

11.1

## Фурье-спектры амплитудных вариаций суперпозиции сигналов навигационных спутников вблизи поверхностей с различными свойствами

© Е.В. Кузьмин<sup>1</sup>, А.В. Сорокин<sup>2</sup><sup>1</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр „Красноярский научный центр СО РАН“, Красноярск, Россия

E-mail: ekuzmin@sfu-kras.ru, sorav@iph.krasn.ru

Поступило в Редакцию 9 апреля 2021 г.

В окончательной редакции 22 мая 2021 г.

Принято к публикации 8 июня 2021 г.

Представлены экспериментально зарегистрированные амплитудно-временные зависимости интерференционной суперпозиции сигналов навигационных спутников и их копий, отраженных границами разделов сред атмосфера–вода и атмосфера–суша. Получены фурье-спектры данных зависимостей. Установлено, что при различных электрофизических свойствах отражающих поверхностей наблюдается появление заметных особенностей спектров.

**Ключевые слова:** ГНСС-рефлектометрия, поверхность, интерференция, амплитудно-временная зависимость, фурье-спектр.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.18.51468.18818

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) активно используются для решения различных практических и научных задач [1]. В частности, непрерывно излучаемые сигналы навигационных спутников (НС) применяются для получения данных о характеристиках земных покровов, что позволяет осуществлять бесконтактный мониторинг параметров различных поверхностей [2–6]. Сигналы НС взаимодействуют с поверхностями земных покровов, в результате чего формируется интерференционное поле, образуемое суперпозицией прямого сигнала и его копий, отраженных границами разделов сред. Движение НС приводит к перемещению площадки отражения. Таким естественным образом производится „сканирование“ поверхностей в окрестности антенны. Приемник сигналов ГНСС производит типовые измерения и регистрирует числовые значения амплитудно-временных зависимостей (АВЗ) интерференционной суперпозиции процессов в точке приема. Последующий спектральный анализ АВЗ, примененный авторами, расширяет возможности ГНСС-рефлектометрии исследуемых поверхностей земных покровов.

В настоящей работе проведена регистрация АВЗ при распространении сигналов НС в атмосфере, вблизи водных поверхностей и почвенных покровов. Условия регистрации были аналогичными представленным в работе [6].

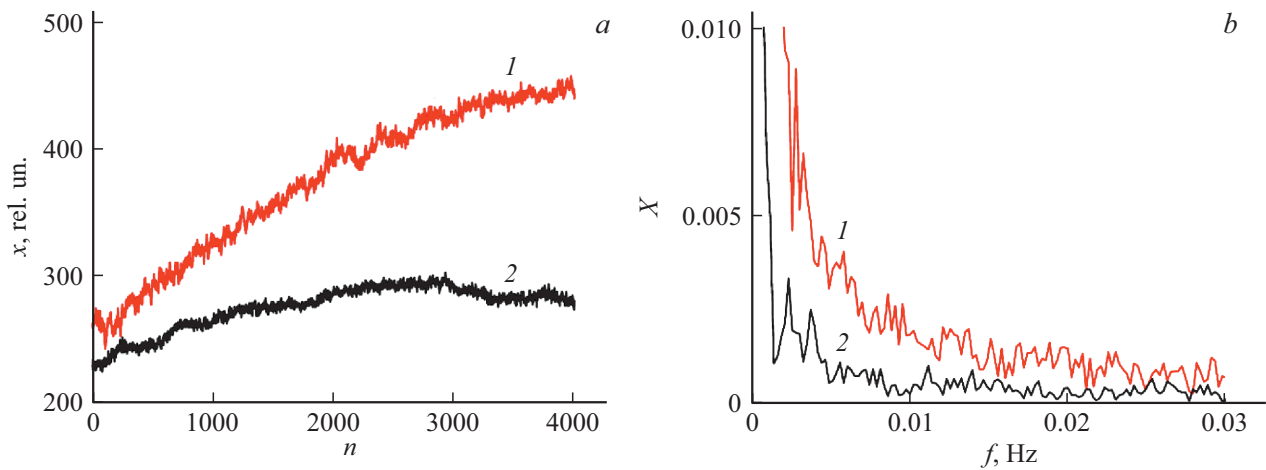
На рис. 1–3 приведены экспериментально зарегистрированные отсчеты  $x = x(n)$  АВЗ (*a*) и рассчитанные на их основе модули фурье-спектров, нормированные к их максимальным значениям:  $X = |X(f)|/|X_{\max}(f)|$  (*b*). Кривые 1 соответствуют АВЗ, полученным в результате приема сигналов НС ГЛОНАСС. Кривые 2 получены

при приеме сигналов НС GPS. Символами  $n$  обозначены временные отсчеты, следующие с шагом 1 s. Спектры  $X(f)$  получены на основе дискретного преобразования Фурье [7] отсчетов  $x(n)$ .

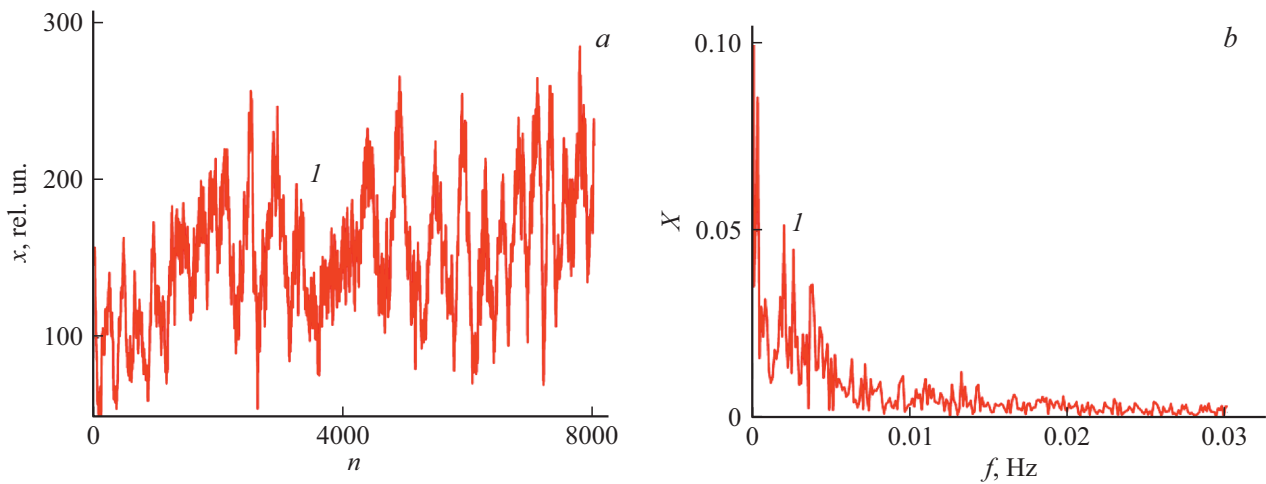
Зависимости, показанные на рис. 1, *a*, зарегистрированы при использовании антенны с правой круговой поляризацией, ориентированной в верхнюю полусферу. Такие условия наблюдения авторы условно называют случаем распространения в „свободном пространстве“, поскольку вклад отраженных сигналов, образующих интерференционную суперпозицию, отсутствует либо мал. Данный случай необходим как „индикатор“ отсутствия отражающей поверхности.

Кривые, показанные на рис. 2, *a* и 3, *a*, зарегистрированы при использовании дипольной антенны, расположенной перпендикулярно относительно горизонтальной плоскости. Такой способ ориентирован на учет вклада в интерференционную суперпозицию процессов, отраженных или рассеянных различными поверхностями. Рис. 2 соответствует случаю прохождения площадки отражения по почвенному покрову и сегменту водной поверхности. Рис. 3 отвечает случаю регистрации АВЗ в окрестности исключительно водной поверхности.

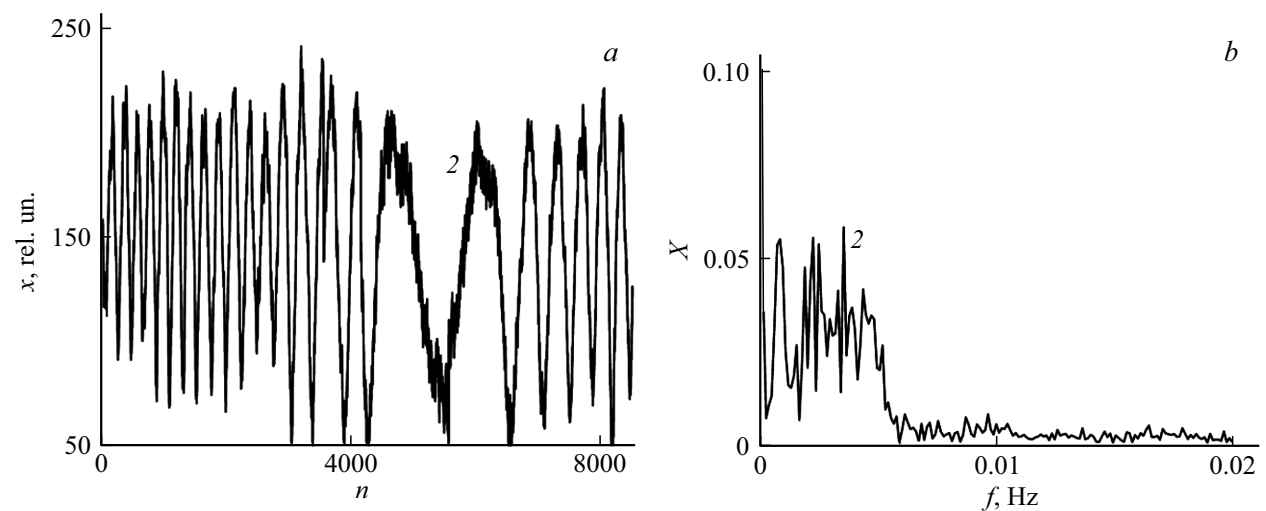
Как видно из рис. 1, для случая „свободного пространства“ зарегистрированные АВЗ и полученные фурье-спектры не имеют особенностей, которые возникают при одновременном присутствии прямых и отраженных горизонтальной поверхностью сигналов НС. Это объясняется тем, что атмосферные неоднородности в L1-диапазоне вносят достаточно малый вклад в регистрируемую АВЗ суммарного интерференционного процесса.



**Рис. 1.** Амплитудно-временные зависимости (a) и соответствующие им нормированные фурье-спектры (b). Случай распространения в „свободном пространстве“.



**Рис. 2.** Амплитудно-временная зависимость (a) и соответствующий ей нормированный фурье-спектр (b). Преимущественно почвенный покров и сегмент водной поверхности.



**Рис. 3.** Амплитудно-временная зависимость (a) и соответствующий ей нормированный фурье-спектр (b). Водная поверхность.

Из рис. 2, 3 видно, что АВЗ и фурье-спектры обладают выраженными особенностями, которые различаются в зависимости от типа поверхности (почва, вода). Это объясняется наличием в интерференционной суперпозиции компоненты сигнала, отраженного границами раздела сред атмосфера–вода и атмосфера–суша. Из рис. 1 видно, что поведение кривых оказывается подобным при регистрации АВЗ по сигналам обеих систем. Кроме того, из представленных рисунков видно (фрагменты *a*), что значения всех зарегистрированных АВЗ находятся в границах интервала  $0 < x(n) < 500$ . При этом величины нормированных спектров для случая „свободного пространства“ (рис. 1, *b*) приблизительно на порядок меньше, чем в случаях наличия отраженного сигнала (рис. 2, *b* и 3, *b*).

Таким образом, в работе получены экспериментальные амплитудно-временные зависимости интерференционной суперпозиции сигналов НС, принимаемых в условиях наличия и отсутствия отражающих поверхностей. Полученные фурье-спектры зарегистрированных зависимостей имеют визуально различимые особенности, изменяющиеся для различных условий приема сигналов. Показано, что при рассмотрении АВЗ для случая распространения сигналов НС в атмосфере фурье-спектры имеют монотонно убывающее поведение с некоторыми „выбросами“ на начальном участке. Установлено, что в случае приема сигналов НС в окрестности отражающих поверхностей в спектрах АВЗ наблюдаются явные изменения. Спектры приобретают многочисленные „всплески“ и „провалы“, становятся „расширенными“ и занимают большую полосу частот в сравнении с вариантом распространения сигналов НС только в атмосфере. Указанное расширение особенно заметно для случая приема сигналов НС вблизи водной поверхности: зарегистрированные АВЗ и их спектры подобны соответственно временным и спектральным диаграммам сигналов с внутриимпульсной частотной модуляцией. Представленные авторами примеры наглядно демонстрируют, что фурье-спектры АВЗ интерференционной суперпозиции сигналов НС представляются востребованным инструментом для повышения эффективности и расширения возможностей ГНСС-рефлектометрии при изучении свойств различных поверхностей.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] *Springer handbook of global navigation satellite systems*, ed. by P.J.G. Teunissen, O. Montenbruck (Springer International Publ., 2017).
- [2] В.Б. Кашкин, В.И. Кокорин, В.Л. Миронов, С.В. Сизасов, *Радиотехника и электроника*, **51** (7), 825 (2006).
- [3] S. Jin, E. Cardellach, F. Xie, *GNSS remote sensing* (Springer, Dordrecht–Heidelberg–N.Y.–London, 2014).
- [4] М.И. Михайлов, К.В. Музалевский, В.Л. Миронов, *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, **14** (2), 167 (2017). DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-167-174
- [5] А.М. Падохин, Г.А. Курбатов, М.О. Назаренко, В.Е. Смолов, *Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика. Астрономия*, № 4, 80 (2018).
- [6] Д.С. Макаров, А.В. Сорокин, Д.В. Харламов, *Сиб. журн. науки и технологий*, **20** (1), 8 (2019). DOI: 10.31772/2587-6066-2019-20-1-8-19
- [7] С.Л. Марпл, мл. *Цифровой спектральный анализ и его приложения*, пер. с англ. (Мир, М., 1990).