

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВКЛАДА ШУМОВ ПРИЕМНИКА
В ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ДЕВИАЦИИ
В СПЕКТРЕ МЕРЦАНИЙ ФАЗЫ НЕСУЩЕЙ ТРАНСИОНОСФЕРНОГО СИГНАЛА
НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ**

¹Е.И. Данильчук, ^{1,2}В.В. Демьянов

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

²Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
sword1971@yandex.ru

**EXPERIMENTAL ESTIMATION OF RECEIVER NOISE CONTRIBUTION TO THE ACCURACY
OF DEVIATION FREQUENCY WITHIN THE SPECTRUM OF SCINTILLATIONS
OF THE CARRIER PHASE OF NAVIGATION SATELLITES' TRANSIONOSPHERIC SIGNAL**

¹E.I. Danilchuk, ^{1,2}V.V. Demyanov

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

²Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
sword1971@yandex.ru

Аннотация. Исследовано влияние шумов приемника на точность определения частоты девиации в спектре вариаций и мерцаний фазы несущей. Исследованы сигналы GPS по данным приемников Javad и Septentrio. Установлено, что шумы приемника Javad в среднем в 1.5–2 раза меньше, чем шумы приемника Septentrio. Аналогично, по данным приемника Septentrio можно выделить более слабые ионосферные неоднородности из спектра вариаций и мерцаний фазы, чем из данных приемника Javad.

Ключевые слова: GPS, фаза несущей, частоты девиации, шумы приемника, Javad, Septentrio.

Abstract. The impact of receiver noise on the accuracy of determining deviation frequency in the carrier phase scintillation spectrum is investigated. GPS signals were studied using data from Javad and Septentrio receivers. Noise of Javad receiver was found to be 1.5-2 times less than that of Septentrio receiver. Similarly, we can detect weaker ionospheric inhomogeneities from the carrier phase scintillation spectrum, using data from Septentrio receiver than using data from Javad receiver.

Keywords: GPS, carrier phase, deviation frequency, receiver noise, Javad, Septentrio.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) являются высокоинформативным средством исследования ионосферы и верхней атмосферы Земли. При этом основным измеряемым параметром навигационных сигналов является фаза несущей, поскольку точные фазовые измерения позволяют наблюдать достаточно слабые геофизические события и реконструировать тонкую структуру ионосферы и верхней атмосферы. В то же время фаза несущей навигационного сигнала имеет высокую потенциальную чувствительность к слабым ионосферным событиям [Афраймович, 2006; Aarons, 1997], которая во многом определяется тем, насколько точно установлена граница между вариативной частью спектра мерцаний фазы несущей и областью неинформативных шумов в спектре. В работе [McCaffrey, Jayachandran, 2017] для обозначения данной границы предлагается термин «частота девиации».

Уровень шумов измерений фазы несущей существенно различается в зависимости от типа приемного оборудования, а также от сигналов различных систем и разных сигнальных компонент. Для оценки частоты девиации в спектре вариаций и мерцаний фазы это существенно. Целью данной работы является исследование влияния шумов приемника на точность определения частоты девиации в спектре мерцаний фазы несущей навигационных сигналов.

ДАнные И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ

Измерения фазы несущей сигналов GPS с частотой регистрации 50 Гц проводились с использованием навигационных приемников двух типов: Javad Delta-G3T [<https://www.javad.com>] и Septentrio PolaRx5 [<https://www.septentrio.com>], подключенных через антенный коммутатор к общей антенне. Оборудование установлено на стационарном пункте ISTR (52.24° N, 104.26° E) и является частью сети SibNet [Yasyukevich et al., 2018]. В данной работе представлены только те сигнальные компоненты системы GPS, которые наблюдаются на обоих приемниках, т. е. сигнальные компоненты L1C и L2W. Измерения проводились в спокойных геомагнитных условиях 13 апреля 2021 г. и 8 апреля 2022 г.

Для получения оценок частоты девиации исходные измерения фазы проводилась предварительная обработка: 1) удаление аномальных измерений, которые соответствуют выбросам и срывам сопровождения фазы; 2) удаление фазовой неоднозначности с помощью полиномиальной аппроксимации.

После предварительной обработки ряды фазы 1-часовой длительности для конкретного спутника и компоненты сигнала подвергались быстрому преобразованию Фурье, в результате которого были получены спектры вариаций фазы для дальнейшего анализа. Частота девиации определялась на логарифмическом спектре вариаций фазы как точка изменения спектрального наклона от отрицательного к наклону,

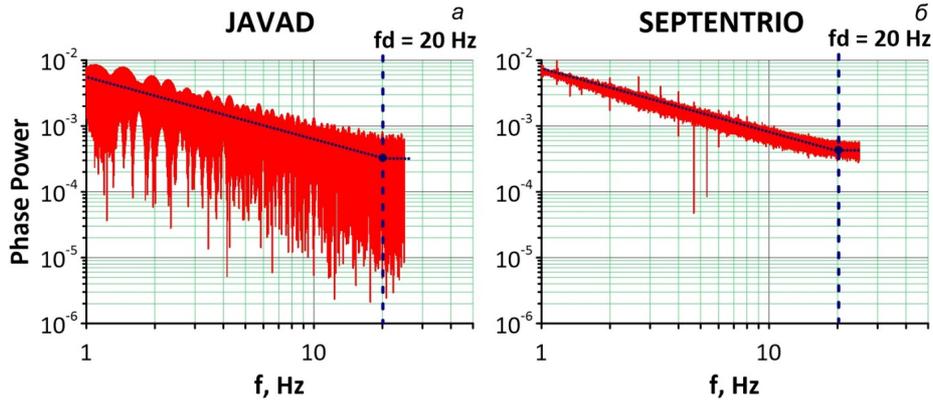


Рис. 1. Определение частоты девиации по данным приемников Javad (а) и Septentrio (б)

СКО шумов измерений фазы сигналов GPS

Приемник	Компонента сигнала / СКО шума (цикл 2π)	
	L1C	L2W
Javad	0.017	0.010
Septentrio	0.008	0.007

близкому к нулевому. На рис. 1 показаны типичные логарифмические спектры фазовых измерений по данным приемников Javad (а) и Septentrio (б) для спутника GPS PRN07.

Уровень шумов измерений фазы несущей существенно различается между сигналами разных систем и между разными сигнальными компонентами, а также зависит от типа приемного оборудования [Demyanov et al., 2020]. Для оценки частоты девиации в спектре вариаций и мерцаний фазы это существенно. Поэтому предварительно были проанализированы шумы измерения фазы для сигнальных компонент на частоте L1 системы GPS (таблице). К шумам приемника относятся тепловые шумы и относительная нестабильность опорного генератора [Kaplan, 2006]. Уровень шумов приемника Javad в среднем в 1.5–2 раза выше по сравнению с шумами приемника Septentrio.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты исследования показаны в виде гистограмм распределений значений частоты девиации для каждой сигнальной компоненты спутниковой системы GPS в каждый исследуемый день (рис. 2). Более подробные результаты определения частоты девиации по данным приемника Javad даны в работе [Demyanov et al., 2021].

Наблюдаются различия в диапазонах изменения частоты девиации для разных типов приемников. Частота девиации по данным приемника Javad варьирует в пределах 15–22 Гц, по данным приемника Septentrio — в пределах 18–24 Гц. Кроме того, наблюдается существенное различие в форме гистограмм распределения по данным разных приемников. Для приемника Javad форма гистограмм размыта в область низких частот с резким выделением наиболее вероятной частоты девиации, равной 20 Гц. Для приемника Septentrio наблюдается три доминирующих значения частоты девиации (20, 21, 22 Гц),

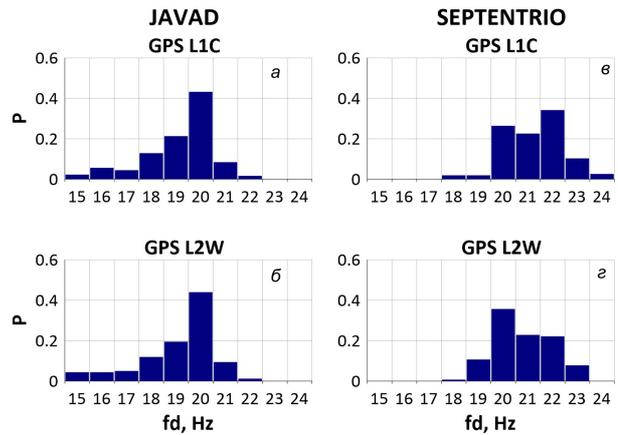


Рис. 2. Распределение частоты девиации сигнальных компонент спутниковой системы GPS по данным приемников Javad (а, б) и Septentrio (в, г)

причем для разных сигнальных компонент наблюдаются различные значения наиболее вероятной частоты девиации (22 Гц для сигнальной компоненты L1C и 20 Гц для L2W).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано влияние типа приемного оборудования на точность определения частоты девиации в спектре вариаций и мерцаний фазы несущей навигационной системы GPS. Установлено, что уровень шумов приемника Javad в среднем в 1.5–2 раза выше по сравнению с шумами приемника Septentrio.

Наблюдаются различия в диапазонах изменения частоты девиации для приемников разных типов. Диапазон изменения частоты девиации по данным приемника Javad находится в пределах 15–22 Гц с выделением наиболее вероятной частоты девиации 20 Гц, в то время как по данным приемника Septentrio можно выделить более мелкие структуры в ионосфере (частота девиации варьирует в пределах 18–24 Гц, причем доминирующими являются частоты 20–22 Гц).

Таким образом, предпочтительнее рекомендовать использовать приемник Septentrio для выявления слабых ионосферных возмущений в спектре вариаций и мерцаний фазы несущей навигационного сигнала, так как с помощью данного приемника можно выделить более мелкие структуры в ионосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. *GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли*. Иркутск: ГУ НИЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.

Aarons J., Lin B. Development of high latitude phase fluctuations during the January 10, April 10–11, and May 15, 1997 magnetic storms. *Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1999. Vol. 61. P. 309. DOI: [10.1016/S1364-6826\(98\)00131-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(98)00131-X).

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 Appl. Geophys.* 2019. Vol. 176. P. 4555–4573. DOI: [10.1007/s00024-019-02281-6](https://doi.org/10.1007/s00024-019-02281-6).

Demyanov V., Danilchuk E., Yasyukevich Y., Sergeeva M. Experimental estimation of deviation frequency within the spectrum of scintillations of the carrier phase of GNSS signals. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. P. 5017. DOI: [10.3390/rs13245017](https://doi.org/10.3390/rs13245017).

Kaplan E, Hegarty C. *Understanding GPS: Principles and Application*. London: Artech House, 2006. 707 p.

McCaffrey A.M., Jayachandran P.T. Spectral characteristics of auroral region scintillation using 100 Hz sampling. *GPS Solut* 21. 2017. P. 1883–1894. DOI: [10.1007/s10291-017-0664-z](https://doi.org/10.1007/s10291-017-0664-z).

Yasyukevich Y.V., Perevalova N.P., Vesnin A.M. SibNet — Siberian Global Navigation Satellite System Network: Current state. *Solar-Terr. Phys.* 2018. V. 4. P. 63–72.

URL: <https://www.javad.com>.

URL: <https://www.septentrio.com>.