

В. Г. Главный^{1}, В. В. Рахманов¹, Г. В. Бакакин¹, В. Г. Меледин¹*

Способ фазового усреднения электронно-оптических сигналов

¹Институт теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: glavny@ngs.ru

Аннотация. Рассмотрен способ фазового усреднения сигналов с привязкой фронту электронно-оптического импульса на основе алгоритма constant fraction discrimination (CFD). Описанный алгоритм применен для выделения сигналов оптического энкодера калибровочной платформы для лазерных доплеровских анемометров КЛАД-1 с целью контроля скорости вращения калибровочного диска.

Ключевые слова: фазовое усреднение, дискриминация оптических импульсов, constant fraction discrimination

V. G. Glavnyi^{1}, V.V. Rakhmanov¹, G. V. Bakakin¹, V. G. Meledin¹*

A Method for Phase Averaging of Electro-Optic Signals

¹Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: glavny@ngs.ru

Abstract. A method for phase averaging of signals with reference to the front of an electron-optical pulse based on the constant fraction discrimination (CFD) algorithm is considered. The described algorithm is applied to extract signals from the optical encoder of the calibration platform for laser Doppler anemometers KLAD-1 in order to control the rotation speed of the calibration disk.

Keywords: phase averaging, signal detection, constant fraction discrimination

Введение

При проектировании калибровочной платформы КЛАД-1 возникла задача выделения и подсчета оптических импульсов датчика оборотов и оптического энкодера (датчика угловой скорости) [1]. Для выделения импульсов обычно используют метод сравнения сигнала от фотоприемника с заранее установленным порогом. Основной недостаток данного метода заключается в том, что показания оптического энкодера могут зависеть от амплитуды и формы сигнала. Для энкодеров, изготовленных в заводских условиях, с высокой степенью повторяемости отражающих штрихов пороговый метод практически не вносит погрешности. Однако в случае различных светорассеивающих свойств отдельных штрихов, необходимо учитывать вариацию сигнала из-за разного значения амплитуды зарегистрированных сигналов.

Похожие задачи выделения фронта импульса часто встречаются на практике. К подобным задачам относят измерение времени отраженного сигнала лидара [2, 3], измерение времен флуоресценции и фосфоресценции материалов [4], датчики фотоплетизмограммы для анализа сердцебиения [5]. Для выделения

фронта импульса могут использоваться различные методы детектирования, например: пересечение порогов; constant fraction discrimination (CFD); параметрическая оптимизация; корреляционные методы; согласованная фильтрация [2, 5].

При разработке калибратора КЛАД-1 были рассмотрены несколько методов выделения фронта электронно-оптического сигнала, один из них рассмотрен в этой работе.

Описание метода

Измерение времени между штрихами энкодера подобно измерению времени в импульсных лазерных лидарах. В лидарах чаще всего используют преобразователи время-напряжение (time-to-amplitude converter), выход которых пропорционален задержке между двумя импульсами [1, 2]. На рис. 1 показан принцип измерения расстояния с помощью импульсного лидара. Время между зондирующим и отраженным импульсами пропорционально расстоянию. Чаще всего, для выделения импульса используется аналоговый или цифровой constant fraction discrimination (CFD) детектор импульса.

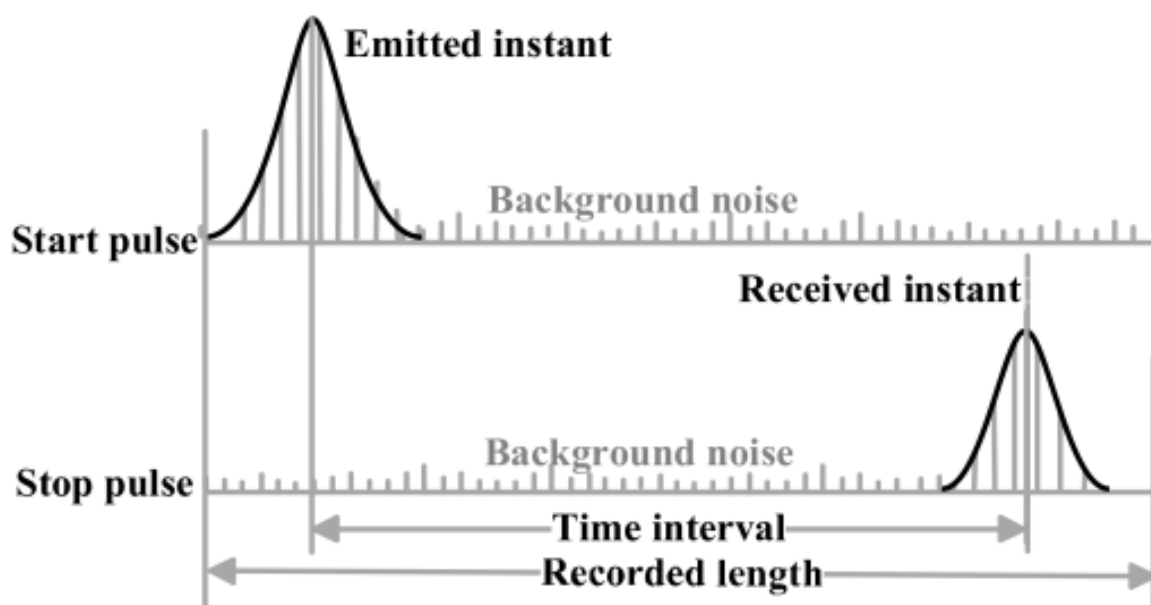


Рис. 1. Принцип работы импульсного лидара [2]

В сравнении с простым пороговым детектором, CFD детектор значительно снижает ошибки измерения времени прихода импульса, так как его показания не зависят от амплитуды импульса [6]. Фильтр CFD детектора описывается функцией:

$$g(t) = y(t - T_d) - F \cdot y(t),$$

где F – коэффициент дискриминации; T_d – задержка исходного сигнала. Для положительного импульса $y(t)$, с длительностью фронта T_p , на выходе фильтра будет биполярный сигнал $g(t)$, который переходит через ноль в момент времени T_0 , зависящий только от параметров F и T_d и не зависящий от амплитуды импульса.

Зондирующий и отраженный импульсы лазерного лидара описывается гауссовой функцией:

$$f(t, a, b, c) = a \cdot \exp \left\{ - \left(\frac{t - b}{c} \right)^2 \right\}.$$

Для такого импульса сигнал на выходе CFD детектора пересекает ноль в момент времени:

$$t_{cfd} = b + \frac{c^2 \ln F + T_d^2}{2T_d}.$$

Преимуществом CFD детектора является простота реализации и малый фазовый шум на выходе, что необходимо для измерения времени между импульсами или для когерентного накопления сигнала. К недостаткам можно отнести чувствительность этого детектора к форме сигнала и ширине импульса. Кроме чувствительности к форме и ширине импульса, CFD детектор чувствителен к постоянному смещению dc на входе и к форме сигнала. Если на вход детектора подать сигнал $y'(t) = y(t) + dc$, то выход детектора будет смещен на величину $dc \cdot (1 - F)$. При значительном смещении, выход детектора надо сравнивать не с нулем, а с этой величиной. На практике это редко бывает проблемой, в случае больших смещений используют комбинацию ВЧ-фильтра и цепь восстановления постоянной составляющей сигнала (dc restoration circuit).

На рис. 2 показаны два сигнала, отличающиеся только амплитудным множителем, и выход CFD детектора для них. Как видно, выход CFD детектора нечувствителен к амплитуде сигнала в области перехода через ноль. На рис. 3 показана реакция детектора для импульсов разной ширины. В работе [7] приведен полный анализ чувствительности выхода CFD к шуму и к вариациям ширины или амплитуды гауссова импульса.

Практическое использование

Было проведено сравнение CFD с алгоритмом согласовано избирательной фильтрации (СИФ), с последующим поиском максимума выхода СИФ [1, 8].

Результаты сравнения согласуются с работой [2], в которой сравнивались пять методов выделения гауссова импульса в отраженном сигнале лазерного лидара. Систематическое смещение показаний CFD детектора сравнимо с детекторами на основе поиска максимума сигнала. Рассмотренный CFD детектор имеет преимущества: нечувствительность к амплитуде, простота реализации (аналого-

вым или цифровым образом), очевидный способ выбора порога сравнения перехода через ноль, возможность линейной аппроксимации области перехода через ноль.

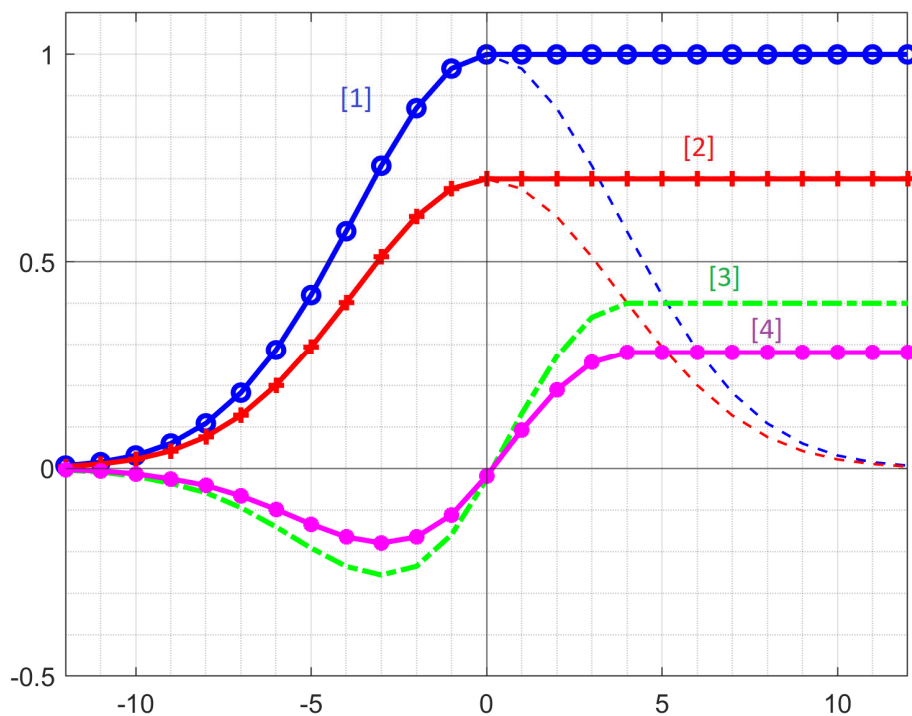


Рис. 2. Отклик CFD детектора на сигнал разной амплитуды: 1 – входной сигнал с гауссовым фронтом ($a=1; b=0; c=5$), 2 – входной сигнал ($a=0,7; b=0; c=5$), 3 – отклик CFD(0,6; 5,3) на сигнал 1; 4 – отклик CFD(0,6; 5) на сигнал 2

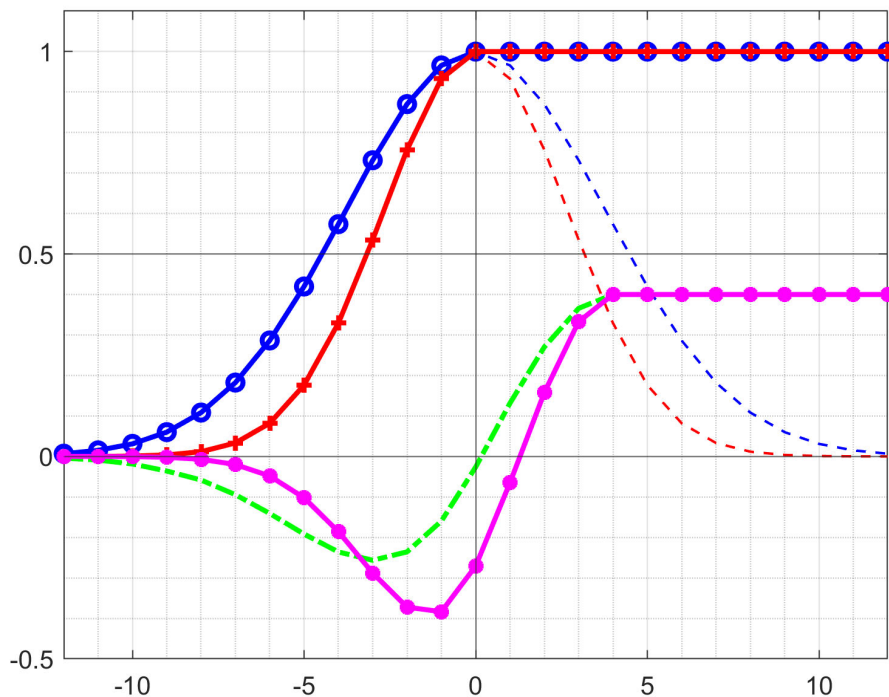


Рис. 3. Реакция CFD(0,6; 5) на импульсы разной ширины: $c=5,3; c=3,8$

Заключение

В работе рассмотрен CFD алгоритм для выделения фронта импульса электронно-оптических сигналов. Этот алгоритм имеет простую практическую реализацию. Характеристики рассмотренного алгоритма сравнимы с непараметрическими и параметрическими алгоритмами поиска максимума импульса. Этот алгоритм был применен для фазового усреднения угловой скорости вращения в энкодере калибровочной платформы КЛАД-1 с целью контроля скорости вращения калибровочного диска. Измеренные отклонения лежат в пределах $\pm 0,01$ % от средней скорости вращения калибровочного диска и позволяют выполнять высокоточную калибровку лазерных доплеровских измерительных комплексов.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Главный В.Г., Рахманов В.В., Двойнишников С.В., Кротов С.В., Меледин В.Г. Контроллер калибровочной платформы лазерного доплеровского измерителя скорости // Тезисы докладов VI Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (ТФГ2021) с элементами школы молодых ученых, Севастополь, Республика Крым, 22–29 августа 2021. – С. 212.
2. Li X, Yang B, Xie X, Li D, Xu L. Influence of Waveform Characteristics on LiDAR Ranging Accuracy and Precision. *Sensors* (Basel). 2018 Apr 10;18(4):1156. Doi: 10.3390/s18041156. PMID: 29642639; PMCID: PMC5948876.
3. Yoshioka, Kentaro. (2022). A Tutorial and Review of Automobile Direct ToF LiDAR SoCs: Evolution of Next-Generation LiDARs. *IEICE Transactions on Electronics*. E105.C. 10.1587/transele.2021CTI0002.
4. Estrera, Joseph & Bell, Michael & Johnson, Matthew. (2010). Single and Multiple Event Temporal Response Characteristics of Ungated I(2) Tube Systems. 10.1117/12.851077.
5. Han D, Bashar SK, Lázaro J, Mohagheghian F, Peitzsch A, Nishita N, Ding E, Dickson EL, DiMezza D, Scott J, Whitcomb C, Fitzgibbons TP, McManus DD, Chon KH. A Real-Time PPG Peak Detection Method for Accurate Determination of Heart Rate during Sinus Rhythm and Cardiac Arrhythmia. *Biosensors* (Basel). 2022 Jan 29;12(2):82. Doi: 10.3390/bios12020082. PMID: 35200342; PMCID: PMC8869811.
6. S. Garbolino, S. Martoiu and A. Rivetti, "Implementation of Constant-Fraction-Discriminators (CFD) in sub-micron CMOS technologies," 2011 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, Valencia, Spain, 2011, pp. 1530–1535, doi: 10.1109/NSSMIC.2011.6154364.
7. Li, X.; Wang, H.; Yang, B.; Huyan, J.; Xu, L. Influence of time-pickoff circuit parameters on LiDAR range precision. *Sensors* 2017, 17, 2369.
8. Фурман Я. А., Кревецкий А. В., Передреев А. К., и др. Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов // Физматлит, 2003. – С. 592.

© В. Г. Главный, В. В.Рахманов, Г. В. Бакакин, В. Г. Меледин, 2023