

ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОЦЕДУР УДАЛЕНИЯ ТРЕНДА ИЗМЕРЕНИЙ ФАЗЫ НЕСУЩЕЙ И РАСЧЕТА ИНДЕКСОВ ИОНОСФЕРНЫХ МЕРЦАНИЙ

Е.И. Данильчук^{1,2}, В.В. Демьянов^{1,2}

¹Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия,
danilchuk.k@mail.ru

²Институт солнечно земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

TESTING CARRIER PHASE MEASUREMENT DETRENDING PROCEDURES AND CALCULATION OF IONOSPHERIC SCINTILLATION INDICES

E.I. Danilchuk^{1,2}, V.V. Demyanov^{1,2}

¹Irkutsk State University, Irkutsk, Russia, danilchuk.k@mail.ru

²Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. Проведено тестирование процедур удаления тренда измерений фазы несущей с высокой частотой регистрации и расчета индексов ионосферных мерцаний на основе модели фазы несущей трансionoсферного 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 френелевскими неоднородностями; шумы измерений приемника.

Ключевые слова: фаза несущей, удаление тренда измерений, ионосферные индексы мерцаний.

Abstract. We tested high-rate carrier phase measurement detrending procedures and calculation of ionospheric scintillation indices. It was based on model of the carrier phase of transionoсpheric signal which takes into account the influence of refractive effects associated with satellite motion; the regular ionospheric layer; low-frequency phase variations caused by various scale traveling ionospheric disturbances; phase variations caused by Fresnel disturbances; receiver measurement noise.

Keywords: carrier phase, detrending, ionospheric scintillation indexes.

ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера Земли представляет сложную динамическую систему, которая на протяжении многих десятилетий была и остается актуальным объектом исследований. Начиная с конца 1990-х годов активно развиваются методы радиозондирования ионосферы на основе обработки и анализа измерений параметров сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Эффективным и высокоинформативным средством мониторинга ионосферы являются сигналы ГНСС.

В настоящее время становятся более доступными измерения параметров сигналов ГНСС с высокой частотой регистрации от 10 Гц и выше [McCaffrey, Jayachandran, 2017]. Кроме того, современные поколения спутников транслируют множество различных сигналов в различных диапазонах частот L1, L2 и L5 [Bolla, Vogge, 2018]. Возможности, которые представляются благодаря анализу таких измерений в геофизических исследованиях, в частности для исследований ионосферы, используются не в полном объеме. Это связано, во-первых, с большим объемом измерений, которые необходимо хранить и обрабатывать, а во-вторых, с недостаточным развитием методов обработки измерений параметров сигнала ГНСС с высокой частотой регистрации. Поэтому для разработки новых, а также усовершенствования имеющихся методов мониторинга ионосферы с помощью трансionoсферных сигналов с высокой частотой регистрации необходим инструмент, который позволит определить оптимальные параметры процедур обработки измерений ГНСС. Таким инструментом является многокомпонентная модель фазы несущей, которая позволяет определить оптимальные параметры

процедур удаления тренда измерений, а также параметры расчета ионосферных индексов мерцаний. Таким образом, целью данной работы является определение оптимальных параметров обработки фазы несущей трансionoсферного сигнала с высокой частотой регистрации.

МОДЕЛЬ ФАЗЫ НЕСУЩЕЙ ТРАНСИОНОСФЕРНОГО СИГНАЛА

Модель фазы несущей сигнала навигационного спутника основана на теории возмущений, согласно которой фазу несущей навигационного сигнала, диэлектрическую проницаемость среды распространения сигнала и траекторию распространения сигнала можно представить в виде суперпозиции невозмущенной (регулярной) части и возмущенной малой интенсивности.

Таким образом, разработанная модель фазы несущей навигационного сигнала учитывает регулярный набег фазы несущей, связанный с видимым движением навигационного спутника; рефракционные приращения фазы в регулярном ионосферном слое, которые рассчитываются с использованием модели ионосферной коррекции Клобучара; низкочастотные вариации фазы, вызванные перемещающимися ионосферными неоднородностями различных масштабов; вариаций фазы, которые вызваны влиянием мелкомасштабных неоднородностей, размеры которых больше первой зоны Френеля (для частот спутников ГНСС лежат в пределах от 300–400 м до 1–2 км); а также шумы измерений в навигационном приемнике. Разработанная модель предназначена для оценки эффективности методов и методик обработки измерений фазы несущей сигналов навигационных спутников и для определения

оптимальных параметров процедур удаления тренда, фильтрации и усреднения при расчетах индексов состояния ионосферы, основанных на измерениях параметров трансionoсферных сигналов.

**ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОЦЕДУР
ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ ФАЗЫ
НЕСУЩЕЙ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ФАЗЫ
НЕСУЩЕЙ ТРАНСИОНОСФЕРНОГО
СИГНАЛА И РАСЧЕТА ИНДЕКСОВ
ИОНОСФЕРНЫХ МЕРЦАНИЙ**

Разработанная многокомпонентная модель фазы несущей трансionoсферного сигнала предназначена для определения оптимальных параметров процедур фильтрации фазовых измерения и расчета индексов состояния ионосферы. В частности, можно определить оптимальные параметры расчета индекса мерцаний σ_φ , который основан на обработке измерений фазы несущей с удаленным трендом измерений. Для удаления тренда измерений (фильтрации) рекомендуется использовать фильтр Баттерворта 6-го порядка [Van Dierendonck et al., 1993]. При этом результат будет зависеть, как от частоты среза фильтра Баттерворта, так и от времени усреднения при расчете ионосферного индекса мерцаний σ_φ .

На рис. 1 показаны результаты расчетов индекса σ_φ при использовании фильтра Баттерворта 6-го порядка с частотами среза 0,1 Гц (рис. 1а,б) и 1 Гц (рис. 1в,г). При этом для индекса σ_φ было выбрано разное время усреднения 0,1 с (синяя кривая 1), 1 с (желтая кривая 2) и 10 с (красная кривая 3).

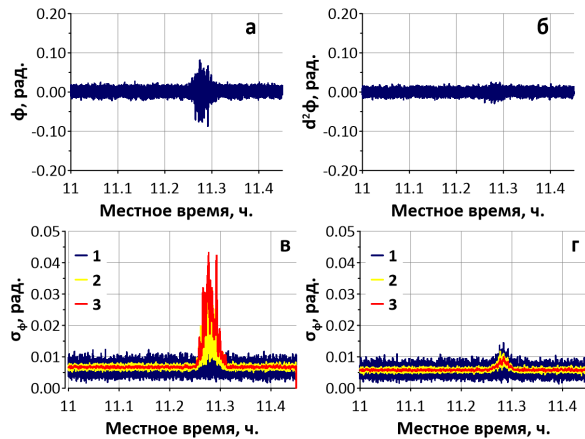


Рис. 1. Пример расчета индекса мерцаний σ_φ при различных значениях частоты среза фильтра Баттерворта и времени усреднения при расчете индекса σ_φ

Из-за влияния частоты среза фильтра Баттерворта на амплитуду вариаций фазы несущей трансionoсферного сигнала уменьшается расчетное значение индекса σ_φ (рис. 1г). Согласно рис. 1 увеличение времени накопления при расчете индекса σ_φ , приводит к подавлению шумов измерений, но при этом вызывает значительное увеличение расчетного значения индекса σ_φ — с 0,023 при времени усреднении 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 σ_φ .

Вторая производная фазы несущей $d^2\varphi$ может быть использована для прямого выделения шумов измерений и обнаружения ионосферных мерцаний с высокой частотой регистрации измерений [Demyanov et al., 2019]. Эффективность индекса $d^2\varphi$, как средства обнаружения слабых вариаций фазы, прямо зависит от уровня шумов измерений. Поэтому можно использовать предложенную модель фазы для того, чтобы оценить пороговое отношение сигнал/шум, при котором возможно обнаружить вариации фазы с помощью индекса $d^2\varphi$. На рис. 2 представлены результаты расчета индекса $d^2\varphi$ для рядов модели фазы несущей трансionoсферного сигнала. Для сравнения на рис. 2а приведен ряд шумов измерений, который входит в модель фазы несущей. На рис. 2 также представлены значения индекса $d^2\varphi$, при отношении сигнал/шум: 0,1 (рис. 2б), 0,5 (рис. 3в) и 1,0 (рис. 4г). Под отношением сигнал/шум в данном случае понимается величина $\frac{\sigma(\varphi_N)}{\sigma(d^2\varphi)}$.

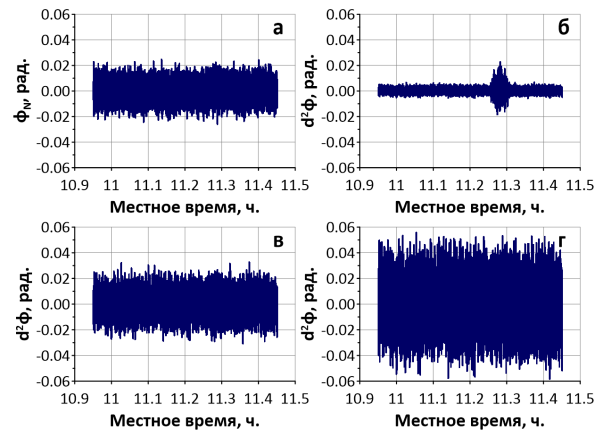


Рис. 2. Вторая производной фазы несущей при различном отношении сигнал/шум (б–г) и исходный ряд шума в составе модели (а)

Согласно рис. 2 вторая производная фазы позволяет извлечь из рядов модели фазы несущей трансionoсферного сигнала шумовую компоненту и вариации фазы, вызванные влиянием френелевских неоднородностей (рис. 2б). При этом не требуется прибегать к дополнительным процедурам удаления тренда и фильтрации. Однако вторая производная $d^2\varphi$ увеличивает шумовую компоненту в ~ 2 раза (рис. 2а и 2г). Таким образом, при отношении сигнал/шум $\frac{\sigma(\varphi_N)}{\sigma(d^2\varphi)} \geq 0.5$ слабые ионосферные мерцания фазы на уровне шума уже не обнаруживаются (рис. 2в и 2г). Следовательно, вторую производную фазы несущей $d^2\varphi$ можно использовать для обнаружения слабых вариаций фазы на фоне шумов, если используется приемная аппаратура с низким отношением сигнал/шум $\frac{\sigma(\varphi_N)}{\sigma(d^2\varphi)} < 0.5$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная модель фазы несущей позволяет определять оптимальные параметры процедур

фильтрации фазовых измерения и расчета индексов состояния ионосферы. Повышение частоты среза фильтра Баттерворта приводит к уменьшению амплитуды мерцаний, что в дальнейшем приводит к уменьшению расчетного значения индекса σ_φ . Кроме того, некорректно выбранное время усреднения может привести к завышению оценки индекса σ_φ . Установлено, что вторую производную фазы несущей $d^2\varphi$ можно использовать для обнаружения слабых вариаций фазы на фоне шумов, если используется приемная аппаратура с низким уровнем шума.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bolla P., Borre K. Performance analysis of dual-frequency receiver using combinations of GPS L1, L5, and L2 civil signals // *J. Geodesy*. 2018. V. 93. P. 437–447. DOI: 10.1007/s00190-018-1172-9.
- Demyanov V.V., Yasyukevich Y.V., Jin S., Sergeeva M. A. The Second-Order Derivative of GPS Carrier Phase as a Promising Means for Ionospheric Scintillation Research // *Pure and Applied Geophysics*. 2019. V. 176. P. 4555–4573. DOI: 10.1007/s00024-019-02281-6.
- McCaffrey A.M., Jayachandran P.T. Spectral characteristics of auroral region scintillation using 100 Hz sampling // *GPS Solutions*. 2017. V. 21. P. 1883–1894. DOI: 10.1007/s10291-017-0664-z.
- Van Dierendonck A.J., Klobuchar J., Hua Q. Ionospheric Scintillation Monitoring Using Commercial Single Frequency C/A Code Receivers // *Proc. 6th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation*. 1993. P. 1333–1342.