

**ВАРИАЦИИ ГРУППОВОГО ПУТИ СИГНАЛА  
В ГЛОБАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

**Е.М. Вдовин, В.А. Голыгин, В.И. Сажин**

**VARIATIONS OF GROUP PATH OF SIGNAL IN GLOBAL SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS**

**E.M. Vdovin, V.A. Golygin, V.I. Sazhin**

Ошибка в измерениях групповых задержек сигналов определяет точность позиционирования в глобальных спутниковых навигационных системах (ГНСС). В данной работе моделируются вариации групповых задержек, связанные с влиянием ионосферы. Как известно, они дают наибольший вклад в погрешность позиционирования. Моделирование проводится на данном этапе для однослойной модели ионосферы, описываемой функцией Чапмена [http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/ionos/iri.html]

$$N(h) = N_{\max} \exp(1 - z - e^{-z}),$$

$$z = \frac{h - H_m}{H_{\text{пр}}},$$

$$H_{\text{пр}} = \frac{kT}{Mg},$$

где  $N_{\max}$  – электронная концентрация на высоте максимума ионосферы,  $h$  – высота,  $H_m$  – высота  $N_{\max}$ ,  $H_{\text{пр}}$  – высота однородной атмосферы.

Вначале посредством вычисления полного электронного содержания (ПЭС) по модели с различными значениями ее параметров и сравнения полученных значений с величинами ПЭС, определяемыми в системе GPS [ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/daily/], подобраны значения параметра приведенной шкалы высот  $H$  в модели, обеспечивающие лучшее согласие между модельными и измеряемыми значениями ПЭС. Параметры модели по значениям ПЭС соответствуют большому набору моментов времени для различных уровней солнечной активности, различных сезонов (лето, осень, зима, весна) и различных суточных периодов (день, ночь, утро, вечер) для пункта Иркутска. Примеры моментов времени приведены в табл. 1.

Таблица 1

Примеры моментов времени

$f_0$ , МГц	$H_m$ , км	$H_{\text{пр}}$	ПЭС, Теку	Реальная ситуация, 2002 г.
5	250	250	19.6	весна UT=22:00
6.5	250	250	33.1	осень UT=06:00
8	250	250	41.74	осень UT=10:00
9.5	250	250	58.9	март UT=06:00

Форма профиля электронной концентрации  $N(h)$  приведена на рис 1.

Затем в модель были включены продольные (вдоль трассы) градиенты [Сажин, 2010] критической частоты ( $f_0$ ) и высоты максимума ( $H_m$ ) в виде определенных аналитических выражений:

$$f_1(x) = f_0 \frac{e^{-b_1x} + k_1 e^{b_2x}}{e^{-b_2x} + e^{b_1x}}$$

$$H_1(x) = H_m \frac{e^{-b_2x} + k_2 e^{b_2x}}{e^{-b_2x} + e^{b_2x}},$$

Данные выражения формируют переходную область, слева от которой сохраняется примерно постоянное значение  $f_1(x) = f_0$  и  $H_1(x) = H_m$ , в середине ее происходит квазилинейное изменение  $f_1(x)$  до значения  $k_1 f_0$  и  $H_1(x)$  до  $k_2 H_m$ , и эти значения затем снова остаются примерно постоянными. Ширину области определяют значения  $b_1$  и  $b_2$ .

В основной области переходного участка они дают близкий линейному ход изменения  $f_0$  и  $H_m$  вдоль трассы. Для данной модели была реализована программа численных расчетов траекторий и групповых задержек сигналов на трассе ИСЗ – наземный приемный пункт известным методом характеристик.

Моделирование групповых задержек сигнала проведено для различных значений зенитных углов положения ИСЗ (5, 25, 50, 75°) в ионосфере без продольных градиентов и для одного значения угла (50°) в ионосфере с градиентами  $f_0$  и  $H_m$  средней величины. Получены изменения группового пути сигнала для набора указанных ситуаций. Представлены значения разности  $\Delta P$  группового пути сигнала (в таблице) и геометрической дальности между ИСЗ и наземным пунктом. Полученные значения удовлетворительно соответствуют величинам этой разности, определяемым в ряде измерений [Афраймович, Первалова, 2006].

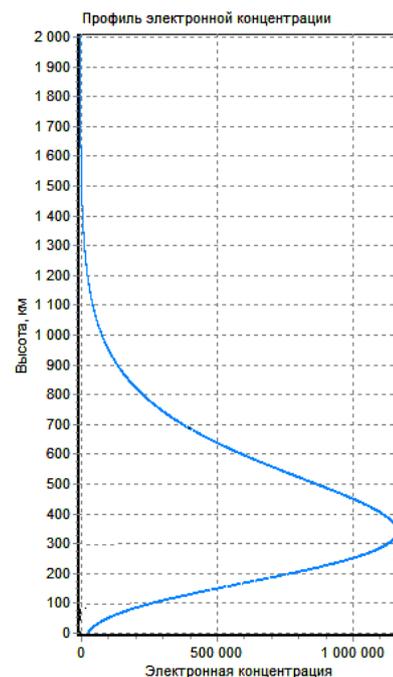


Рис. 1. Форма профиля электронной концентрации  $N(h)$ .

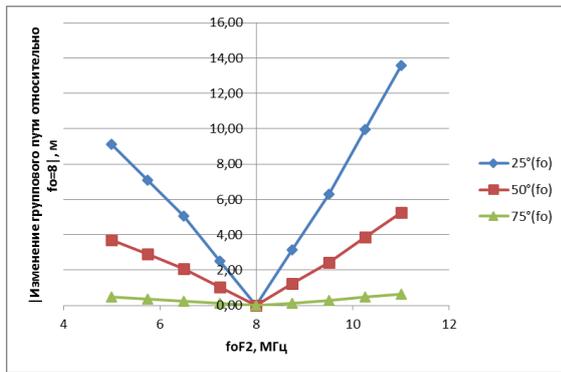


Рис. 2. Вариации относительных изменений группового пути в зависимости от отклонений критической частоты модели ионосферы в отсутствие градиентов для различных зенитных углов.

С целью определения степени влияния вариаций параметров модели ионосферы на величину группового пути проведено моделирование относительных изменений  $\Delta P$  в зависимости от различных относительных изменениях  $f_0$  и  $H_m$  для двух зенитных углов ИСЗ (25 и 50°) в отсутствие продольных градиентов и одного значения угла (50°) при наличии таковых. Проведен сравнительный анализ степени влияния вариаций  $f_0$  и  $H_m$  на изменения  $\Delta P$ .

Получены изменения группового пути сигнала для набора указанных ситуаций. Для примера на рис. 2 показаны вариации относительных изменений группового пути в зависимости от отклонений критической частоты ионосферы.

Видно, что с ростом угла относительные изменения группового пути снижаются. Представлены значения разности  $\Delta P$  группового пути сигнала и геометрической дальности между ИСЗ и наземным пунктом. С целью определения степени влияния вариаций параметров максимума ионосферы на величину группового пути проведено моделирование относительных изменений  $\Delta P$  различных относительных изменениях  $f_0$ ,  $H_m$  приведенной шкалы высот  $H_{np}$  с учетом наличия средних продольных градиентов. На рис. 3 для одной из ситуаций показаны типичные вариации относительных изменений группового пути в зависимости от изменений таких параметров модели ионосферы как критическая частота, высота максимума и приведенная шкала высот при наличии продольных градиентов и без них.

Можно видеть, что в рамках данной модели наличие градиентов почти не изменяет вариации относительных изменений группового пути. Проведен сравнительный анализ степени влияния вариаций критической частоты, высоты максимума и приведенной шкалы высот на изменения  $\Delta P$  для ряда ситуаций. На рис. 4 представлен усредненный сводный график зависимости вариаций группового пути от указанных параметров для угла 50°.

Видно, что наиболее существенное влияние оказывают вариации критической частоты, значительно превосходя по своему влиянию изменения других параметров. Это дает возможность выполнить приближенное решение обратной задачи уточнения по значениям группового пути сигнала величины крити-

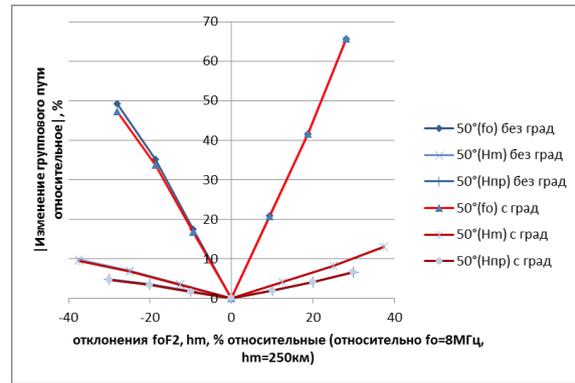


Рис. 3. Вариации относительных изменений группового пути в зависимости от относительных отклонений параметров модели ионосферы при наличии градиентов и без них.

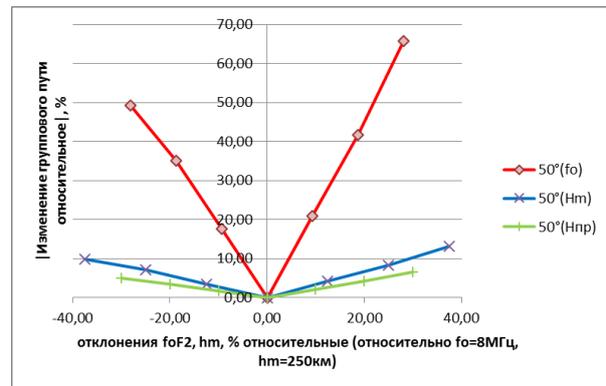


Рис. 4. Вариации относительных изменений группового пути в зависимости от относительных отклонений параметров модели ионосферы в отсутствие градиентов для угла 50°.

ческой частоты ионосферы в области пересечения максимума ионосферы траекторией сигнала.

Для проверки этого было выполнено моделирование различных ситуаций отклонений высоты максимума от опорного значения и восстановление при этом величины критической частоты с помощью подбора ее значений, обеспечивающих совпадение расчетного значения группового пути с его значением при опорных значениях параметров модели. В табл. 2 показаны величины относительной ошибки определения критической частоты для этих ситуаций (отсутствие градиентов, высота ИСЗ 20 000 км, рабочая частота 1.5 ГГц).

Можно отметить, что при разбросе высоты максимума, не превышающем примерно половину наблюдаемых вариаций ее значения, точность определения критической частоты достаточно удовлетворительна. При большем разбросе параметра она ухудшается. Безусловно, данные результаты получены для простой аналитической модели ионосферы и требуют уточнения для модели, более приближенной к реальности.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 8388 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.).

Таблица 2

Величины относительной ошибки определения критической частоты для ряда ситуаций

Угол, °	$f_0$ опор., МГц	$H_m$ опор., км	$\Delta P$ , м	$f_0$ откл., МГц	$H_m$ откл., км	$\Delta P$ , м	$\Delta f_0$ абс, МГц	$\Delta f_0$ отн, %
50	8	250	5.86	10.8	300	5.87	2.8	35
				9.1	275	5.76	9.1	13.75
				7.8	250	5.86	7.8	-2.5
				7.1	225	5.78	7.1	-11.25
				6.5	200	5.84	6.5	-18.75
75	8	250	0.73	10.5	300	0.74	2.5	31.25
				9.3	275	0.78	9.3	16.25
				7.9	250	0.72	7.9	-1.25
				7	225	0.71	7	-12.5
				6.7	200	0.71	6.7	-16.25

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ ВСНЦ СО РАНН, 2006. 480 с.

Сажин В.И. Компьютерное моделирование распространения радиоволн в регулярной ионосфере: учебное пособие. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2010. 77 с.

<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/ionos/iri.html>.

<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/data/daily/>.

*Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия*