

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ И АЛГОРИТМОВ
ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НА ОШИБКИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ГНСС В
ГФО «МИХНЕВО»**

*М.Ю.Кузьмичева, И.А.Ряховский,
Ю.В. Поклад, Б.Г.Гаврилов,
А.Н.Ляхов*

Принципы спутниковой навигации

$$P^j = \rho^j + c(dt - dt^j) + \delta^j$$

$$\rho^j = \sqrt{(x - x^j)^2 + (y - y^j)^2 + (z - z^j)^2}$$

$$P^j + cdt^j - \delta^j = \sqrt{(x - x^j)^2 + (y - y^j)^2 + (z - z^j)^2} + cdt$$

P^j - псевдорасстояние для приемника и j-того спутника,

δ^j - ошибка, вызванная прохождением сигнала.

Предполагается, что приемник находится в точке с координатами (x_0, y_0, z_0)

Проводится линеаризация :

$$\rho^j = \rho_0^j + \frac{(x_0 - x^j)}{\rho_0^j} dx + \frac{(y_0 - y^j)}{\rho_0^j} dy + \frac{(z_0 - z^j)}{\rho_0^j} dz$$

$$\rho_0^j = \sqrt{(x_0 - x^j)^2 + (y_0 - y^j)^2 + (z_0 - z^j)^2}$$

$$dx = x - x_0; \quad dy = y - y_0; \quad dz = z - z_0$$

$$P^j - \rho_0^j + cdt^j - \delta^j = \frac{(x_0 - x^j)}{\rho_0^j} dx + \frac{(y_0 - y^j)}{\rho_0^j} dy + \frac{(z_0 - z^j)}{\rho_0^j} dz + cdt$$

$$j = 1 \div 4$$

Влияние ионосферной задержки

В исходных данных варьировалось псевдорасстояние и/или ионосферная задержка

1: если в уравнениях учитывается ионосферная задержка, рассчитываемая в программе

по модели Клобучара, то навигационная ошибка равна:

$$dx=-0.77, dy=-5.6, dz=-30.3.$$

2: если ионосферная задержка приравнена к нулю, то навигационная ошибка равна: $dx=-2.1, dy=-6.5, dz=-32.1$.

Учет ионосферной задержки по модели Клобучара, реализованной в программе, улучшает навигационную точность.

а) Псевдорасстояние для спутника 1 было увеличено на 30 м, ионосферная задержка приравнена к нулю, $dx=-33.5, dy=-35.1, dz=-5.67$.

б) Псевдорасстояние для спутника 1 было увеличено на 30 м, ионосферная задержка тоже равна 30 м, $dx=-2.1, dy=-6.5, dz=-32.1$. Компенсация!

в) Если псевдорасстояния увеличены на 30 м для всех четырех спутников, ионосферная задержка приравнена к нулю, $dx=-2.1, dy=-6.5, dz=-32.1$. Такая же, как в варианте б)!

д) псевдорасстояние для спутника 2 было увеличено на 30 м, ионизационная задержка приравнена к нулю, $dx=-8.4$, $dy=-30.6$, $dz=32.8$.

е) похожие результаты были получены и для третьего, и для четвертого спутников и если увеличивать псевдорасстояние одновременно для двух спутников созвездия (набора спутников).

ж) чтобы проверить, зависят ли заключения от того, какие спутники находятся в созвездии, такие же расчеты были проведены для созвездия спутников, где спутник G21 был заменен на G18. Были получены сходные результаты.

По результатам моделирования можно заключить, что:

- 1) если псевдорасстояние испытывает скачок в результате помехи, но это можно учесть за счет ионосферной задержки, то навигационная ошибка не увеличивается;
- 2) если скачок испытывают псевдорасстояния всего созвездия, то навигационная ошибка не увеличивается;
- 3) если скачок в десятки метров испытывают псевдорасстояния одного или двух спутников и нет возможности определить ионосферную задержку, то навигационная ошибка увеличивается до десятков метров.

з) были рассчитаны собственные числа системы, отношение максимального к минимальному лежат в диапазоне 100 – 300.

Влияние геометрического положения спутников.

Для созвездия из восьми спутников, для которых имелись наблюдательные данные, составлялись комбинации по 4 спутника, для каждой из комбинаций рассчитывалась навигационная ошибка и собственные числа системы уравнений. По результатам определялись наихудшая и наилучшая комбинации (по ошибке по трем декартовым координатам). Были использованы файлы передатчика sigma за 2017 год, однако в них поправка ионосферной коррекции для GPS спутников не записывалась, соответственно, она не учитывалась в расчетах.

Наихудшая комбинация: $dx=-9987.4$, $dy=-12624.5$, $dz=-26225.8$, отношение собственных чисел: $5.15/6.7 \cdot 10^{-8}$

Наилучшая комбинация- навигационная ошибка составляла: $dx=0.13$, $dy=1.5$, $dz=-9.7$. Отношение максимального собственного числа в задаче к минимальному примерно было равно 10^3 .

В наилучшей комбинации один из спутников был с малым возвышением над горизонтом ($z-z_0$). В рассматриваемом созвездии был спутник, находящийся в том же направлении, но выше над горизонтом. Замена низко висящего спутника на более высоко висящий (что должно было, предположительно, уменьшить ионосферную помеху) не улучшила навигационную ошибку: $dx=-3.6$, $dy=-10.3$, $dz=52.4$.

Плохая обусловленность системы является показателем большой навигационной ошибки.

Влияние числа учитываемых спутников

Тривиальная попытка повысить точность путем увеличения числа спутников не позволила достичь положительного результата.

Наилучшая комбинация 4 спутников- навигационная ошибка равна: $dx=8.9$, $dy=1.35$, $dz=-1.4$

Учитываются данные 7 спутников: $dx=-8.1$, $dy=-11.1$, $dz=-9.9$

Учитываются данные 6 спутников- навигационная ошибка равна: $dx=15.6$, $dy=13.5$, $dz=1.25$.

Определение навигационной ошибки с помощью фильтра Калмана.

В штатных алгоритмах определения координат для переопределенной системы линейных уравнений (системы наблюдений) $Y = A \cdot X$ решение находится методом наименьших квадратов по формуле:

$$\hat{X} = (A^t \cdot A)^{-1} A^t \cdot Y$$

Использование фильтра Калмана для решения задачи спутниковой навигации предполагает использование итерационной процедуры. Применение фильтра Калмана возможно как в кинематическом, так и в статическом вариантах. В последнем случае на решение накладываются дополнительные условия связи: скорость равна нулю, вариация координат минимизируется.

Рассмотрим как меняется точность позиционирования при смене алгоритмов расчета координат. На рисунках 1-3 представлены результаты определения координат в стандартном двухчастотном режиме, с использованием фильтра Калмана в кинематическом режиме и в статическом режиме. Условия наблюдений – мощнейшая рентгеновская вспышка на Солнце класса X9, начавшаяся в 12.00 UT. Стандартный алгоритм, теоретически исключая влияние ионосферы, дал ошибку в 10-20 метров в направлении север-юг и по вертикали. В кинематическом режиме ошибка упала в 3 – 5 раз, а в статическом – на два порядка.

Рисунок 1 – ошибка позиционирования приемника Javad Prego во время солнечной рентгеновской вспышки

06.09.2017 класса X9. Двухчастотный режим, штатный алгоритм определения координат.

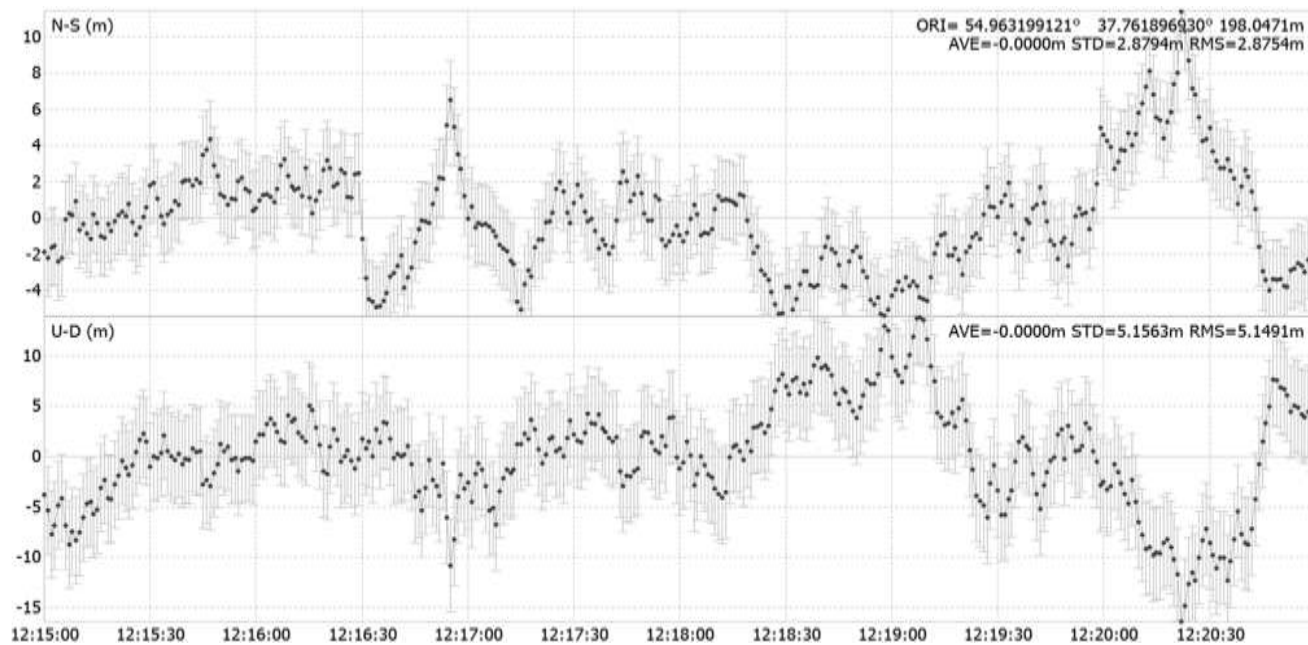


Рисунок 2. Результаты расчетов по фильтру Калмана в кинематическом режиме.

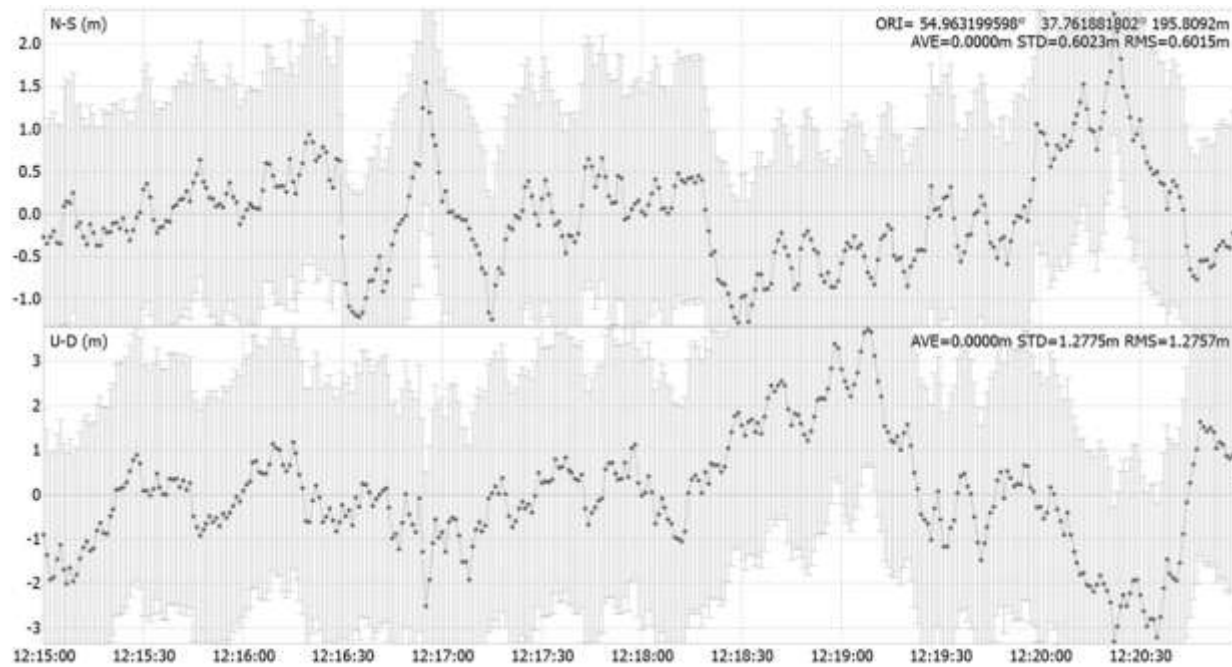
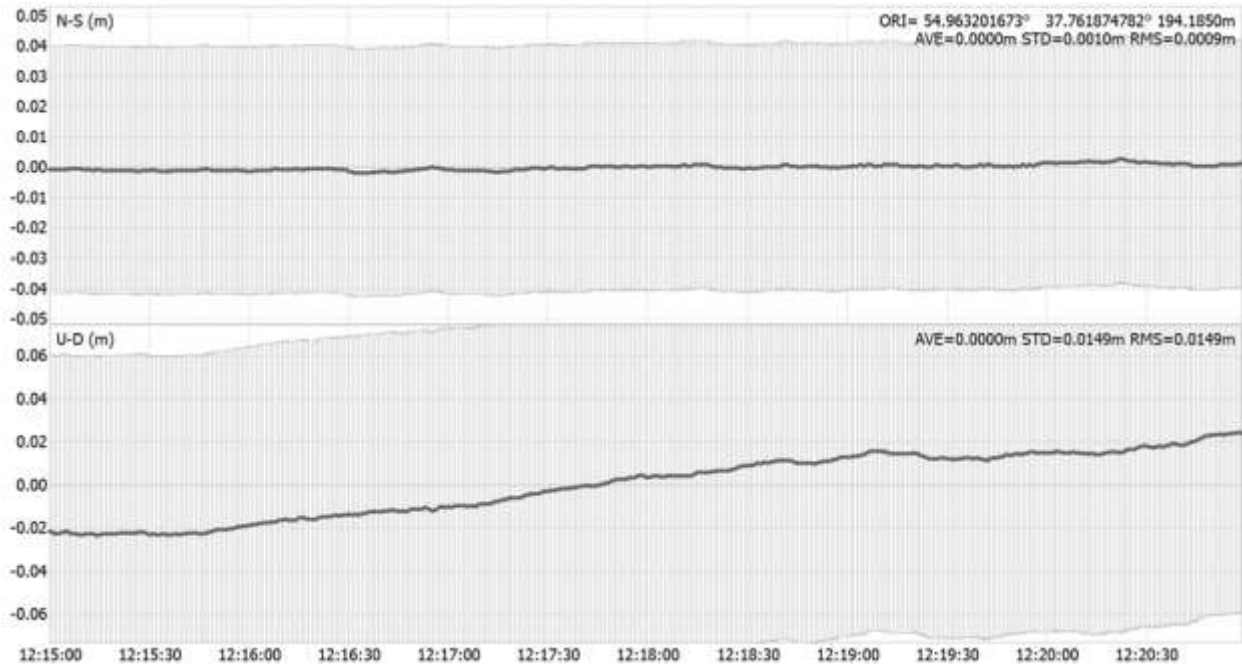


Рисунок 3. Результаты расчетов по фильтру Калмана в статическом режиме.



Выводы.

Существующие штатные алгоритмы обработки данных в системе спутниковой навигации позволяют надежно определять положение приемника даже в условиях сложной геомагнитной обстановки.

Исследования с помощью известных алгоритмов для спутниковой навигации позволяет выявить ситуации, способные повлиять на качество навигации.