УДК 681.3.06

Д. Ю. Першин

Институт систем информатики им. А. П. Ершова СО РАН,
пр. Акад. Лаврентьева, 6, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: dyp@perchine.com

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ТРОПОСФЕРНОЙ ЗАДЕРЖКИ В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ВЫСОКОЙ ТОЧНОСТИ В СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ГЛОНАСС/GPS

В связи с массовым и разнообразным применением спутниковой навигации растут требования к ее точности. В последнее время идет активная работа по развитию методов определения местоположения высокой точности. Тропосферная задержка является одним из серьезных факторов в ошибке определения местоположения. В статье производится сравнительный анализ моделей тропосферной задержки в аспекте их эффективности для компенсации тропосферной задержки в задаче автономного определения местоположения высокой точности. Рассматриваются следующие модели тропосферной задержки радиосигналов: модель Блэка, модель Гоада – Гудмана, модель Гоада – Гудмана с дополнительным учетом высоты от геоида, модель университета Нью Брусвика, модель Саастамойнена, модель GCAT, модель MOPS, модель Нейлла.

Ключевые слова: СНС, ГЛОНАСС, тропосферная задержка, определение местоположения.

Введение

В настоящее время широкое распространение получили системы космической навигации (GNSS – Global Navigation Satellite System). В 1993 г. начала работу система космической навигации GPS, разработанная ВВС США. В 1995 г. начала работу система космической навигации ГЛОНАСС, разработанная Космическими Войсками России. Системы космической навигации основаны на измерении радиодальнометрическим способом расстояния от потребителя [1] до космического аппарата (КА), движущегося по заданной орбите. Координаты потребителя находятся методом триангуляции по расстояниям до трех разных КА.

Существуют два метода определения координат потребителя: автономный и дифференциальный. Автономный метод использует данные, полученные со спутников для определения координат. Для дифференциального метода требуется наличие двух приемников: базового приемника, находящегося в позиции с известными координатами, и приемника пользователя, координаты которого определяются.

Известно, что точность автономного метода составляет ок. 15 м и недостаточна для геодезических измерений. Поэтому в геодезии и картографии использовался только дифференциальный метод. Дифференциальный метод имеет серьезный недостаток – требуется базовая станция с известными координатами и дополнительный приемник, работающий на ней. При увеличении расстояния от базовой станции до приемника потребителя ухудшается точность. Использование данных базовой станции, находящейся на расстоянии более чем 400 км от одночастотного приемника потребителя, уже не дает повышения точности.

Погрешности определения координат потребителя складываются из следующих составных погрешностей: погрешность часов КА, задержка передающего тракта КА (задержка в антенне, кабелях, фильтрах и т. д.), погрешность определения координат КА, ионосферная задержка, тропосферная задержка, задержка приемного тракта приемника.

В последние годы в результате активной работы международной организации IGS (International GNSS Service) [Dow, Neilan, Gendt, 2005] стало возможным значительное уменьшение величины погрешностей часов КА и погрешностей определения координат КА. Как следствие развития микроэлектронной промышленности существенно уменьшились задержки в передающем тракте КА и в приемном тракте пользовательских приемников. Благодаря этим достижениям стало возможным определение координат автономным методом с

[1] Потребитель – любой объект, пытающийся определить свои координаты с использованием сигналов со спутников системы космической навигации.

© Д. Ю. Першин, 2009

высокой точностью. Автономный метод определения координат потребителя высокой точности имеет неоспоримые преимущества для потребителей, которым не требуется миллиметровая точность измерения. Он не требует базовой станции и может быть реализован как в режиме реального времени, так и в режиме последующей обработки.

При использовании двухчастотных приемников возможно практически полное устранение ионосферной задержки, так как ионосферная задержка имеет зависимость от длины волны. При наличии измерений дальности для двух частот можно построить такую их комбинацию, в которой нет ионосферной задержки. Таким образом, остается определить величину тропосферной задержки.

В данной работе производится сравнительный анализ моделей определения величины тропосферной задержки радиосигналов по точности определения местоположения автономным методом с высокой точностью [Witchayangkoon, 2000]. Рассматриваются следующие модели тропосферной задержки радиосигналов: модель Блэка, модель университета Нью Брусвика, модель Саастамойнена, модель GCAT, модель MOPS, модель Нейлла.

Модели тропосферной задержки

Общие определения. Нейтральная атмосфера представляет собой почти сферическую оболочку, доходящую до 100 км над уровнем Земли. Нижняя часть нейтральной атмосферы, достигающая примерно 50 км над уровнем Земли, содержит 99,9 % всей атмосферной массы [Kertz, 1971]. Она состоит из тропосферы (0–10 км), в которой температура падает с увеличением высоты, тропопаузы (10 км), где температура не изменяется, и стратосферы (10–50 км), где температура повышается с увеличением высоты.

Задержку радиосигнала при прохождении нейтральной атмосферы принято называть тропосферной задержкой, так как на тропосферу приходится 80 % общей задержки. Следовательно, когда мы говорим о тропосфере применимо к моделям тропосферной задержки, имеется в виду нижние 50 км нейтральной атмосферы.

Нейтральная атмосфера разделяется на две составляющие: сухую и влажную составляющие тропосферы. Сухая составляющая тропосферы состоит в основном из сухих газов. Влажная составляющая тропосферы является результатом испарения воды. Тропосфера является причиной задержки радиоволн. Величина тропосферной задержки не зависит от частоты радиоволн. Поэтому невозможно измерить величину тропосферной задержки за счет сравнения радиосигналов, переданных на двух разных частотах, как это возможно для ионосферной задержки.

В дальнейших описаниях будут использованы следующие обозначения:

T_s – температура в районе приемника в градусах Кельвина;

P_s – атмосферное давление в районе приемника в миллибарах;

a – большая полуось модели геоида (геоид – это эквипотенциальная поверхность гравитационного поля Земли, приблизительно совпадающая со средним уровнем вод мирового океана в невозмущённом состоянии и условно продолженная под материками);

h_s – высота приемника над геоидом;

h_d – высота сухой тропосферы над геоидом;

h_w – высота влажной тропосферы над геоидом;

H_s – влажность в районе приемника;

e_s – частичное давление водяного пара в атмосфере на поверхности геоида в миллибарах;

φ – широта приемника в градусах;

E – возвышение спутника в радианах.

Задержка, возникающая при прохождении сигнала в сухой части тропосферы (D_d, сухая задержка) может быть определена с высокой точностью, так как сухая часть тропосферы находится в гидростатическом равновесии и к ней может быть применен закон для идеальных газов. Сначала вычисляется сухая задержка в зените (D_d^z), а затем уже сухая задержка для соответствующего возвышения спутника. Обычно используются так называемая функция учета возвышения (m_d). Задержка может при этом увеличиваться до 5 раз.

Задержка, вызванная влажной частью тропосферы (D_w, влажная задержка), гораздо сложнее в моделировании, хотя на нее и приходится всего 10 % общей задержки. В тропосфере массы воды и водяного пара распределены очень нерегулярно, и все время находятся в движении. Также как и для сухой задержки, влажная задержка сначала вычисляется в зените (D_w^z), а затем при помощи функции учета возвышения (m_w) вычисляется общая влажная задержка. В результате тропосферная задержка D находится следующим образом:

$$D = D_d^z \cdot m_d(E) + D_w^z \cdot m_w .$$

В 70-е гг. были разработаны две базовые модели тропосферной задержки, на которых базируются все использующиеся на данный момент модели. Это модель Хопфилд и модель Саастамойнена.

Модель Хопфилд. Модель Хопфилд [Hopfield, 1969] основана на большом количестве измерений, проведенных с метеозондов в различных местах в течение нескольких лет. Хелен Хопфилд создавала модель на основе предположения о том, что температура изменяется в зависимости от высоты с константной скоростью 0,0062 К/м. Это привело к выражению сухой и влажной части тропосферной задержки через полином четвертой степени. В общем виде сухая и влажная тропосферная задержка в зените в модели Хопфилд может быть записана следующим образом:

а) сухая тропосферная задержка в зените

$$D_d^z = 10^{-6} \cdot k_1 \cdot \frac{P_s}{T_s} \cdot \int_{h_s}^{h_d} \left[\frac{h_d - h}{h_d - h_s} \right]^4 \cdot dh = 10^{-6} \cdot k_1 \cdot \frac{P_s}{T_s} \cdot \frac{h_d - h}{5},$$

$$h_d - h_s = 148{,}98 \cdot (T_s - 4{,}12);$$

б) влажная тропосферная задержка в зените

$$D_w^z = 10^{-6} \cdot (k_3 + 273(k_2 - k_1)) \frac{e_s}{T_s} \cdot \int_{h_s}^{h_w} \left[\frac{h_w - h}{h_w - h_s} \right]^4 \cdot dh = 10^{-6} \cdot (k_3 + 273(k_2 - k_1)) \frac{e_s}{T_s} \cdot \frac{h_w - h}{5},$$

$$h_w - h_s = 11 \text{ км},$$

где k_1, k_2, k_3 – константы, которые определяются эмпирическим путем.

Модель Саастамойнена. Саастамойнен [Saastamoinen, 1971] предположил, что нет необходимости иметь детальное представление о распределении по высоте, чтобы вычислить интеграл задержки. Это упрощает получение формулы задержки и, как не парадоксально, увеличивает точность такой формулы, так как высота прямо пропорциональна давлению в сухой атмосфере.

Саастамойнен вывел модель исходя из следующих предположений:

- водяной пар ведет себя как идеальный газ;
- весь водяной пар в атмосфере находится в тропосфере;
- давление водяного пара может быть выражено как

$$e = e_s \left(\frac{T}{T_s} \right)^{\frac{4gM_d}{Ra}};$$

- температура уменьшается линейно с увеличением высоты

$$T = T_s - a(h - h_s),$$

где T – это температура на высоте h над геоидом (K), и a – это скорость изменения температуры, которая задается как $a = -dT / dh$ (К/м);

- гравитация на пути следования радиосигнала константна.

Таким образом, модель тропосферной задержки Саастамойнена выглядит следующим образом:

а) сухая тропосферная задержка в зените

$$D_d^z = 0,002277 \cdot P_s \cdot (1 - 0,0026\cos 2\varphi + 2,8 \cdot 10^{-7} \cdot h_s);$$

б) влажная тропосферная задержка в зените

$$D_w^z = 0,02277\left(0,5 + \frac{1255}{T_s}\right)e_s;$$

в) функция учета возвышения для сухой задержки

Вначале вычисляются коэффициенты A_w, B_w и C_w на основе табличных значений, представляющие собой средние значения коэффициентов для различных широт и дней в году. Затем на основе полученных коэффициентов вычисляется значение функции

$$m_d = \frac{1 + \dfrac{A_w}{1 + \dfrac{B_w}{1 + C_w}}}{\cos E + \dfrac{A_w}{\dfrac{\cos E + B_w}{\cos E + C_w}}};$$

г) функция учета возвышения для влажной задержки

Функция вычисляется по той же формуле, что и функция учета возвышения для сухой задержки, но для расчета коэффициентов используются другие табличные данные.

Модель Блэка. Модель Блэка [Black, 1978] является усовершенствованием и упрощением модели Хопфилд:

а) сухая тропосферная задержка в зените

$$D_d^z = 2,343 \cdot \frac{P_s}{1013,25} \cdot \frac{T_s - 3,96}{T_s};$$

б) влажная тропосферная задержка в зените

$$D_w^z = \frac{8,952}{T_s^2} \cdot H_s \cdot e^{-37,2465 + 0,256908 \cdot 10^{-3} \cdot T_s^2};$$

в) функция учета возвышения для сухой задержки

$$m_d = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\dfrac{\cos E}{1 + 0,15\dfrac{12\,000}{a}}\right)^2}};$$

г) функция учета возвышения для влажной задержки

$$m_w = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\dfrac{\cos E}{1 + 0,15\dfrac{148,98(T_s - 3,96)}{a}}\right)^2}}.$$

Модель Университета Нью Брусвика. Модель была разработана в Университете Нью Брусвика [Collins, Langley, 1997] и предназначена для использования в системе GPS WAAS. Модель не требует метеорологических данных.

Для учета сухой и влажной задержки в зените используются формулы, аналогичные используемым в модели Хопфилд, но значения температуры, давления и влажности получаются при помощи интерполяции средних значений для широты и дня года.

Для учета возвышения для сухой задержки используется функция, аналогичная функции, используемой в модели Саастамойнена с добавкой:

$$m_d = \frac{1+\dfrac{A_w}{1+\dfrac{B_w}{1+C_w}}}{\cos E + \dfrac{A_w}{\dfrac{\cos E + B_w}{\cos E + C_w}}} + \frac{1+\dfrac{2,53\cdot 10^{-5}}{1+\dfrac{5,49\cdot 10^{-3}}{1+1,14\cdot 10^{-3}}}}{\cos E + \dfrac{2,53\cdot 10^{-5}}{\dfrac{\cos E + 5,49\cdot 10^{-3}}{\cos E + 1,14\cdot 10^{-3}_{w}}}} \frac{h_s}{1000}.$$

Для учета возвышения для влажной задержки используется функция, аналогичная функции, используемой в модели Саастамойнена.

Модель GCAT. Модель GCAT была реализована в программном продукте GCAT (GPS Code Analysis Tool), разработанном исследовательской группой астрономии и космической геодезии Политехнического университета Каталонии [Hernбndez-Pajares, Juan, Sanz, 2005]:

а) сухая тропосферная задержка в зените $D_d^z = 2,3e^{-0,116\cdot 10^{-3}\cdot h_s}$;

б) влажная тропосферная задержка в зените принимается равной константе 0,1;

в) для учета возвышения для сухой и влажной задержки используется одинаковая функция, предложенная в 1984 г. Блэком и Айзнером [Black, Eisner, 1984]

$$m(E) = \frac{1,001}{\sqrt{0,002001 + \sin^2(E)}}.$$

Модель MOPS. Данная модель была разработана EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) для использования в системе коррекции GPS SBAS (Satellite Based Augmentation System) на территорию Европы. Она не использует наземных метеорологических данных. Вместо них в модель введены средние значения метеорологических данных и скорости изменения температуры атмосферы для различных широтных поясов с шагом 15 градусов и порядкового дня в году. В результате по таблицам вычисляются следующие константы: P, T, e, β, λ:

а) сухая тропосферная задержка в зените

$$D_d^z = 10^{-6}\cdot 77,604\cdot 287,054\cdot P\cdot\left(1-\beta\frac{h_s}{T}\right)^{\frac{\frac{9,80665}{287,054}}{\beta}};$$

б) влажная тропосферная задержка в зените

$$D_w^z = \frac{10^{-6}\cdot 77,604\cdot 287,054}{\dfrac{(9,784\cdot(\lambda+1)-\beta\cdot 287,054)\cdot e}{T}}\left(1-\beta\frac{h_s}{T}\right)^{\frac{(\lambda+1)\left(\frac{9,80665}{287,054}\right)}{\beta}-1};$$

в) для учета возвышения для сухой и влажной задержки используется функция, используемая в модели GCAT.

Модель Нейлла. Модель Нейлла [Neill, 1996] дает возможность вычислить параметры тропосферной задержки без использования наземных метеорологических данных. Это позволяет использовать данную модель в автономных приемниках без необходимости использования специального оборудования или поддержания связи с ближайшей метеорологической станцией. Модель определена для углов видимости спутника вплоть до 3 градусов:

а) сухая тропосферная задержка в зените $D_d^z = 1,013^{2,27}\cdot e^{-0,116\cdot 10^{-3}\cdot h_s}$;

б) влажная тропосферная задержка в зените принимается равной константе 0,1;

в) функции учета возвышения для сухой и влажной задержки заимствованы из модели Саастамойнена.

Методика эксперимента

Для эксперимента используются опорные базовые станции ITRF (International Telestial Reference Frame) проекта IGS. Каждая базовая станция оборудована двухчастотным GPS/ГЛОНАСС приемником геодезического класса и ориентированной антенной с фазовым

центром. Координаты каждой базовой станции измеряются геодезическим способом с точностью не менее 1 мм не реже одного раза в 2 года.

Каждая базовая станция передает в центры сбора данных IGS круглосуточные измерения с GPS и ГЛОНАСС спутников с интервалом не менее 30 с, называемые наблюдениями. Для каждого видимого спутника измеряются следующие величины: псевдодальность на частоте L1, псевдодальность на частоте L2, сдвиг фазы на частоте L1, сдвиг фазы на частоте L2. Наблюдения публично доступны через FTP и HTTP сервера центров сбора данных.

В качестве исходных данных используются наблюдения базовых станций. В результате эксперимента вычисляются координаты фазового центра антенны базовой станции на основании наблюдений. Данная методика позволяет определить погрешность измерения с точностью 1 мм.

Результаты эксперимента

В качестве исходных данных были выбраны наблюдения за 224 день 2005 г., произведенные на станции ONSA, которая находится в Швеции и является опорной базовой станцией ITRF. Модель zero – это модель, в которой тропосферная задержка всегда 0. NB – модель университета Нью-Брусвика [2].

Для обработки исходных данных была создана программа на C++, базирующаяся на библиотеке GPSTk [2]. Библиотека GPSTk была изначально разработана Лабораторией космоса и геофизики, входящей в состав Лабораторий прикладных исследований техасского университета в Остине. Основной задачей библиотеки является предоставление ученым возможности сконцентрироваться на исследованиях в области космической навигации, не вдаваясь в подробности мириад алгоритмов, используемых в программах расчета положения пользователя.

Наблюдения за различный период времени обрабатывались при помощи автономного решателя высокой точности (PPP Solver – Precise Point Positioning Solver). Решатель предназначен для определения координат статического пользователя, координаты которого не изменяются во времени. Основным методом, используемым в решателе, является фильтр Кальмана, который оценивает величину ошибок по трем координатам от начальной позиции. Начальная позиция получается автономным методом Банкрофта [Yang Ming, Kuo-Hwa Chen, 2001]. Фильтр Кальмана имеет свойство увеличивать точность решения со временем, накапливая статистическую информацию, асимптотически приближаясь к некоторому пределу.

Выводы по результатам эксперимента

Из эксперимента можно сделать вывод, что моделирование тропосферной задержки является важным аспектом в решении задачи позиционирования высокой точности.

Величина ошибки (м) для различных моделей с различной продолжительностью исходных наблюдений

Период	0 с			1 мин			2 мин			10 мин			1 час			24 часа		
Модель	*dX*	*dY*	*dZ*	*dX*	*dY*	*dZ*	*dX*	*dY*	*dZ*	*dX*	*dY*	*dZ*	*dX*	*dY*	*dZ*	*dX*	*dY*	*dZ*
Neill	1,942	-0,061	2,280	1,305	0,001	2,970	0,983	-0,048	3,348	0,360	-0,608	1,567	-0,092	0,072	0,218	-0,009	0,001	0
zero	0,622	-0,019	7,707	-0,039	0,039	8,772	-0,285	-0,024	9,112	-0,214	-0,646	8,719	1,017	2,032	7,598	0,038	-0,108	8,591
GCAT	1,929	-0,060	2,368	1,293	0,001	3,055	0,977	-0,047	3,419	0,360	-0,605	1,636	-0,091	0,073	0,250	-0,009	0,010	0,028
MOPS	1,930	-0,060	2,366	1,294	0,001	3,054	0,977	-0,047	3,418	0,360	-0,605	1,636	-0,091	0,073	0,250	-0,009	0,010	0,028
Black	1,949	-0,061	2,274	1,308	0,001	2,981	0,982	-0,047	3,379	0,363	-0,604	1,624	-0,090	0,073	0,262	-0,009	0,009	0,047
GG	1,949	-0,061	2,265	1,308	0,001	2,970	0,983	-0,047	3,366	0,362	-0,605	1,606	-0,091	0,073	0,249	-0,009	0,010	0,034
GGH	1,949	-0,061	2,264	1,309	0,001	2,968	0,983	-0,047	3,365	0,363	-0,605	1,605	-0,091	0,073	0,249	-0,009	0,009	0,034
Saas	1,942	-0,061	2,282	1,305	0,001	2,971	0,983	-0,048	3,349	0,360	-0,608	1,568	-0,092	0,072	0,219	-0,009	0,010	0,001
NB	1,942	-0,061	2,281	1,305	0,001	2,971	0,983	-0,048	3,348	0,360	-0,608	1,567	-0,092	0,072	0,218	-0,009	0,001	0

[2] См. подробнее: GPS Toolkit Official Website: http://www.gpstk.org.

Из таблицы хорошо видно, что если мы не учитываем тропосферную задержку, то даже через 24 ч точность по высоте составляет ок. 8,5 м. Также хорошо видно, что чем выше качество предсказания тропосферной задержки, тем меньше исходных наблюдений необходимо для достижения необходимой точности. Также стоит отметить, что только 2 модели позволяют за 24 ч получить сантиметровую точность – модель Нейлла и модель университета Нью-Брусвика. Но при этом модель Нейлла не требует метеорологических данных для расчетов.

По результатам экспериментов наиболее подходящей моделью тропосферной задержки для приемников пользователя, использующих автономный метод высокой точности, является модель Нейлла, так как она не требует метеорологических данных, при этом обеспечивает сравнимую, а то и превосходящую, точность, нежели модели, требующие таких данных.

Заключение

В данной работе были произведены сравнения различных моделей тропосферной задержки для приемников пользователя, использующих автономный метод определения координат высокой точности, В результате наилучшие результаты по точности и наименьшему времени получения высокоточного решения показала модель Нейлла.

В дальнейшем имеет смысл произвести исследования поведения и возможных улучшений автономного метода определения координат высокой точности с использованием одночастотных приемников. Использование одночастотного приемника усложняет задачу, так как необходимо учитывать ионосферную задержку, которая может быть компенсирована у двухчастотного приемника. Решение этой задачи позволит использовать дешевые одночастотные приемники для работы картографических полевых бригад в режиме автономных измерений, что значительно увеличит их производительность и автономность, так как не будет необходимости устанавливать базовую станцию. Это особенно актуально на данный момент времени, так как многие опорные геодезические пункты либо разрушены, либо не предназначены для космической геодезии (имеют металлические или железобетонные конструкции над точкой установки антенны или ограниченную видимость).

Список литературы

Black H. D., Eisner A. Correcting Satellite Doppler Data for Tropospheric Effects // Journal of Geophysical Research. 1984. Vol. 89.

Black H. D. An easily implemented algorithm for the tropospheric range correction // Journal of Geophysical Research. 1978. B4: Vol. 38. P. 1825–1828.

Collins P. J., Langley R. B. A Tropospheric Delay Model for the User of the Wide Area Augmentation System: Technical Report 187 / Dept. of Geodesy and Geomatics Engineering; University of New Brunswick. 1997.

Hernбndez-Pajares M., Juan J. M., Sanz J. GPS Data Processing. Barcelona, 2005.

Hopfield H. S. Two-Quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data // Journal of Geophysical Research. 1969. 18: Vol. 74. P. 4487–4499.

Dow J. M., Neilan R. E., Gendt G. The International GPS Service (IGS): Celebrating the 10th Anniversary and Looking to the Next Decade // Adv. Space Res. 2005. 3: Vol. 36. P. 320–326.

Kertz W. Einfьhrung in die Geophysik II. [Book]. Mannheim: Wissenschaftsverlag. 1971. Vol. 1.

Neill A. E. Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay of Radio Wavelengths // Journal of Geophysical Research. 1996. Vol. 101. P. 3227–3246.

Saastamoinen J. Int. Symp. on the Use of Artificial Satellite // Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellite. Washington, 1971. P. 247–251.

Witchayangkoon Boonsap Elements of GPS Precise Point Positioning. Bangkok, 2000.

Yang Ming and Kuo-Hwa Chen Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A) // Performance Assessment of a Noniterative Algorithm for Global Positioning System (GPS) Absolute Positioning. 2001. Vol. 25. P. 102–106.

Материал поступил в редколлегию 26.08.2008

D. Yu. Pershin

COMPARATIVE ANALYSIS OF TROPOSPHERIC DELAY MODELS IN PRECISE POINT POSITIONING IN SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS GLONASS / GPS

Due to massive usage of satellite navigation systems in the world precision requirements become more important. In the last year there is a big development of Precision Point Positioning (PPP) methods. Thropospheric delay is one of the biggest sources of errors in positioning solution. In article the quality of error prediction is analysed for tropospheric delay models in PPP. There are the following models analysed: Black, Goad-Gutman, Goad-Gutman with height, University of New Brunswick, Saastamoinen, GCAT, MOPS, Neill. The special interest for PPP is in GCAT, MOPS and Neill models as they do not require weather information.

Keywords: GNSS, PPP, tropospheric delay, GLONASS, GPS.