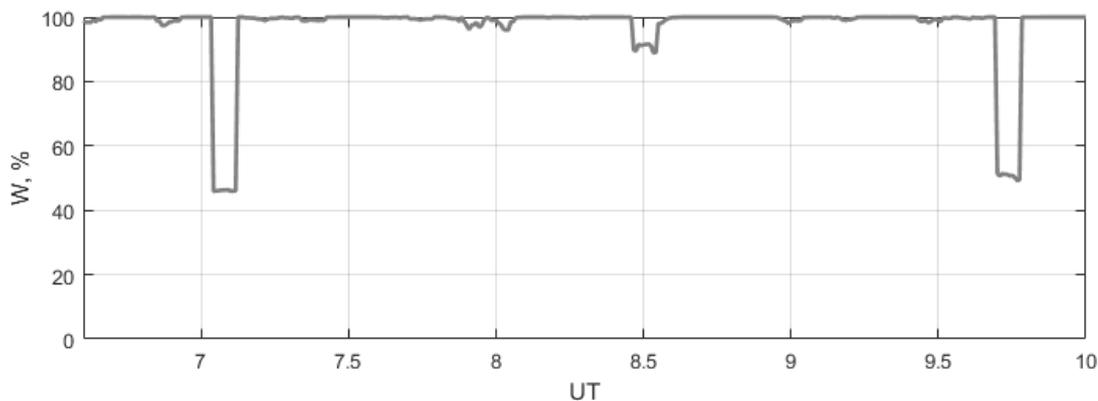


Рис. 4. – Величина полной вероятности доступности ТНХ

По полученным результатам можем сделать следующие выводы об эффективности работы методов:

1. Метод контроля доступности ТНХ на плоскости при использовании ЛДС с коррекцией псевдодальностей.

А) уровень защиты HPL указывает на недоступность системы для использования ($HPL > 5\text{м}$), при этом при этом величина горизонтальной погрешности координаты станции действительно большая. Подобный случай мы наблюдаем на рисунках 2-3 на интервале времени от 7 до 7.5 UT.

Б) уровень защиты HPL указывает на недоступность системы для использования ($HPL > 5\text{м}$), при этом при этом величина горизонтальной погрешности координаты менее 5 м (ложная недоступность системы). Подобный случай мы наблюдаем на рисунках 2-3 на интервале времени от 8.5 до 9.5 UT.

В) уровень защиты HPL указывает на доступность системы для использования ($HPL < 5\text{м}$), при этом величина горизонтальной погрешности координаты больше 5 м. (ложная доступность системы). Подобный случай мы наблюдаем на рисунках 2-3 на интервале времени от 9.5 до 10 UT.

2. Метод контроля доступности ТНХ на плоскости при использовании ЛДС с прямой дифференциальной коррекцией координат.

А) Вероятность доступности ТНХ указывает на то, что систему нельзя использовать ($W < 90\%$), при этом величина горизонтальной погрешности координаты больше 5 м. Подобный случай мы наблюдаем на рисунках 2 и 4 на интервалах времени 7 - 7.5, 8 - 8.5 и 9.5 - 10 УТ.

Таким образом, делаем вывод, что более стабильным и надежным является метод контроля доступности ТНХ на плоскости при использовании ЛДС с прямой дифференциальной коррекцией координат. В его работе не возникает случаев ложной доступности системы спутниковой навигации, что является недопустимым и ведет к нарушению требований безопасности движения поездов. Также в его работе отсутствуют случаи ложной недоступности системы спутниковой навигации.

Литература

1. Моисеенко В.В. Современные тенденции развития систем управления движением//«Автоматика, связь, информатика», 2018, №12, стр.36-38.
2. Гундаев И., Батраков А. Система управления движением локомотивов с использованием ГЛОНАСС / GPS // Современные технологии автоматизации. – 2012. – №3. – С. 40 – 44.
3. Базаржапов А.Д., Матвеев М.И., Мишин В.М. Геомагнитные вариации и бури. Новосибирск: Наука, 1979. 287 с.
4. Перов А.И., Харисов В.Н. // ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования. - Радиотехника, Москва, 2010 – 800 с.
5. Wide-area augmentation system performance analysis report, Report # 36. Reporting Period: January 1 to March 31, 2011. URL: nstrb.tc.faa.gov/DisplayArchive.htm
6. Xia L. Multipath in GPS navigation and positioning. GPS Solutions 8, 2004, с. 49–50.

7. Demyanov V., Zhang X., Lu X. Moderate geomagnetic storm condition, WAAS Alerts and real GPS positioning quality // Journal of Atmospheric Science Research. 2019. V. 2, N 1. С. 10-23.

8. Хиврич И.Г., Миронов Н.Ф., Белкин А.М. Воздушная навигация. М.: Транспорт. 1984. 327с;

9. Вентцель Е.С. «Теория вероятностей». 1969, "Наука", Москва. 580 с.

10. Халиманов Д.С., Демьянов В.В. Алгоритм контроля доступности навигационных определений ГНСС в составе координатной системы ИРДП // Молодая наука Сибири.-2020. - №2. URL: mnv.irgups.ru/toma/28-20.

References

1. Moiseenko V.V. Avtomatika, svyaz', informatika, 2018, №12, pp.36-38.

2. Gundaev I., Batrakov A. Sovremennye tekhnologii avtomatizacii. 2012. №3. pp. 40 – 44.

3. Bazarzhapov A.D., Matveev M.I., Mishin V.M. Geomagnitnye variacii i buri. [Geomagnetic variations and storm]. Novosibirsk: Nauka, 1979. 287 p.

4. Perov A.I., Harisova V.N. GLONASS: principy postroeniya i funkcionirovaniya. [GLONASS: principles of construction and operation] Radiotekhnika, Moskva, 2010. 800 p.

5. Wide-area augmentation system performance analysis report, Report # 36. Reporting Period: January 1 to March 31, 2011. URL: nstb.tc.faa.gov/DisplayArchive.htm.

6. Xia L. GPS Solutions 8, 2004, pp. 49–50.

7. Demyanov V., Zhang X., Lu X. Journal of Atmospheric Science Research. 2019. V. 2, N 1. pp. 10-23.

8. Hivrich I.G., Mironov N.F., Belkin A.M. Vozdushnaya navigaciya [Air navigation]. М.: Transport. 1984. 327 p.

9. Ventcel' E. S. Teoriya veroyatnostej [Probability theory], 1969, Nauka, Moskva. 580 p.



10. Khalimanov D.S., Dem'yanov V.V. Molodaya nauka Sibiri. 2020, № 2.
URL: mnv.ircups.ru/toma/28-20.