

УДК 621.372.542.29; 621.391.826.2

ЦИФРОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ГНСС-РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Кузьмин Е.В., к.т.н., доц., доцент кафедры радиотехники ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»;
e-mail: ekuzmin@sfu-kras.ru;

Сорокин А.В., к.ф.-м.н., доц., старший научный сотрудник лаборатории космических систем и технологий ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»;
e-mail: sorav@iph.krasn.ru.

DIGITAL FILTERING OF GNSS REFLECTOMETRY RESULTS

Kuzmin E.V., Sorokin A.V.

A software procedure for digital filtering has been developed for post-processing of experimentally obtained interference reflectograms. An analytical estimate of the coefficient of reducing the effect of additive noise is given. There has also been carried out the filtration of experimental interference reflectograms obtained as a result of sessions of recording the intensity of GNSS signals at various properties of surfaces adjacent to the receiving site.

Key words: interference reflectograms, digital filtering, GNSS reflectometry, GNSS-R, multipath, Fourier transform.

Ключевые слова: интерференционные рефлектограммы, цифровая фильтрация, ГНСС-рефлектометрия, ГНСС-Р, многолучёвость, преобразование Фурье.

Введение

Функционирующие глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) повседневно используются человечеством для решения координатно-временных задач, тем самым выполняя своё основное предназначение [1; 2]. Помимо этого, сигналы, излучаемые ГНСС, являются уникальным и широкодоступным «инструментом» для радиозондирования различных отражающих и рассеивающих поверхностей, облучение которых непрерывно производится сетями навигационных спутников, что и используется научным сообществом [2-9]. Известно значительное число публикаций ([2-7; 9] и многие др.) демонстрирующих интерференционные рефлектограммы (ИР), получаемые за счёт длительной регистрации изменений интенсивности сигнала конкретного спутника ГНСС, условия приёма которого характеризуются одновременным присутствием одного или нескольких переотражённых сигналов. Наличие и свойства последних определяются геометрическими и диэлектрическими особенностями объектов окружающей среды, содержащей отражающие и рассеивающие поверхности, а также непрерывным перемещением сети спутников. Интерференционные рефлектограммы являются промежуточным результатом радиотехнической рефлектометрии, представляющей достаточно востребованным инструментом для исследования свойств различных поверхностей.

Один из возможных примеров экспериментального получения ИР иллюстрируется на рис. 1 [7]. Антенна (Ант.) приёмника (ПР) сигналов ГНСС устанавливается на штативе вблизи поверхности¹, свойства которой

Разработана программная процедура цифровой фильтрации для постобработки экспериментально полученных интерференционных рефлектограмм. Дана аналитическая оценка коэффициента снижения влияния аддитивного шума. Проведена фильтрация экспериментальных интерференционных рефлектограмм, полученных в результате сеансов регистрации интенсивности сигналов ГНСС при различных свойствах поверхностей, примыкающих к месту приёма.

предполагается исследовать. Персональный компьютер (ПК), показанный на рисунке, может отсутствовать. Отличие от типового сеанса приёма сигналов ГНСС заключается в том, что антенна может ориентироваться как в верхнюю полусферу, так и под углом относительно направления в верхнюю полусферу, что позволяет увеличивать энергетический вклад отражённых сигналов в обрабатываемую суперпозицию – входную аддитивную смесь $y_{вх}(t)$.

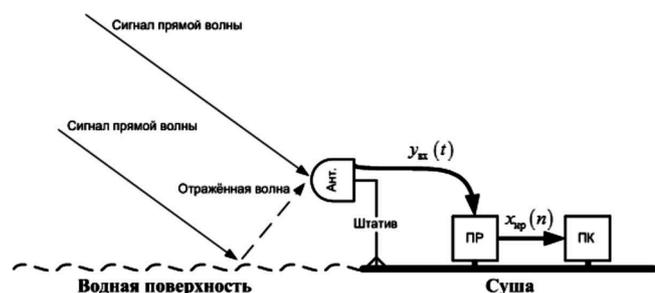


Рис. 1. Пояснение способа получения ИР

Поскольку приём сигналов ГНСС производится на фоне собственного шума приёмника [1; 2], то экспериментально получаемые отсчёты ИР $x_{ир}(n)$ неизбежно содержат аддитивную шумовую компоненту. Как правило, сеанс получения ИР занимает временные промежутки порядка десятков минут – единиц часов [3; 5; 7], а их отображение и изучение производится в режиме постобработки, что предрасполагает к проведению цифровой фильтрации, позволяющей снизить неблагоприятное влияние шума. В ряде случаев такие меры явля-

¹ К примеру, возле водоёма или лесного массива.

ется необходимыми, востребованными и имеющими практическую полезность, поскольку некоторые сегменты получаемых ИР могут быть зашумлены настолько [7], что визуальное различение их деталей оказывается затруднительным.

Известно [8], что различные особенности амплитудных спектров $|\dot{X}_{\text{ир}}(k)|$ выборок ИР [7] сосредоточены в сравнительно низкочастотной области, следовательно, для повышения эффективности их обработки на фоне аддитивного шума целесообразно применение фильтра низких частот (ФНЧ). Как уже было отмечено, анализ ИР производится в режиме постобработки, таким образом, требования к быстродействию и минимизации вычислительных ресурсов процедуры фильтрации допустимо считать практически отсутствующими. Поэтому синтез ФНЧ проведём на основе известного подхода [10, стр. 213, 215], [11, стр. 185], оперирующего прямым и обратным дискретным преобразованием Фурье (ДПФ и ОДПФ соответственно) [12, стр. 57].

Цель статьи: реализация программной процедуры цифровой фильтрации экспериментальных интерференционных рефлектограмм и анализ изменения дисперсии аддитивного шума.

Фурье-фильтрация интерференционных рефлектограмм

Процедуру фильтрации, основанную на выполнении прямого и обратного ДПФ [12], запишем следующим образом [11]:

$$x_{\text{ф}}(n) = F^{-1}\{\dot{X}_{\text{ир}}(k) \cdot H(k)\} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \dot{X}_{\text{ир}}(k) H(k) \exp\left(j2\pi \frac{n}{N} k\right),$$

$$\dot{X}_{\text{ир}}(k) = F\{x_{\text{ир}}(n)\} = \sum_{n=0}^{N-1} x_{\text{ир}}(n) \exp\left(-j2\pi \frac{n}{N} k\right), \quad (1)$$

$$H(k) = \text{rect}(k) + \text{rect}(k - (N - 1 - K_{\text{гр}})),$$

$$\text{rect}(k) = \begin{cases} H_0, & k \in [0, K_{\text{гр}}), \\ 0, & k \notin [0, K_{\text{гр}}); \end{cases}$$

где $F\{\cdot\}$ и $F^{-1}\{\cdot\}$ – операторы прямого и обратного ДПФ соответственно; $\dot{X}_{\text{ир}}(k)$ – комплексный спектр фильтруемой ИР $x_{\text{ир}}(n)$, содержащей N отсчётов; $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; $H(k)$ – дискретная функ-

ция, определяющая частотную характеристику получаемого фильтра и учитывающая повторение спектра ИР; $\text{rect}(k)$ – прямоугольная функция, принимающая фиксированное значение $H_0 > 0$ на интервале частотных выборок $k \in [0, K_{\text{гр}})$, что соответствует частотной характеристике ФНЧ с граничной частотой $\omega_{\text{гр}}$, регулируемой параметром $K_{\text{гр}} = \text{const}$.

Разработанная процедура цифровой фильтрации на основе (1) применена для постобработки экспериментально полученных ИР [7; 9] с целью нейтрализации действия аддитивного шума. На рис. 2, 4 показаны сегменты одной из интерференционных рефлектограмм [7], зарегистрированной вблизи водной поверхности и участка суши. На представленных сегментах заметно присутствие шумовой компоненты, влияние которой затрудняет изучение и анализ ИР. Амплитудный спектр рассматриваемой ИР [7] впервые получен в [8], что позволило обоснованно выбрать граничную частоту ФНЧ. Результаты цифровой фильтрации сегментов данной ИР представлены соответственно на рис. 3, 5. На рис. 6 показан сегмент интерференционной рефлектограммы [9], зарегистрированной вблизи замёрзшей поверхности замкнутого водоёма. На рис. 7 представлен этот же сегмент, но после преобразований (1).

Как видно из рис. 3, 5, 7, разработанная процедура цифровой фильтрации (1) обеспечивает визуально заметное снижение влияния шумовой компоненты, что делает возможным изучение и анализ поражённых шумом сегментов интерференционных рефлектограмм. Далее, проанализируем и количественно охарактеризуем эффективность реализованной процедуры фильтрации (1).

Анализ трансформации дисперсии аддитивного шума при прохождении процедуры фильтрации

Эффективность процедуры Фурье-фильтрации (1) оценим коэффициентом снижения дисперсии шума, который определим отношением дисперсии входного аддитивного шума к дисперсии выходного шума $\mu = \sigma_{\text{вх}}^2 / \sigma_{\text{вых}}^2$. Известно, что дисперсия шума с энергетическим спектром $W(\omega)$ в полосе частот $\Delta\omega$ определяется по теореме Винера-Хинчина [13, стр. 103, 191], [14, стр. 167]:

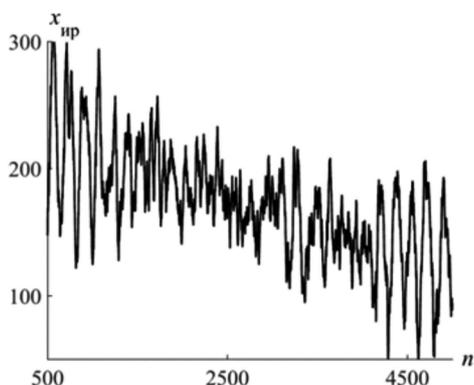


Рис. 2. Сегмент зашумлённой ИР [7]

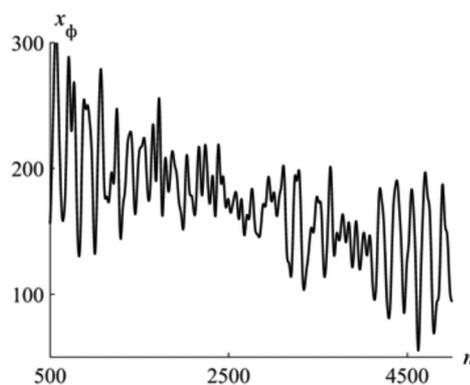


Рис. 3. Сегмент отфильтрованной ИР

По осям ординат отложены значения исходных и отфильтрованных ИР в отн. ед.; по осям абсцисс отложены номера временных выборок

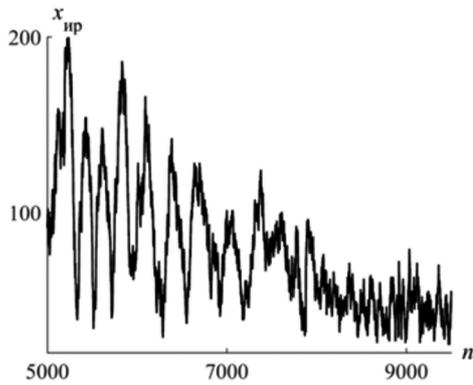


Рис. 4. Сегмент зашумлённой ИР [7]

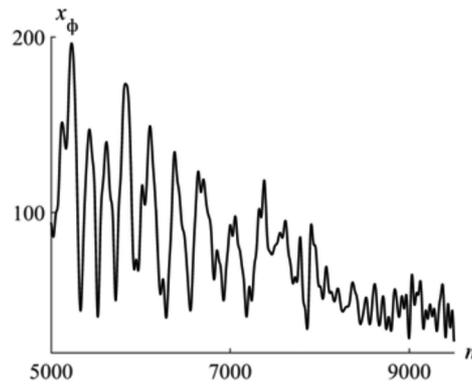


Рис. 5. Сегмент отфильтрованной ИР

По осям ординат отложены значения исходных и отфильтрованных ИР в отн. ед.;
по осям абсцисс отложены номера временных выборок

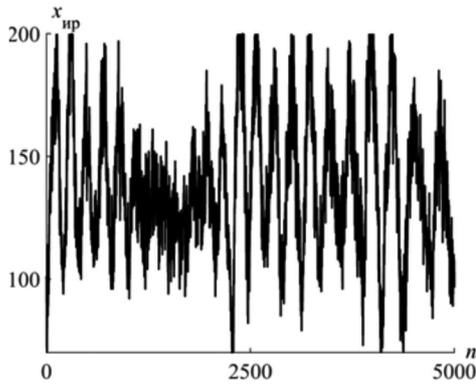


Рис. 6. Сегмент зашумлённой ИР [9]

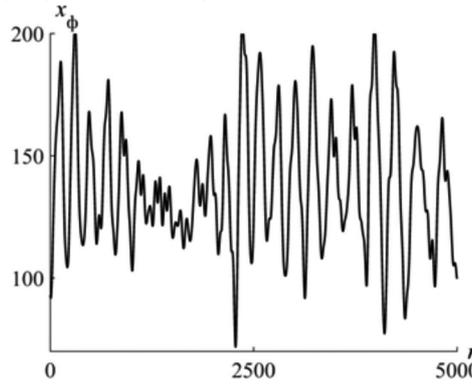


Рис. 7. Сегмент отфильтрованной ИР

По осям ординат отложены значения исходных и отфильтрованных ИР в отн. ед.;
по осям абсцисс отложены номера временных выборок

$$\sigma^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} W(\omega) d\omega = \frac{W_0}{\pi} \int_0^{\Delta\omega} d\omega = \frac{W_0}{\pi} \Delta\omega, \quad (2)$$

где $W_0 = const$ – спектральная плотность мощности шума, рассматриваемая в полосе частот $\Delta\omega = \omega_d / 2$, ограниченной по причине дискретного характера ИР, экспериментально полученной с шагом $T_d = f_d^{-1} = 2\pi / \omega_d$ ($\omega_d = 2\pi f_d$) – частота дискретизации). Реализуемый в статье частный случай фильтрации (1), предполагающий наложение прямоугольного частотного окна ($H_0 = 1$), для проведения анализа по (2) будем считать соответствующим ФНЧ с идеальной характеристикой [14, стр. 338] и граничной частотой $\omega_{гр} = 2\pi f_{гр}$. Тогда полоса частот выходного шума, очевидно, равна $\Delta\omega = \omega_{гр}$. С учётом вышесказанного, на основе (2) запишем искомое отношение дисперсий:

$$\mu_1 = \frac{\sigma_{вх}^2}{\sigma_{вых1}^2} = \frac{\frac{1}{2} \frac{W_0}{\pi} \omega_d}{\frac{W_0}{\pi} \omega_{гр}} = \frac{\omega_d}{2\omega_{гр}} = \frac{f_d}{2f_{гр}}. \quad (3)$$

Как видно из (3), эффективность фильтрации, характеризуемая обозначенным отношением дисперсий, зависит от частоты дискретизации ИР и граничной частоты ФНЧ – процедуры (1). С учётом того обстоятельства, что при реализации процедуры (1) граничная частота задаётся в виде целого числа частотных выборок $K_{гр}$, выражение (3) уточняется следующим образом:

$$\tilde{\mu}_1 = \frac{N}{2K_{гр}} = \frac{N}{2 \left[\frac{f_{гр} N}{f_d} \right]_{окр}}, \quad K_{гр} = \left[\frac{f_{гр}}{\Delta f_a} \right]_{окр}, \quad \Delta f_a = \frac{f_d}{N}, \quad (4)$$

где Δf_a – шаг анализа по частоте при вычислении ДПФ в (1); $[\cdot]_{окр}$ – оператор округления до ближайшего целого числа; остальные обозначения имеют прежний смысл.

В случае применения в (1) оконной функции вида $\sqrt{1 + (\omega / \omega_{гр})^2}$, соответствующей частотной характеристике простейшего аналогового прототипа [14, стр. 338], для отношения дисперсий в полосе частот $\Delta\omega = \omega_d / 2$ с учётом (2), (3) запишем:

$$\mu_2 = \frac{\sigma_{вх}^2}{\sigma_{вых2}^2} = \frac{\frac{1}{2} \frac{W_0}{\pi} \omega_d}{\frac{W_0}{\pi} \int_0^{\omega_d/2} \frac{1}{1 + (\omega / \omega_{гр})^2} d\omega} = \frac{\omega_d}{2\omega_{гр}} \frac{1}{\arctg(\omega_d / 2\omega_{гр})} = \mu_1 \frac{1}{\arctg(\mu_1)}. \quad (5)$$

Выражение в знаменателе (5) сводится к таблично-му интегралу [15, стр. 28], а полученный при интегрировании результат согласуется с [14, стр. 214].

Обсуждение результатов

Визуальное сравнение сегментов зашумлённых ИР (рис. 2, 4, 6) и отфильтрованных ИР (рис. 3, 5, 7) пока-

зывает явную заметность проведённой цифровой селекции детерминированной компоненты. Эффективность процедуры фильтрации (1), характеризуемая (3), (4), при $N \approx 10^3 \cdot 10^4$ и условиях получения ИР [7], а также особенностях их амплитудных спектров [8], оценивается снижением дисперсии шума на величину порядка $\mu_1 = 25$ ($10 \lg \mu_1 \approx 14$ дБ). Сравнение (3) и (5) ожидаемо показывает, что ФНЧ с частотной характеристикой прямоугольной формы выигрывает в величине отношения дисперсий $\mu_1 > \mu_2$ в сравнении с рассмотренным в (5) простейшим аналоговым прототипом: $\mu_1 / \mu_2 = \arctg(\omega_d / 2\omega_{\text{гп}})$. Для рассматриваемых условий отношение дисперсий (5) составляет $\mu_2 = 16$ ($10 \lg \mu_2 \approx 12$ дБ). Оценки (3), (5) проверены имитационным моделированием процедуры (1), показавшим хорошее совпадение теории и вычислительного эксперимента. Оценки отношения дисперсий (3) и (4) отличаются несущественно.

Как видно, анализ показывает, что при усложнении формы оконной функции наблюдается некоторое ухудшение коэффициента $\mu = \sigma_{\text{вх}}^2 / \sigma_{\text{вых}}^2$, что и обосновывает применение в (1) гест-окна. Соображения общего характера, а также проведённый анализ (3), (5), небезосновательно позволяют предполагать, что дальнейшее усложнение оконной функции (повышение порядка фильтра) будет способствовать снижению разностей между отношением (3) и соответствующими отношениями дисперсий шума на входах и выходах получаемых фильтров. Иными словами, усложнение оконной функции в (5) будет способствовать повышению эффективности процедуры фильтрации (1), в пределе приближая её качество к оценке (3). Таким образом, реализованная процедура цифровой фильтрации повышает эффективность постобработки интерференционных рефлектограмм и представляется востребованной при исследовании свойств поверхностей различных природных объектов (к примеру – лес [3], лёд [5], вода [7]). Кроме того, процедура применима для снижения влияния шума, содержащегося в результатах измерений, производимых при слабом сигнале.

Заключение

В статье разработана процедура цифровой низкочастотной фильтрации интерференционных рефлектограмм за счёт перехода в частотную область, наложения частотного окна прямоугольной формы и возвращения к временной реализации. Проведена фильтрация экспериментальных ИР, содержащих аддитивный шум. Представлены зашумлённые и отфильтрованные сегменты ИР, иллюстрирующие положительное влияние реализованной фильтрации. Проведён анализ и получены аналитические выражения для оценки уменьшения дисперсии аддитивного шума, содержащегося в ИР. Разработанная процедура фильтрации повышает эффективность постобработки ИР, способствуя повышению качества изучения и анализа сегментов ИР, поражённых действием шума.

Литература

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
2. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems / eds. Pet.J.G. Teunissen, O. Montenbruck. – Springer International Publishing AG, 2017. – 1327 p.
3. Кашкин В.Б. Экспериментальное определение электрофизических параметров лесного покрова с использованием сигналов глобальных навигационных систем ГЛОНАСС и GPS / В.Б. Кашкин, В.И. Кокорин, В.Л. Миронов, С.В. Сизасов // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 7. С. 825-830.
4. GNSS Remote Sensing / S. Jin, E. Cardellach, F. Xie. New York, London: Springer Dordrecht Heidelberg, 2014. – 286 p.
5. Михайлов М.И. Измерение толщины льда на пресноводном пруде и реке с использованием сигналов ГЛОНАСС и GPS / М.И. Михайлов, К.В. Музалевский, В.Л. Миронов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 2. С. 167-174.
6. Падохин А.М. GNSS-рефлектометрия уровня Черного моря в экспериментах на стационарной океанографической платформе / А.М. Падохин, Г.А. Курбатов, М.О. Назаренко, В.Е. Смолов // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2018. № 4. С. 80-86.
7. Макаров Д.С. Использование сигналов навигационных спутников в мониторинге земных покровов / Д.С. Макаров, А.В. Сорокин, Д.В. Харламов // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 1. С. 8-19.
8. Сорокин А.В. Изменения амплитудно-временных зависимостей суперпозиции сигналов навигационных спутников в процессах отражения и рассеяния земными покровами / А.В. Сорокин, Е.В. Кузьмин // Енисейская фотоника – 2020: Тезисы докладов Первой Всероссийской науч. конф. с Междунар. уч. – Красноярск: Изд-во ИФ СО РАН, 2020. – 198 с. – С. 186-187.
9. Сорокин А.В. Рефлектометрия ледовых покровов при различных сезонных состояниях по сигналам навигационных спутников в L1-диапазоне / А.В. Сорокин, Е.В. Кузьмин, Д.С. Макаров, Д.В. Харламов // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы VII Междунар. науч. конф. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. – 328 с. – С. 286-289.
10. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников / С. Смит; пер. с англ. – М.: Додэка-XXI, 2012. – 720 с.
11. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / А.С. Глинченко. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. – 482 с.
12. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С.Л. Марпл.-мл.; пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
13. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.
14. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. для вузов / С.И. Баскаков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2000. – 462 с.
15. Таблицы неопределённых интегралов / Ю.А. Брычков, О.И. Маричев, А.П. Прудников. – 2-е изд., исправ. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 200 с.