

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ СИГНАЛОВ ЧЕРЕНКОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

**С.В. Матаркин, А.А. Иванов**

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр СО РАН»,  
Якутск, Россия  
MatarkinSV@ikfia.ysn.ru

## RECONSTRUCTION OF CHERENKOV RADIATION SIGNALS, USING DIGITAL SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES

**S.V. Matarkin, A.A. Ivanov**

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS, Yakutsk, Russia  
MatarkinSV@ikfia.ysn.ru

**Аннотация.** В данной работе представлен способ оценки формы и мощности входного сигнала с помощью операции обращения свертки, одного из методов цифровой обработки сигналов. С его помощью можно оценить характер преобразования сигнала в цепи детектора. Это может быть полезно, например, при поиске источника проблемы с полезным сигналом. Также, если известны импульсные характеристики различных компонентов детектора, можно смоделировать путь сигнала.

**Ключевые слова:** черенковское излучение, цифровая обработка сигналов, обращение свертки.

**Abstract.** This paper presents a method for estimating the shape and power of the input signal using a deconvolution operation, one of the methods of digital signal processing. It can be used to evaluate the nature of the signal transform in the detector circuit. This can be useful, for example, when searching for the source of a problem with a useful signal. Also, if impulse responses of various components of the detector are known, we can model the signal path.

**Keywords:** cherenkov radiation, digital signal processing, deconvolution.

### ВВЕДЕНИЕ

Эффект Черенкова–Вавилова [Kobzev, 2010], более известное как черенковское излучение (ЧИ) является одним из самых информативных способов исследования характеристик широких атмосферных ливней (ШАЛ) от космических лучей высоких и сверхвысоких энергий [Grieder, 2010]. ЧИ обладает важными сведениями об электромагнитной компоненте ливня по всей глубине атмосферы. Для более точной оценки параметров э/м компоненты, а также ШАЛ, помимо количественной составляющей детекторов, требуется использование передовых решений в плане электроники, методов регистрации и обработки.

В данной работе использовался интегральный черенковский детектор [Матаркин, Тимофеев, 2019] с ФЭУ ET Enterprises 9266B, штатным предусилителем, и АЦП DRS4 с выбранной частотой дискретизации 1 ГГц. Ее характеристик достаточно для получения достаточно точной формы черенковского импульса. В ряде задач может потребоваться знание не только корректного выходного сигнала, но и входного. Методы цифровой обработки сигналов (ЦОС) могут помочь как в оценке входного воздействия, так и в моделировании прохождения сигнала через различные составляющие детектора.

### ОЦЕНКА ВХОДНОГО СИГНАЛА

Все компоненты детектора обладают свойством линейности. Линейность позволяет использовать всю мощь ЦОС в рамках данной работы. Совокупность линейных приборов, образующих детектор назовем системой. В эту систему, например, могут войти

фотоэлектронные умножители (ФЭУ), предусилители и усилители сигналов, аналого-цифровые преобразователи (АЦП), цифрово-аналоговые преобразователи.

Входной сигнал, то есть некое напряжение на аноде ФЭУ, вызванное пучком фотоэлектронов, проходя через систему, испытывает определенные преобразования. Сигнал на выходе АЦП является результатом совокупности преобразований. Знание импульсной характеристики позволяет оценить характер этих преобразований для любого входного воздействия. Импульсная характеристика — это реакция системы на дискретный аналог дельта-функции Дирака. В качестве нее были взяты отклики системы  $g(t)$  на темновые токи ФЭУ ET Enterprises 9266B (рис. 1).

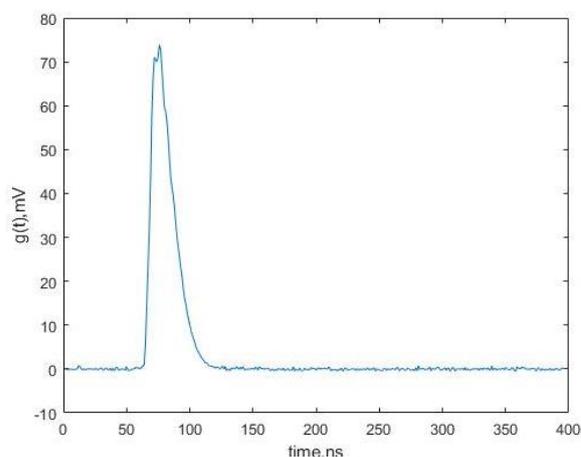


Рис. 1. Усредненный сигнал темнового тока ФЭУ от 25 измерений

Напряжение, подаваемое на ФЭУ не должно сильно превышать пороговое значение, при котором возникает темновой ток. Так темновой ток возникает от меньшего числа электронов. Поэтому он достаточно короткий по длительности, чтобы служить аналогом дельта-функции.

Оценка входного сигнала выполняется через обращение свертки  $\hat{f}_{in} = \hat{f}_{out} / g$ , операции обратной операции свертки в ЦОС, где шапка означает фурье-преобразование [Cooley, Tukey, 1965]. Обращение свертки удобнее всего выполнить в частотной области с переходом на полярную систему координат, поскольку так обращение свертки превращается в прос-

тые операции деления. Для этого по отношению к выходному сигналу  $f_{out}$  и импульсной характеристике  $g$  выполняется дискретное преобразование Фурье (ДПФ) или в качестве альтернативы быстрое преобразование Фурье (БПФ). Алгоритмы обращения свертки, прямого и обратного ДПФ, а также БПФ как более эффективного аналога ДПФ взяты из [Smith, 1999].

Белый шум во входном сигнале (рис. 2) подавляется фильтром нижних частот (ФНЧ). Полоса пропускания фильтра определяется в частотном представлении полученного входного сигнала. Остальные параметры ФНЧ определяются при его конструировании, и не сильно влияют на результат.

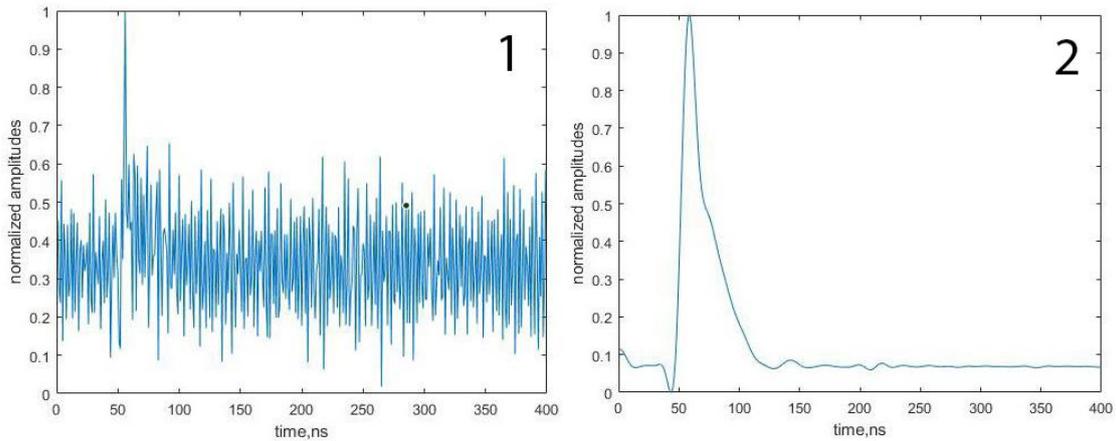


Рис. 2. 1 — результат обращения свертки без шумоподавления; 2 — после подавления шумов с помощью фильтра нижних частот

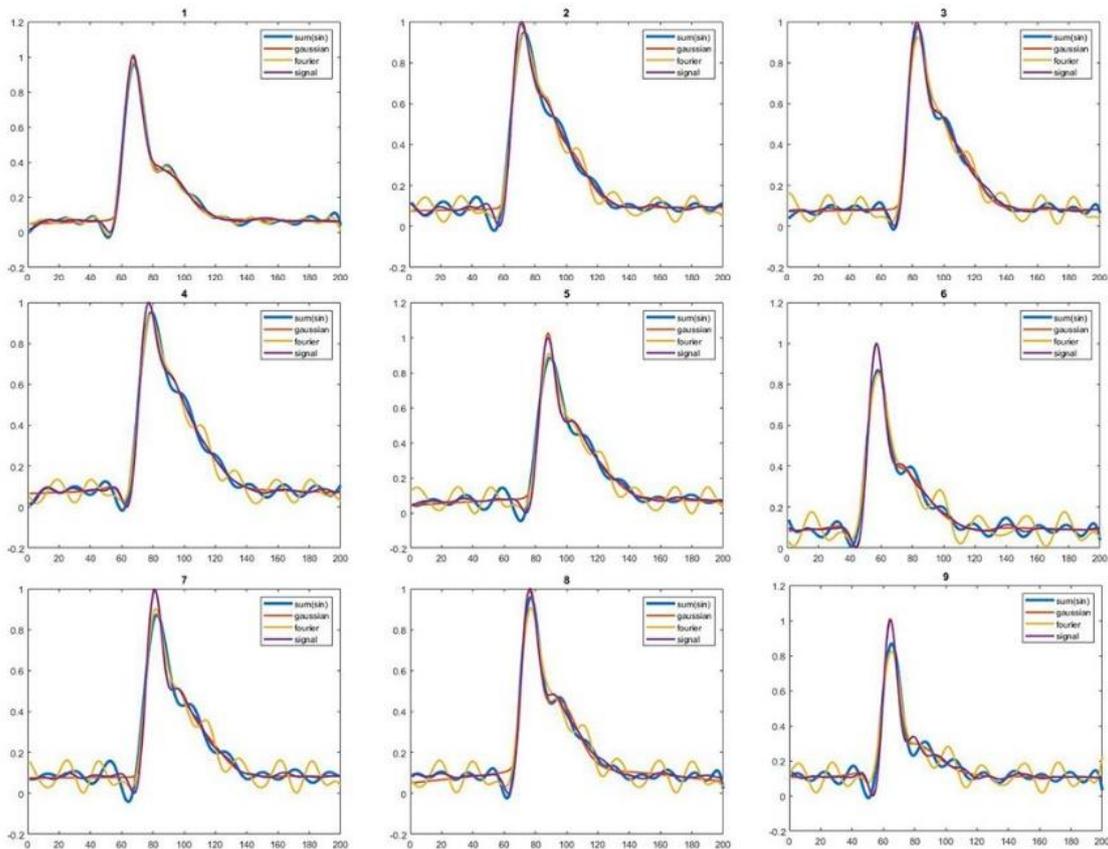


Рис. 3. Аппроксимации входного сигнала. По горизонтальной оси: время в наносекундах; по вертикальной:  $f_{in}(t)$  в нормированных единицах

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ КАК СПОСОБ АППРОКСИМАЦИИ СИГНАЛА

Полученные оценки входного сигнала можно аппроксимировать разными типами аналитических функций, среди которых тригонометрический ряд Фурье (1), функция Гаусса (2), ряд Фурье по синусам (3).

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^N (a_k \cos(kwx) + b_k \sin(kwx)), \quad (1)$$

$$f(x) = \sum_{k=1}^N a_k e^{-\frac{(x-b_k)^2}{c_k^2}}, \quad (2)$$

$$f(x) = \sum_{k=1}^N a_k \sin(b_k x + c_k), \quad (3)$$

где  $a_0, a_k, b_k, c_k$  — коэффициенты,  $w$  — некий постоянный коэффициент,  $N$  — порядок.

Все три типа приближения были выполнены для десяти результатов операции обращения свертки (рис. 3) от одного события ШАЛ (17.11.18 21:58:32) и разных событий темнового тока. В целях упрощения аппроксимации, все данные вне области импульса были удалены. Коэффициенты уравнений были вычислены в пакете прикладных программ Matlab. Сравнение длительностей импульсов на 0.5 уровня амплитуды приведено в таблице.

Длительности импульсов на его полуширине, нс

Номер канала	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ряд Фурье	16.05	27.76	24.34	28.02	22.92	17.9	23.17	20.04	13.75	25.58
Гауссова функция	16.05	27.76	23.34	28.02	15.02	12.94	14.14	15.02	10.72	23.5
Сумма синусов	16.05	29.77	25.34	31.03	21.99	16.91	20.18	15.02	13.75	29.67
Без аппроксимации	15.06	25.76	22.32	28.02	16.02	12.94	14.14	14.03	10.72	26.62

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка входного сигнала была получена с помощью операции обращения свертки. Было показано, что достаточно короткие импульсы темнового тока ФЭУ могут служить в качестве аналога дельта-функции Дирака. Для подавления белого шума был использован фильтр нижних частот. Гауссова функция показала наилучшее соответствие с сигналом при аппроксимации.

Работа частично поддержана Президиумом РАН (программа 3), Сибирским отделением РАН (программа П.16.2.3) и РФФИ (проект № 16-29-13019).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Матаркин С.В., Тимофеев Л.В. Детектор черенковского излучения ШАЛ с высоким временным разрешением // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2019. Т. 83, № 5. С. 699–701.

Kobzev A.P. The mechanism of Vavilov-Cherenkov radiation // Physics of Particles and Nuclei. 2010. V. 41, iss. 6. P. 452–470.

Cooley J.W., Tukey J.W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series // Mathematics of Computation. 1965. V. 19, N 90. P. 297–301.

Smith S.W. The Scientist & Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California Technical Publishing. San Diego. 1999.

Grieder P.K.F. High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects. A Tutorial, Reference Manual and Data Book. 2010. V. 1. DOI: [10.1007/978-3-540-76941-5](https://doi.org/10.1007/978-3-540-76941-5).