

УДК 621.39.96

Вейвлетная фильтрация шумов в сигналах терагерцового импульсного спектрометра

Черномырдин Н.В., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

*Научные руководители: д.т.н., проф. Карасик В.Е.,
м.н.с. НОЦ «Фотоника и ИК-техника» Зайцев К.И.
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана,
kirzay@bmstu.com*

Существуют различные приложения терагерцовой (ТГц) импульсной спектроскопии [1] (медицинская диагностика [2], неразрушающая дефектоскопия [3], спектроскопия полупроводников [4]), требующие восстановления спектральных оптических характеристик среды $\tilde{n}(\nu_t)$ [5], профилей диэлектрической проницаемости объекта $\varepsilon(z)$ (ТГц томография) [4,6]. Восстановление указанных физических параметров связано с решением обратных задач ТГц импульсной спектроскопии, причем результаты восстановления во многом зависят от качества сигнала ТГц импульсного спектрометра (уровня цифровых шумов электронного тракта и других аддитивных помех) [5,7]. Зачастую для качественной регистрации сигнала, снижения уровня цифровых шумов осуществляется усреднение ансамбля его реализации, однако данный подход не всегда уместен из-за ограниченной долговременной стабильности параметров ТГц импульсного спектрометра [5]. В связи с отмеченным, актуальной является задача разработки метода высокоэффективной фильтрации сигналов ТГц импульсной спектроскопии.

В настоящей работе рассматривается метод подавления шумов в сигналах ТГц импульсной спектроскопии в вейвлетной области. Фильтрация, с использованием вейвлет-преобразования, имеет ряд преимуществ для данной задачи:

- форма вейвлета схожа с формой импульса ТГц импульсного спектрометра, а следовательно, вейвлетное разложение сигнала является наиболее емким его представлением;
- функции вейвлет-базиса локальны как во временной, так и в частотной области, что позволяет учитывать локальные особенности в спектре сигнала (пики, скачки).

В общем случае, коэффициенты прямого дискретного вейвлет-преобразования сигнала $s(t)$ получают путем скалярного произведения сигнала на вейвлет-базис $\psi_{mk}(t)$.

$$C_{m,k} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot \psi_{mk}(t) dt$$

Базис представляет из себя семейство функций полученных путем масштабирования и временного сдвига материнского вейвлета $\psi(t)$.

$$\psi_{mk}(t) = |a_0|^{m/2} \cdot \psi(a_0^m t - k), \quad m, k \in I, \quad \psi(t) \in L^2(R)$$

Тогда обратное дискретное преобразование для непрерывных сигналов при нормированном ортогональном вейвлетном базисе пространства:

$$s(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{m,k} \cdot \psi_{mk}(t)$$

Результаты вейвлетной фильтрации сигнала существенно зависят как от формы исходного сигнала, так и от используемого вейвлетного базиса. Таким образом, возникает задача выбора вейвлет-базиса, оптимального для обработки сигналов ТГц импульсного спектрометра. Для решения данной задачи мы воспользовались критериями описанными в работе [8], которые позволяют оценить схожесть вейвлет-базиса с исследуемым сигналом, а также погрешность, которая возникает при последовательном разложении сигнала в вейвлет-спектр. Используя данные критерии было выбрано несколько вейвлет-базисов наиболее удачных для обработки сигнала ТГц импульсного спектрометра.

В общем случае процедура фильтрации заключается в выборе порога для вейвлет-коэффициентов $C_{a,b}$, которыми представлен сигнал $s(t)$:

$$C_{a,b} = \begin{cases} C_{a,b}, & C_{a,b} > T \\ 0, & C_{a,b} < T \end{cases}$$

где T – определенное пороговое значение. Несколько общих методик для определения T описаны в работе [9]. В настоящей работе мы будем рассматривать и сравнивать следующие процедуры выбора порога:

- Минимаксный порог (*MiniMax*):

$$T_m = \begin{cases} 0, & n \leq 32 \\ 0.3936 + 0.1829 \cdot \log_2(n), & n > 32 \end{cases}$$

где n – число всех вейвлет коэффициентов. Пусть C – вектор, содержащий все вейвлет коэффициенты данного разложения, тогда n – длина этого вектора.

- Универсальный порог (*SqTwoLog*):

$$T_s = \sqrt{2 \cdot \ln(n)}$$

- Метод выбора порога ‘Rigrsure’:

$$S_{x2} = [\mathbb{S}(|C|)]^2,$$

где оператор $\mathbb{S}(x)$ располагает элементы вектора x в порядке возрастания.

$$r = \frac{1}{n} [n - 2 \cdot a_n + (\mathfrak{C}(S_{x2}) + b_n \cdot S_{x2})],$$

где $a_n = (1, 2, 3, \dots, n)$ и $b_n = (n - 1, n - 2, n - 3, \dots, 0)$ – векторы, $\mathfrak{C}(x)$ является оператором кумулятивной суммы вектора x , а операция $\cdot$ означает перемножение соответствующих элементов векторов.

Пусть $r(m) = \min\{r\}$ – минимальный элемент вектора r , а m - его коэффициент, тогда значение порога определяется по формуле:

$$T_r = \sqrt{S_{x2}(m)}$$

- Эвристический порог (‘Heursure’):

$$h = \sqrt{2 \cdot \ln(n)}$$

$$\eta = \frac{\|C\|^{2-n}}{n}$$

$$k = \frac{[\log_2(n)]^{1.5}}{\sqrt{n}}$$

$$g = \min\{T_r, h\}$$

где T_r – порог, выбранный по методу ‘Rigrsure’, тогда итоговое значение порога будет:

$$T_h = \begin{cases} h, & \eta < k \\ g, & \eta > k \end{cases}$$

Для решения задач выбора оптимального вейвлетного базиса и оптимального порога фильтрации использовались экспериментально полученные сигналы ТГц импульсного спектрометра и методы математического моделирования. На временной сигнал спектрометра $E(t)$ накладывался искусственный аддитивный шум. Затем к зашумленному сигналу применялась процедура вейвлет-фильтрации. Сравнение исходного сигнала с результатом вейвлетной фильтрации на основе объективных критериев позволило оценить эффективность фильтрации [7].

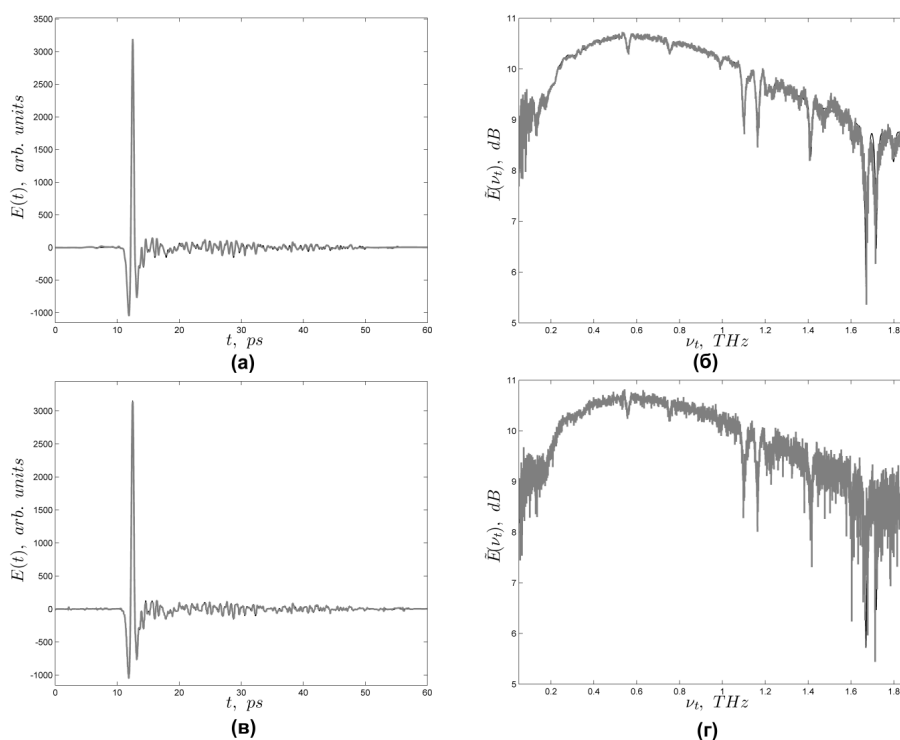
Сравнение идеального сигнала и сигнала, к которому применялась процедура вейвлетного подавления шумов, осуществлялось в Фурье-пространстве, так как именно информация области временных частот $\tilde{E}(\nu_t) = \mathcal{F}_t^{+1}\{E(t)\}$ чаще всего используется в качестве исходных данных для решения тех или иных задач ТГц импульсной спектроскопии. В качестве критериев оценки оптимальности фильтрации выбраны среднеквадратическое отклонение между спектром исходного и восстановленного сигналов:

$$\sigma_n(\psi_{a,b}(t), T) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\tilde{s}_{\text{исх}}^j(\nu_{t_i}) - \tilde{s}_{\text{восст}}^j(\nu_{t_i})|^2}$$

а также смещение оценки положения линии резонансного поглощения ТГц излучения парами воды $\nu_t = 1.7$ ТГц:

$$\delta_{\nu_t}^n(\psi_{a,b}(t), T) = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K (\nu_{t_i}^j - \nu_{t_i}'^j)$$

Данные критерии вычислялись для нескольких методов определения порога вейвлет-спектра и для выбранных наиболее оптимальных вейвлет-базисов. На основе полученных результатов были выбраны несколько пар вейвлет-порог, позволяющих наиболее эффективно отфильтровать шумы в сигналах ТГц импульсного спектрометра, не внося при этом искажений ни в форму временного сигнала $E(t)$, ни в его Фурье-спектр $\tilde{E}(\nu_t)$. На рисунке приведен результат восстановления сигнала ТГц импульсного спектрометра с использованием оптимальной (а,б) и неоптимальной (в,г) пары вейвлета и метода фильтрации. Очевидна существенная разница в результатах восстановления.



Таким образом, в настоящей работе разработан метод высокоэффективной фильтрации сигналов ТГц импульсного спектрометра в вейвлетной области.

Список литературы

1. Lee Y.-Sh. Principles of Terahertz Science and Technologies. N.-Y.: Springer, 2009. 347 p.
2. Zaytsev K.I., Kudrin K.G., Koroleva S.A., Fokina I.N., Volodarskaya S.I., Novitskaya E.V., Perov A.N., Karasik V.E., Yurchenko S.O. Medical diagnostics using terahertz pulsed spectroscopy // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 486, article number 012014. DOI: 10.1088/1742-6596/486/1/012014.
3. Yakovlev E.V., Zaytsev K.I., Fokina I.N., Karasik V.E., Yurchenko S.O. Nondestructive testing of polymer composite materials using THz radiation// Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 486, article number 012008. DOI: 10.1088/1742-6596/486/1/012008.
4. Zaytsev K.I., Chernomyrdin N.V., Alekhovich V.I. Novel technique for medium permittivity profile reconstruction using THz pulsed spectroscopy// Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 486, article number 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/486/1/012010.
5. Zaytsev K.I., Gavdush A.A., Karasik V.E., Alekhovich V.I., Nosov P.A., Lazarev V.A., Reshetov I.V., Yurchenko S.O. The accuracy of sample material parameters

- reconstruction with terahertz pulsed spectroscopy// Journal of Applied Physics. 2014. Vol. 115, article number 193105. DOI: 10.1063/1.4876324.
6. Zaytsev K.I., Karasik V.E., Fokina I.N., Alekhnovich V.I. Invariant embedding technique for medium permittivity profile reconstruction using terahertz time-domain spectroscopy// Optical Engineering. 2013. Vol. 52(6), article number 068203. DOI: 10.1117/1.OE.52.6.068203.
 7. Zaytsev K.I., Chernomyrdin N.V., Gorevoy A.V., Trofimov N.E., Fokina I.N., Alekhnovich V.I., Karasik V.E., Yurchenko S.O. An Approach for automatic construction of the wavelet-domain de-noising procedure for THz pulsed spectroscopy signal processing// Journal of Physics: Conference Series. 2014. № 486, article number 012034. DOI: 10.1088/1742-6596/486/1/012034.
 8. Pei J, Ye P, Xie W Optimal wavelet analysis for THz-TDS pulse signals// Proc. of SPIE. 2009. Vol. 7277, article number 727708. DOI: 10.1117/12.819905.
 9. Mallat S.G. A Wavelet Tour of Signal Processing. Paris: Elsevier, 2009. 832 p.