

## АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕДУР ОБРАБОТКИ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ФАЗЫ НЕСУЩЕЙ НАВИГАЦИОННОГО СИГНАЛА

Е. И. Данильчук<sup>1,2</sup>, В. В. Демьянов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институту солнечно-земной физики СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126 А

E-mail: danilchuk.k@mail.ru, sword1971@yandex.ru

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1

**Аннотация.** Представлена многокомпонентная модель фазы несущей навигационного сигнала, которая учитывает влияние рефракционных эффектов, связанных с движением спутника; регулярного ионосферного слоя; низкочастотных вариаций фазы, вызванных перемещающимися ионосферными неоднородностями различных масштабов; вариаций фазы, вызванных мелкомасштабными неоднородностями; шумов измерений приемника. Разработанная модель может использоваться для оценки оптимальных параметров процедур фильтрации и при расчетах индексов мерцаний, основанных на измерениях параметров навигационных сигналов, а также для определения характерных точек и областей на спектре вариаций фазы несущей.

**Ключевые слова:** ГНСС, ионосфера, фаза несущей, индексы мерцаний

## ANALYSIS OF PARAMETERS OF PHASE MEASUREMENT PROCESSING PROCEDURES BASED ON CARRIER PHASE MODEL OF NAVIGATION SIGNAL

E. I. Danilchuk, V. V. Demyanov

**Abstract.** We provide the carrier phase model of the navigation signal. The model takes into account refraction effects due to satellite motion, the background ionosphere, travelling ionospheric disturbances of different scales, small scale irregularities, and measurement noise in the receiver. The proposed model can be used to evaluate the optimal parameters of filtering procedures and calculating ionospheric scintillation indices based on measurements of navigation signals parameters, as well as to determine characteristic points and regions on the phase variations spectrum.

**Keywords:** GNSS, ionosphere, carrier phase, scintillation indices

### Введение

Начиная с конца 1990-х годов эффективным и высокоинформационным средством мониторинга ионосферы являются сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). В настоящее время доступны измерения параметров сигналов ГНСС с высокой частотой регистрации (от 10 Гц) [1]. Кроме того, навигационные спутники нового поколения излучаются сигналы в трех частотных диапазонах ( $L1 \approx 1575$  МГц,  $L2 \approx 1227$  МГц,  $L5 \approx 1176$  МГц), при этом на каждой частоте наблюдается по несколько сигнальных компонент [2]. Таким образом, уровень развития ГНСС, как инструмента высокоточного и глобального мониторинга ионосферы за последние несколько лет вырос. Но использование этих новых технических возможностей для мониторинга ионосферы пока ограничено. Это связано с обработкой и хранением большого объема измерений и с недостаточным развитием методов обработки измерений параметров сигнала ГНСС с высокой частотой регистрации. В частности, необходимо усовершенствовать имеющиеся методы мониторинга ионосферы как с учетом высокой частоты регистрации измерений параметров сигналов ГНСС, так и с учетом аппаратных шумов измерений.

Важным инструментом для разработки новых и усовершенствования имеющихся методов мониторинга ионосферы на основе обработки измерений с высокой частотой регистрации является многокомпонентная модель фазы несущей навигационного сигнала. В данной работе предлагается модель фазы несущей навигационного сигнала для тестирования процедур обработки фазовых измерений и расчета ионосферных индексов.

### Модель фазы несущей навигационного сигнала

В основе разработанной модели фазы несущей навигационного сигнала лежит теория возмущений, согласно которой фазу несущей навигационного сигнала, диэлектрическую

проницаемость среды и траекторию распространения сигнала можно представить в виде суперпозиции невозмущенной (регулярной) части и возмущений малой интенсивности. Кроме того, при моделировании используется приближение геометрической оптики, согласно которому минимальный пространственный масштаб неоднородностей ограничен масштабом первой зоны Френеля, который равен 300-400 м для частот навигационных спутников. Таким образом, разработанная модель фазы несущей навигационного сигнала [3] учитывает:

1) регулярный набег фазы несущей, связанный с видимым движением навигационного спутника.

2) рефракционные приращения фазы в регулярном ионосферном слое, которые позволяют реконструировать величину полного электронного содержания (ПЭС) вдоль траектории сигнала с учетом локального времени, геомагнитных координат и фоновых геомагнитных условий. При моделировании использовалась модель Клобучара.

3) рефракционные волновые вариации фазы, вызванные возмущениями ПЭС крупного, среднего и промежуточного масштабов. Рефракционные волновые вариации фазы, вызванные крупномасштабными возмущениями, можно представить, как суперпозицию нескольких гармонических колебаний с близкими частотами, амплитудами и фазами. А волновые вариации фазы, вызванные среднемасштабными возмущениями и возмущениями с промежуточным масштабом, наилучшим образом описываются суперпозицией трех колебаний с ограниченным спектром, у которых близкие значения амплитуды, частоты и начальной фазы.

4) флуктуации фазы, которые вызваны влиянием мелкомасштабных неоднородностей, размеры которых больше первой зоны Френеля. Данная часть модели представлена в виде случайного поля гауссовых неоднородностей, движущихся с постоянной скоростью. При этом такая модель позволяет задать параметры этих неоднородностей (пространственные масштабы, относительную интенсивность и координаты расположения центров неоднородностей).

5) шумы измерений в навигационном приемнике, которые включают тепловые шумы и шумы, вызванные механическими вибрациями и кратковременной нестабильностью опорного генератора, которые образуют на выходе приемника аддитивный шум измерений фазы.

Разработанная модель может быть использована для раздельного анализа эффектов вариаций фазы, возникающих из-за влияния ионосферных неоднородностей на границе уровня шумов измерений в навигационном приемнике, а также для определения оптимальных параметров процедур обработки измерений фазы несущей с высокой частотой регистрации при расчетах индексов ионосферных мерцаний.

### **Тестирование процедур обработки фазовых измерений с помощью модели фазы несущей**

Одной из задач обработки измерений фазы несущей сигнала навигационного спутника является удаление фазовой неоднозначности и тренда измерений, вызванного регулярным ионосферным слоем. Для этой цели можно использовать полиномиальную фильтрацию и выравнивание измерений фазы по измерениям кода. Установлено, что применение различных процедур удаления тренда дает существенно разный результат. Применение полиномиального фильтра не позволяет выделить крупномасштабные и среднемасштабные вариации фазы. Выравнивание фазового ПЭС по кодовому дает лучший результат. Однако использовать полиномиальный фильтр можно для выделения возмущений промежуточного масштаба.

Фильтр Баттервортса часто используется для удаления тренда измерений фазы несущей с высокой частотой регистрации. Одним из параметров фильтра является частота среза, которая может влиять на дальнейшую интерпретацию данных. На рис. 1 представлены результаты расчета индекса  $\sigma_\phi$  при использовании фильтра Баттервортса 6-го порядка с частотами среза 0,1 Гц (рис. 1а,б) и 1 Гц (рис. 1в,г) с разным временем усреднения: 0,1 с (синяя кривая 1), 1 с (желтая кривая 2) и 10 с (красная кривая 3).

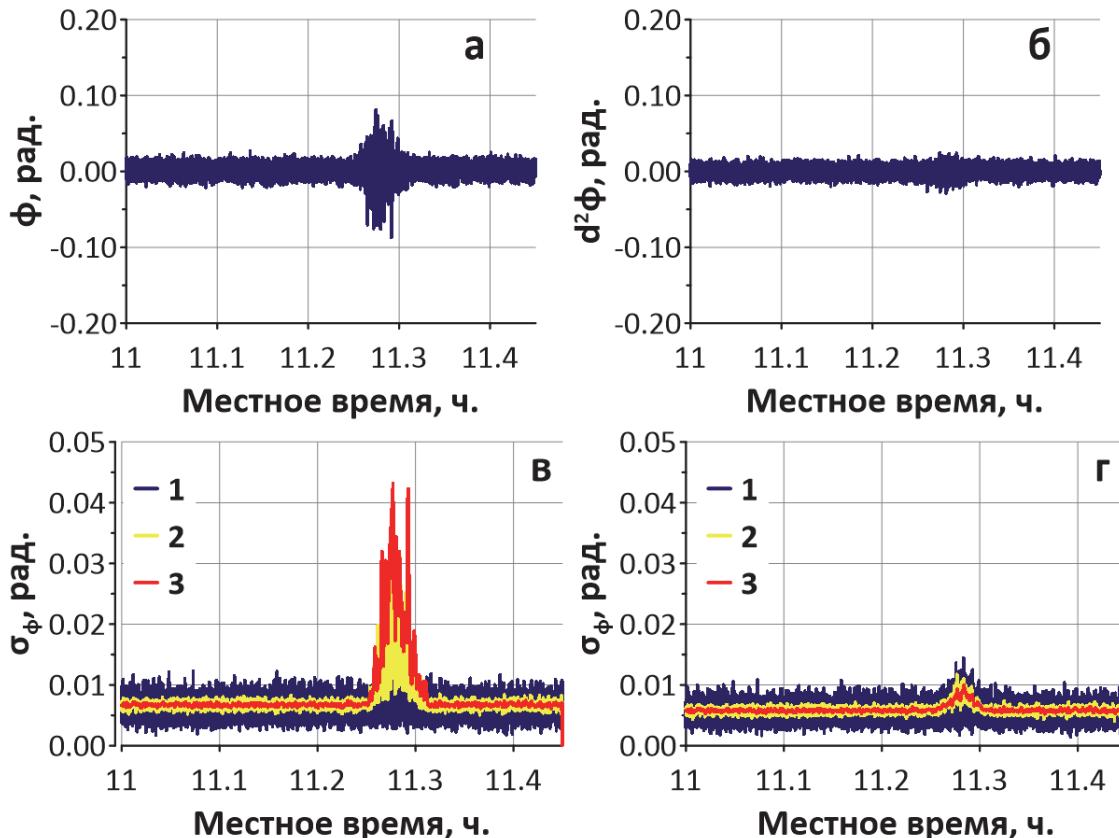


Рис. 1. Индекс  $\sigma_\phi$  при различных частотах среза фильтра Баттервортса 0,1 Гц (слева) и 1 Гц (справа) с разным временем усреднения 0,1 с (синяя кривая 1), 1 с (желтая кривая 2) и 10 с (красная кривая 3)

Частота среза фильтра Баттервортса оказывает влияние на амплитуду вариаций фазы несущей, уменьшая расчетное значение индекса  $\sigma_\phi$ . Кроме того, увеличение времени накопления при расчете индекса  $\sigma_\phi$ , приводит к подавлению шумов измерений и вызывает значительное увеличение расчетного значения индекса  $\sigma_\phi$  – с 0,023 при времени усреднения 0,1 с (кривая 1, рис. 1в) до 0,04 при времени усреднения 10 с (кривая 3, рис. 1г). Таким образом, некорректно выбранное время усреднения может привести к завышению оценки индекса  $\sigma_\phi$ .

Модель фазы несущей сигнала навигационного спутника также может быть использована для определения характерных точек и областей на спектре вариаций фазы несущей. На спектрах вариаций фазы несущей навигационного сигнала можно определить частоту девиации  $fd$  [1]. Под частотой девиации понимается граница между высокочастотной областью спектра мерцаний фазы (от 1 Гц и выше) с положительным наклоном спектра и областью спектра, где наклон спектра практически отсутствует. Значение частоты девиации определяется как точка на спектрах вариаций фазы несущей сигнала навигационного спутника, в которой спектральный наклон изменяется от отрицательного наклона до практически нулевого. Используя предложенную модель, можно оценить значения частоты девиации  $fd$  в зависимости от пространственного масштаба и относительной интенсивности мелкомасштабных неоднородностей (рис. 2).

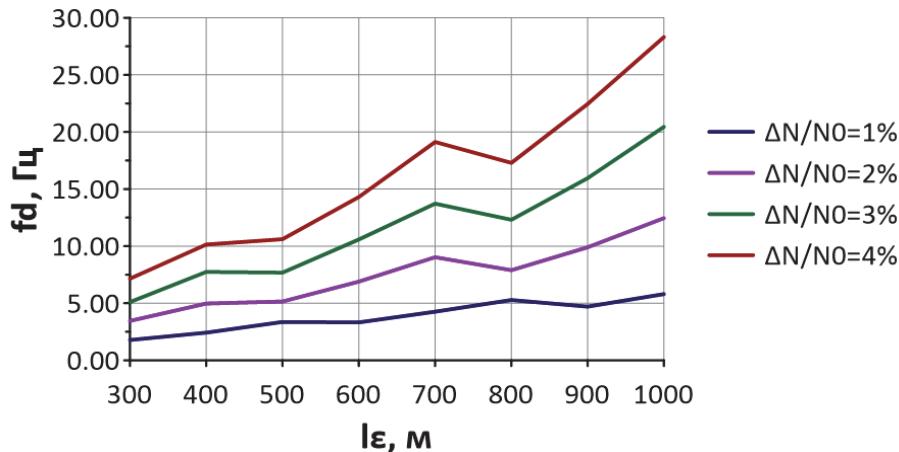


Рис. 2. Зависимость частоты девиации в спектре вариаций фазы несущей от пространственного масштаба и относительной интенсивности мелкомасштабных неоднородностей.

Согласно рис. 2 наблюдается зависимость индекса  $fd$  от параметров мелкомасштабных ионосферных неоднородностей. Видно, что увеличение масштаба и интенсивности неоднородности вызывает увеличение частоты девиации. Это подтверждает возможность использования индекса  $fd$  для обнаружения мелкомасштабных ионосферных неоднородностей на границе уровня шумов измерений.

### Заключение

Нами разработана многокомпонентная модель фазы несущей навигационного сигнала, которая может использоваться для раздельного анализа эффектов вариаций фазы, возникающих из-за влияния ионосферных неоднородностей на границе уровня шумов измерений в навигационном приемнике, а также для предварительной настройки параметров процедур фильтрации измерений во время ионосферного мониторинга.

Предложенная модель может стать принципиально важным инструментом для разработки новых и усовершенствования существующих индексов состояния ионосферы на основе обработки измерений с высокой частотой регистрации (от 10 Гц и выше).

Проведено тестирование модели для предварительной настройки процедур обработки измерений фазы и расчёта индексов ионосферных мерцаний, а также процедур выделения характерных точек и областей на спектре вариаций фазы несущей навигационного сигнала. Установлено, что некорректно выбранные параметры процедур обработки измерений фазы несущей сигнала навигационного спутника могут привести к искажению результатов.

### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00157, <https://rscf.ru/project/23-17-00157/>.

### Список литературы

1. McCaffrey A.M., Jayachandran P.T. Spectral characteristics of auroral region scintillation using 100 Hz sampling // GPS Solutions. – 2017. – Vol. 21. – P. 1883–1894. <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0664-z>.
2. Bolla P., Borre K. Performance analysis of dual-frequency receiver using combinations of GPS L1, L5, and L2 civil signals // Journal of Geodesy. – 2018. – Vol. 93. – P. 437–447. <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1172-9>.
3. Demyanov V.V., Danilchuk E.I., Zhang B., Ratnam D.V., Yasyukevich Y.V. A carrier phase hybrid model for adjusting the procedures to process ionospheric radio sounding measurements with high temporal resolution // Advances in Space Research. – 2025. – Vol. 75. – P. 7711–7725. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.03.001>.