

# **АТМОСФЕРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СИГНАЛЫ ГНСС И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПЕРЕДАЧУ ВРЕМЕНИ**

Автор: Рене Варнант

Перевод: Гриценко А.А.

## **Аннотация**

В статье рассматривается влияние атмосферных, действующей на точные приложения для передачи времени, основанные на глобальных навигационных спутниковых системах (GNSS). Атмосфера Земли (ионосфера и тропосфера) индуцирует задержку распространения на сигналах, излучаемых GNSS. Тропосферная ошибка может быть удовлетворительной, но ионосфера остается важным источником ошибок. В статье рассматриваются основные нарушения ионосферы и, в частности, показано влияние солнечной активности на эти нарушения.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Атмосферная рефракция влияет на передачу времени с использованием сигналов GNSS. Этот эффект имеет два компонента: тропосферную ошибку, которая является эффектом нейтральной атмосферы и ионосферной ошибки, которая является эффектом ионизированной атмосферы. Тропосферную ошибку обычно удаляют с использованием классической тропосферной модели, такой как модель Хопфилда или модель Саастамойнен, которая может привести к остаточным ошибкам до 0,2 нс (в зените) из-за высокой изменчивости водяного пара в атмосфере. На практике остаточная ошибка незначительна для приложений передачи времени с использованием кодовых измерений. По этой причине мы фокусируем наше внимание на ионосферной ошибке. Один из способов учета этого эффекта заключается в формировании так называемой геометрической свободной комбинации кодовых измерений, выполненных на двух частотах, излучаемых GNSS, когда доступны двухчастотные приемники. Эта комбинация имеет преимущество для удаления ионосферного эффекта, но имеет неудобство для увеличения шума измерения, таким образом, который является значимым с точки зрения

точности передачи времени. Когда доступны только одночастотные измерения, ионосферный эффект обычно учитывается путем корректировки наблюдений ГНСС с помощью модели Клобучара. Кроме того, сравнение часов производится путем формирования различий между наблюдениями, собранными на соседних станциях; обычно бывает, что остаточная ионосферная ошибка, остающаяся в различиях, пренебрежимо мала. Цель статьи - продемонстрировать, что это допущение недействительно в нарушенных ионосферных условиях, которые часто наблюдаются в периоды высокой солнечной активности. Анализ основан на исследовании полного электронного содержания ионосферы (ТЕС), выполненного в Королевской обсерватории Бельгии, с использованием 9 лет наблюдений, почти одного солнечного цикла активности.

#### ИОНОСФЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Спутники GPS излучают две несущие частоты, L1 (1575,42 МГц) и L2 (1227,6 МГц), модулированные двумя кодами, называемыми кодом C / A и P-кодом. Оба типа сигналов преломляются при пересечении ионосферы: коды проходят удлинение пути, I и носители, сокращение пути, -I. Пренебрегая членами более высокого порядка в частоте сигнала  $f$ , ионосферная ошибка I, выраженная в метрах, определяется:

$$I = \frac{40.3}{f^2} \text{TEC}$$

Полное электронное содержание (ТЕС) является интегралом от плотности электронов на пути приемника-спутника. ТЕС измеряется в электронах  $\text{m}^{-2}$  или в единицах ТЕС (TECU), где  $1 \text{TECU} = 10^{16}$  электронов  $\text{m}^{-2}$ . Связь между наклонным и вертикальным полным электронным содержанием, ТЕС и  $\text{TEC}_v$ , обычно дается:

$$\text{TEC}_v = \text{TEC} \cos(Z)$$

с  $\cos(Z)$ , косинусом зенитного угла спутника в точке ионосферы, которая играет роль функции отображения.

Общее электронное содержимое очень изменчиво как в пространстве, так и во времени. Это функция геомагнитной широты, местного времени, сезона, солнечного цикла ... По этой причине ТЕС очень сложно моделировать. Обычно ионосфера делится на три области в зависимости от геомагнитной широты (рис. 1):

- полярная область, где ТЕС является наиболее переменной и нерегулярной; в этой области поведение ТЕС сильно зависит от геомагнитной активности;

- область средней широты, где ТЕС и его градиент являются самыми низкими и самыми правильными;

- экваториальная область, где наблюдаются самые высокие ТЕС-градиенты и значения ТЕС.

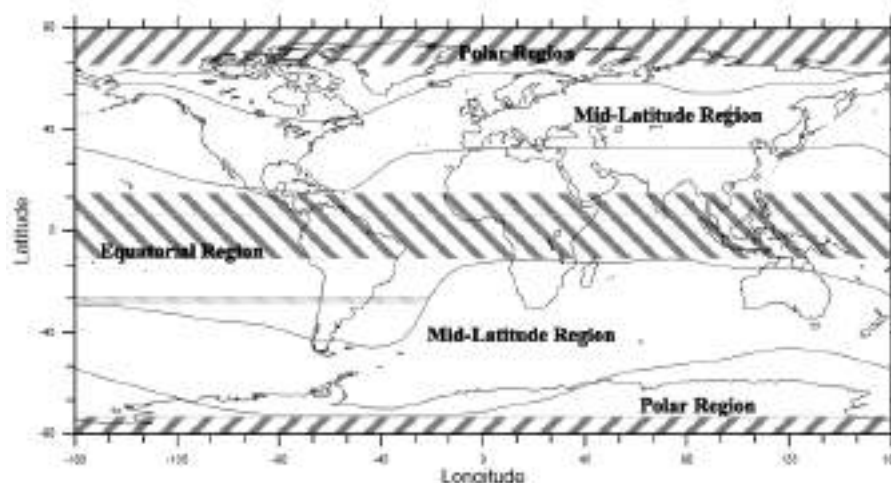


Рисунок 1. Области ионосферы

В таблице 1 приведена ионосферная ошибка при одномерном измерении кода  $C/A$  (в ns) для трех значений ТЕС:

- 20 TECU: очень обычное значение, встречающееся на всех широтах независимо от солнечной активности;

- 100 TECU: обычное значение для экваториальной области и «максимальное» значение для станций средней долготы в периоды высокой солнечной активности;

- 200 TECU: очень высокое значение встречается только в экваториальной области в периоды очень высокой солнечной активности.

Таблица 1. Задержка ионосферы (ns) по C / A код

TEC	Delay C/A code	
	Z = 0 /	Z = 70 /
200	108	316
100	54	158
20	11	32

## МЕТОДЫ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ДЛЯ ИСПРАВЛЕНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ ОШИБКИ

### Модель Клобучара

Первым способом корректировки измерений GPS для эффекта ионосферной рефракции является использование предсказательной модели TEC. Такие модели, как правило, могут предсказывать TEC в зависимости от нескольких параметров как локального времени, широты, солнечной активности, ... Они основаны на среднемесячных профилях TEC. Пример приведен в модели Клобучара [2], из которой 8 параметров передаются в спутниковом навигационном сообщении GPS. К сожалению, TEC часто отбрасывает форму своего среднемесячного поведения. Этот факт проиллюстрирован далее в статье. На практике эту модель можно рассматривать только как первое приближение, приводящее к возникновению важных остаточных ошибок в нарушенных ионосферных условиях.

### Метод «общего вида»

В так называемом методе передачи времени «общего вида» используются различия между односторонними кодовыми наблюдениями, выполненными на двух разных станциях на одном спутнике, который находится на обоих сайтах. Одним из преимуществ этого метода является устранение всех ошибок, связанных с общими измерениями. В частности,

если расстояние между станциями невелико, можно ожидать, что ионосфера (т. Е. TEC) над этими станциями очень похожа, и, следовательно, эффект ионосферной рефракции на два измерения, выполненных на этих двух соседних станциях, будет таким же. В этом случае измерение «общего зрения» (почти) не зависит от ионосферной рефракции. Когда расстояние между станциями возрастает, соответственно сохраняется иная ионосферная ошибка. На практике остаточная ионосферная ошибка, остающаяся в наблюдениях общего вида, зависит от:

- градиенты в вертикальной TEC между двумя наблюдательными станциями;
- сам вертикальный TEC; действительно, даже если вертикальный TEC имеет одинаковое значение на обоих сайтах, остается остаточная ошибка: это связано с тем, что два приемника наблюдают спутник с другим зенитным углом.

Как следствие, общее электронное содержание и его градиенты в пространстве должны быть изучены, чтобы оценить остаточную ионосферную ошибку, оставшуюся в отдельных различиях.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТЕК

Коды GPS и измерения фазы несущей могут быть объединены для расчета профилей TEC в зависимости от местного времени с точностью 2-3 TECU. Описание метода, используемого автором, можно найти в [1] и [4]. Этот метод был применен к измерениям GPS, собранным в Брюсселе (50,8 / N) сроком на 9 лет (апрель 1993 года - март 2002 года). На рисунке 2 показаны все ежедневные профили TEC, полученные в Брюсселе в ноябре 1994 года, декабре 1994 года и ноябре 2001 года: все профили TEC, соответствующие тому же месяцу, представлены на одном графике.

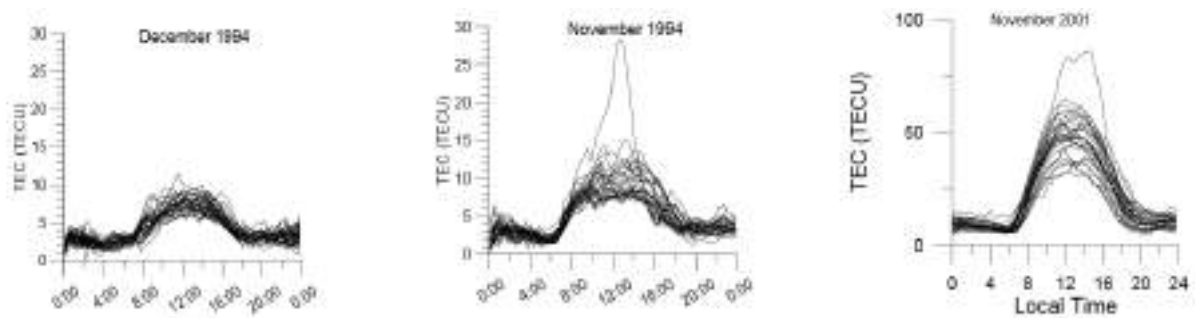


Рисунок 2. Ежедневные профили ТЕС в Брюсселе в зависимости от местного времени в ноябре 1994 года, декабре 1994 года и ноябре 2001 года.

Из этого рисунка видно, что кривые ТЕС имеют довольно очевидную изо дня в день повторяемость (см., В частности, декабрь 94). Тем не менее, во многих случаях ТЕС отбрасывает свое среднемесячное значение: см., Например, ноябрь 94 (низкая солнечная активность) и ноябрь 2001 года (высокая активность солнечной активности), где разница между среднемесячным значением и реальной стоимостью достигает около 50 TECU. Это различие приведет к ошибке 27 нс в зените при одномерном измерении кода  $C/A$ . Важно также подчеркнуть, что Брюссель расположен в средней широте (т. е. В самой тихой области ионосферы). Другими словами, использование ионосферной модели Клобучара для коррекции одночастотных данных для ионосферного эффекта может привести к большим остаточным ошибкам. Рисунок 3 (слева) показывает зависимость среднего дневного ТЕС от солнечной активности.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕС -ГРАДИЕНТОВ

Градиенты в ТЕС можно разделить на 2 класса:

- регулярные градиенты: «обычные» градиенты, наблюдаемые в ТЕС; например, ТЕС имеет минимальное значение в течение ночи и достигает максимума около 14 часов (по местному времени). Следовательно, существует градиент, зависящий от местного времени; другой пример: в экваториальной области при высокой солнечной активности наблюдаются градиенты Север-Юг около 30 TECU на 100 км [3], а градиенты 100 TECU между экваториальными и среднеширотными областями не являются

необычными в периоды высокой солнечной Мероприятия. По этой причине общие эксперименты по наблюдению между 2 экваториальными станциями или между станцией средней величины и экваториальной станцией могут привести к большим остаточным ионосферным ошибкам.

- нерегулярные градиенты: градиенты, обусловленные нерегулярными ионосферными явлениями, как перемещение ионосферных возмущений и сцинтилляционные эффекты. Движущиеся ионосферные возмущения или TID появляются как волны в электронной плотности (и, следовательно, в TEC) из-за взаимодействий между нейтральной атмосферой и ионосферой. Они имеют длину волны от нескольких десятков километров до более тысячи километров. Их появление часто вызывает важные градиенты в ТИК даже на нескольких километрах. Сцинтилляционные эффекты - это изменения фазы и амплитуды радиосигнала, проходящего через мелкомасштабные неровности ионосферы. Сцинтилляционные эффекты очень часто наблюдаются в полярных и экваториальных областях и иногда обнаруживаются в области средней широты, в частности, во время геомагнитных бурь. Эти явления также приводят к важным и очень нерегулярным изменениям в измеренном ТИК. Банк данных GPS, заархивированный в Королевской обсерватории Бельгии, использовался для выявления случаев появления TID и сцинтилляций в Брюсселе. На рис. 3 (справа) показано количество ионосферных нерегулярных явлений (TID или сцинтилляций), наблюдаемых в месяц с 93 по март 2002 года. Большинство событий, представленных на этом рисунке, связаны с TID, которые очень часто наблюдаются в областях средней широты даже если солнечная активность низкая. Сцинтилляционные эффекты наблюдались также во время геомагнитных бурь в период 2000-2002 гг. В период, охватываемый нашим набором данных, мы заметили, что появление TID и сцинтилляций в Брюсселе приводит к разнице в 2 - 6 TECU между TEC, измеренной на станциях, разделенных примерно на 50 км (от 1.1 до 3.3 нс при зените на C / Код). В случае экваториальной станции в литературе были отмечены различия в 12 TECU (6,5 нс в зените) из-за

эффектов сцинтилляции для аналогичных перепадов станций. Важно подчеркнуть, что общий ионосферный эффект представляет собой сумму регулярных и нерегулярных градиентов. Действительно, в некоторых случаях, даже если эффект нерегулярной части можно считать незначительным, общий эффект (регулярный + нерегулярный) может стать значимым.

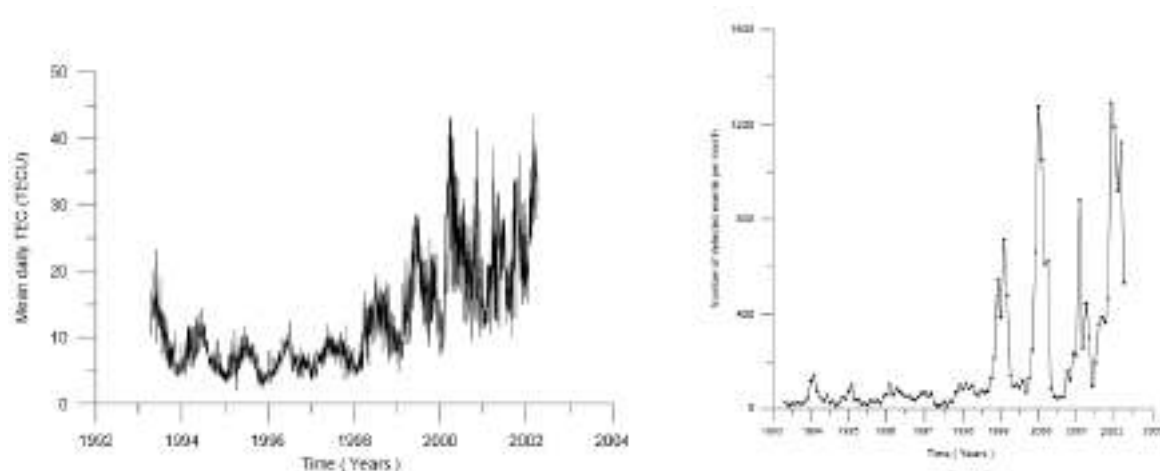


Рисунок 3. Слева: средний дневной ТИК с апреля 1993 года по март 2002 года; Справа: Количество нерегулярных ионосферных явлений, наблюдаемых в месяц с апреля 1993 года по март 2002 года.

## ВЫВОДЫ

Ионосферный эффект остается беспроблемным источником ошибок при передаче времени с использованием измерений кода C / A. Этот эффект резко возрастает в периоды высокой солнечной активности. Использование модели Клубучара, основанной на среднемесячном поведении TEC для коррекции измерений для ионосферы, может привести к важным ошибкам, особенно когда синхронизация часов производится между средней широтой и экваториальной станцией и при наличии эффектов сцинтилляций.

## ССЫЛКИ

[1] G. E. Lanyi et T. Roth (1988): A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations, *Radio Science*, 23, 483-492.



[2] J.A. Klobuchar (1986): Design and characteristics of the GPS ionospheric time delay algorithm for single frequency users, Proceedings of the PLANS-86 conference, Las Vegas, Nevada, 280-286.

[3] Wanninger L. (1993), Effects of equatorial ionosphere on GPS, GPS World, July, 48.

[4] Warnant R. and E. Pottiaux (2000), The increase of the ionospheric activity as measured by GPS, Earth, Planets and Space, Vol.52, 11, pp. 1055-1060.