



## Моделирование временного и электронного амплитудного разрешения гамма детекторов на основе LYSO сцинтилляторов для использования в установках обнаружения взрывчатых веществ, ядерных делящихся материалов работающих по методу меченого нейтрона.

*И.Г.Вавилова<sup>1</sup>, В.А.Соловей<sup>1</sup>, А.С.Федорова<sup>1</sup>, Ю.К.Колобов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> ФГБУ ПИЯФ НИЦ КИ<sup>2</sup> ОАО «НТЦ Ратэк»

Метод меченых нейтронов (ММН) состоит в облучении inspected объекта потоком нейтронов с энергией 14,1МэВ, образующихся в реакции  $d + t \rightarrow \alpha + n$  [1]. Принцип работы по методу меченых нейтронов представлен на рисунке 1. Источником нейтронов является портативный нейтронный генератор, например ИНГ-27, со встроенным многоканальным  $\alpha$ -детектором.

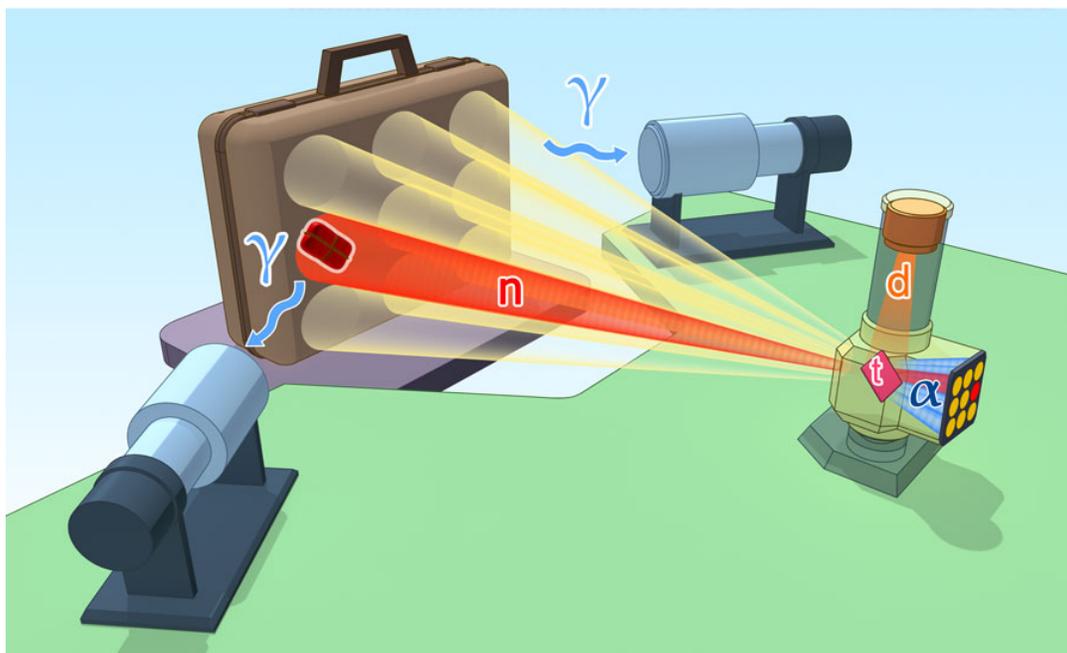


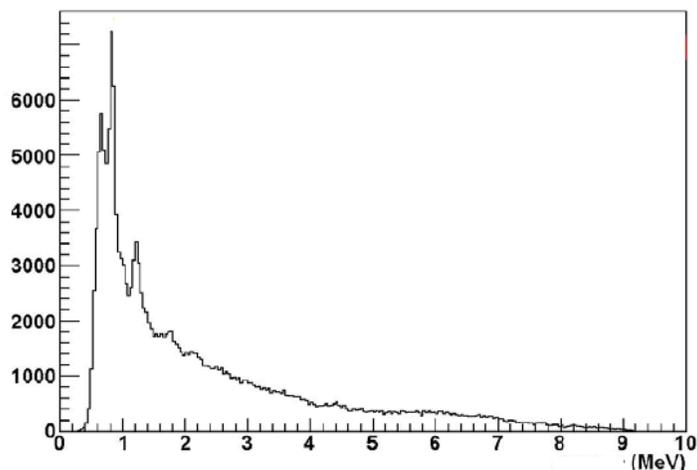
Рис.1. Метод меченых нейтронов. (<http://ntech.jinr.ru/index.php?id=about&content=method>)

Исследуемый объект облучается нейтронами с энергией 14,1МэВ, скорость нейтрона при такой энергии составляет 5,1см/нс. Энергия  $\alpha$ -частиц составляет 3,5МэВ. Нейтроны, проходя через объект, порождают  $\gamma$ -кванты в реакции неупругого рассеяния на ядрах  $A(n,\gamma)A$ . Измеряется временной интервал между моментами регистрации  $\alpha$ -

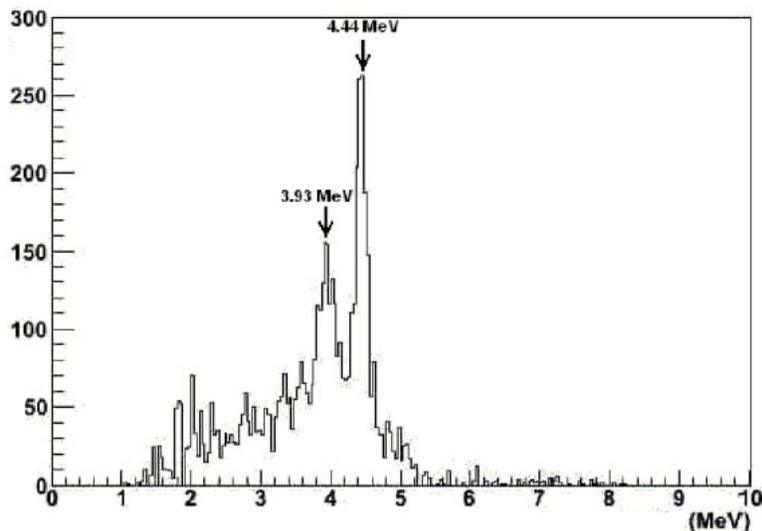


частицы и  $\gamma$ -кванта. Временной интервал определяет координату точки рождения  $\gamma$ -кванта. Энергетический спектр  $\gamma$ -излучения содержит характеристические линии химических элементов, входящих в состав объекта. Эта информация позволяет построить трехмерное изображение объекта и определить его элементный состав (C,N,O,...).

Временное разрешение прибора напрямую влияет на пространственное разрешение и пределы обнаружения и является одним из важнейших параметров прибора. Использование ( $\alpha$ - $\gamma$ )-совпадений приводит к существенному подавлению фона, что значительно облегчает идентификацию исследуемого объекта.



1. Суммарный энергетический спектр характеристического  $\gamma$ -излучения контейнера содержащего графитовый образец.  
([http://www.euritrack.org/Anglais/Tagged%20Neutron%20Inspection%20System%20\(TNIS\)%20development.pdf](http://www.euritrack.org/Anglais/Tagged%20Neutron%20Inspection%20System%20(TNIS)%20development.pdf))





2. Энергетический спектр характеристического  $\gamma$ -излучения контейнера содержащего графитовый образец при использовании ( $\alpha$ - $\gamma$ )-совпадений.  
([http://www.euritrack.org/Anglais/Tagged%20Neutron%20Inspection%20System%20\(TNIS\)%20development.pdf](http://www.euritrack.org/Anglais/Tagged%20Neutron%20Inspection%20System%20(TNIS)%20development.pdf))

Рассмотрим основные методы цифровой привязки корнями уходящие в аналоговую форму и поэтому не требующие значительной вычислительной мощности.

### **1. Led – LeadingEdgeDiscriminator (привязка по пересечению постоянного порогового значения) - полная аналогия аналогового дискриминатора нижнего уровня.**

Привязка по переднему фронту импульса осуществляется с помощью порогового устройства, которое срабатывает при достижении входным сигналом определенного уровня (уровня дискриминации).

Недостаток – зависимость отметки временной привязки от амплитуды сигнала, значительный временной джиттер при больших значения порога, например порог стоит на полувысоте максимального значения амплитуды входных импульсов – джиттер равен половине длительности переднего фронта сигнала.

Временное разрешение при использовании цифрового метода можно улучшить если корректировать время прихода сигнала с учетом его:

- Амплитуды или заряда (LUT таблица для хранения коэффициентов)
- Длительности времени превышения порога (LUT таблица для хранения коэффициентов)

### **2. CFD (ConstantFractionDiscriminator ).**

По сути это первый метод в котором величина порога меняется в зависимости от амплитуды приходящего сигнала. Нет зависимости от амплитуды сигнала есть зависимость от длительности переднего фронта сигнала.

Усложнение по сравнению с 1 - необходимо вычислять амплитуду входного сигнала. В русскоязычной литературе аналоговый метод получил название дискриминации со следящим порогом.

Использование обычного CF-дискриминатора позволяет избавиться от амплитудной зависимости временной привязки.

### **3. ISA – InitialSlopeApproximation (аппроксимация наклона переднего фронта сигнала).**

Алгоритм работы простоя находятся точки выше порога между ними проводится прямая, место пересечения этой прямой с базовой линией – есть временная



отметка. В первом приближении временной джиттер исключен если нет вариации длительности переднего фронта и высокое соотношение сигнал-шум.

#### 4. ARC-CFD (Amplitude and Rise Time Compensated Constant Fraction Discriminator)

или Дискриминатор со следящим порогом и компенсацией времени нарастания импульса.

В этом методе влияние разброса времени сбора на точность стробирования уменьшается за счет некоторого увеличения влияния на него шумов. Следящий порог выставляется так же, как и в стандартном CF-методе (20%-30% от амплитуды), при этом задержка  $t_d$  заметно уменьшается и устанавливается равной приблизительно 30% от минимального времени нарастания.

$$t_d < t_{\min}(1 - f),$$

где  $t_{\min}$  - минимальное время нарастания входного импульса. Положение нулевой точки определяется соотношением

$$t_{\text{ARC}} = t_d / (1 - f).$$

Эффективная фракция амплитуды  $f_{\text{eff}}$ , к которой осуществляется временная привязка ARC-методе, в случае линейных фронтов определяется соотношением

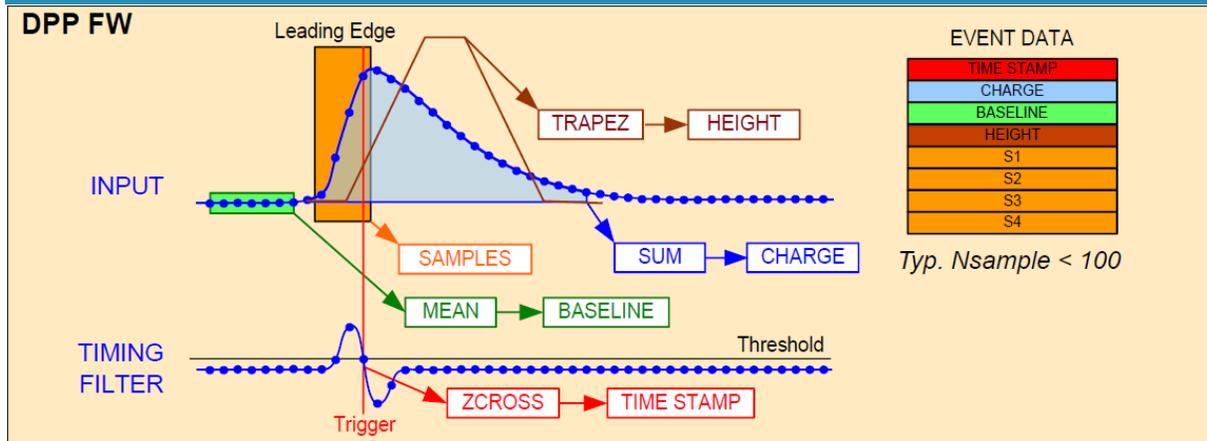
$$f_{\text{eff}} = f t_d / t_r (1 - f)$$

и всегда меньше  $f$ .

#### 5. Привязка по нулю биполярного импульса (Crossover Timing)

В этом методе временная метка получается фиксацией момента пересечения нулевого уровня биполярным сигналом. Момент пересечения нуля сигнала почти не зависит от его амплитуды. Таким образом, устройства, использующие этот способ временной привязки, могут работать в существенно более широком динамическом диапазоне, чем при использовании привязки по переднему фронту. В этом методе сохраняется зависимость момента пересечения нуля от формы сигнала детектора, не актуально для сцинтилляторов.

Рассмотрим далее временное разрешение, для простоты рассуждений примем что электронные шумы отсутствуют. Тогда временное разрешение будет определяться ошибкой квантования  $E_q$  и ошибкой интерполяции  $E_i$ . Из литературы известно, что при дискретизации аналогового сигнала с периодом  $T_s$  временное разрешение будет равно  $T_s / (12)^{1/2}$  или  $T_s / 3,46$ . При выполнении цифровых операций в FPGA нежелательно использовать операции с плавающей запятой. Пояснение классического цифрового решения для определения времени и амплитуды аналогового сигнала представлено ниже



Обычно в литературе разделяют два случая, длительность переднего фронт (Risetime) аналогового сигнала:

1. меньше 5 периодов дискретизации, тогда:

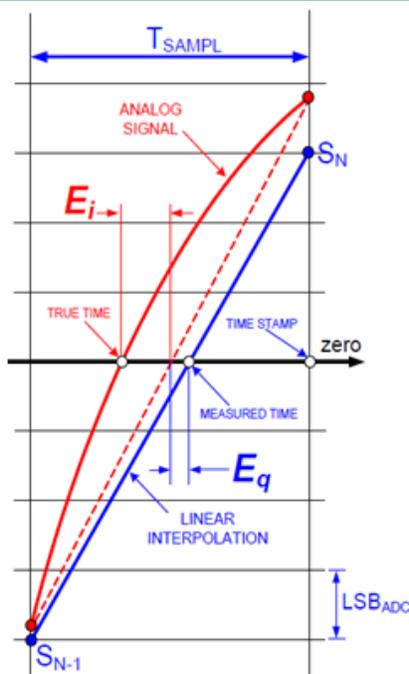
- временное разрешение пропорционально изменению амплитуды сигнала за  $T_s$ ,
- временное разрешение пропорционально числу бит АЦП
- линейная интерполяция работает хорошо,  $E_i \ll E_q$

2. больше 5 периодов дискретизации, тогда :

- временное разрешение пропорционально изменению амплитуды сигнала за  $T_s$ ,
- временное разрешение пропорционально числу бит АЦП
- линейная интерполяция работает плохо,  $E_i > E_q$

Рисунок поясняющий приведен ниже.

Когда фронт нарастания амплитуды выходного сигнала меньше  $5 \cdot T_s$ , следует учесть что ошибки интерполяции может изменяться значительно в зависимости от расхождения фазы сигнала с фазой тактовой частоты дискретизации, временной спектр может удвоиться.



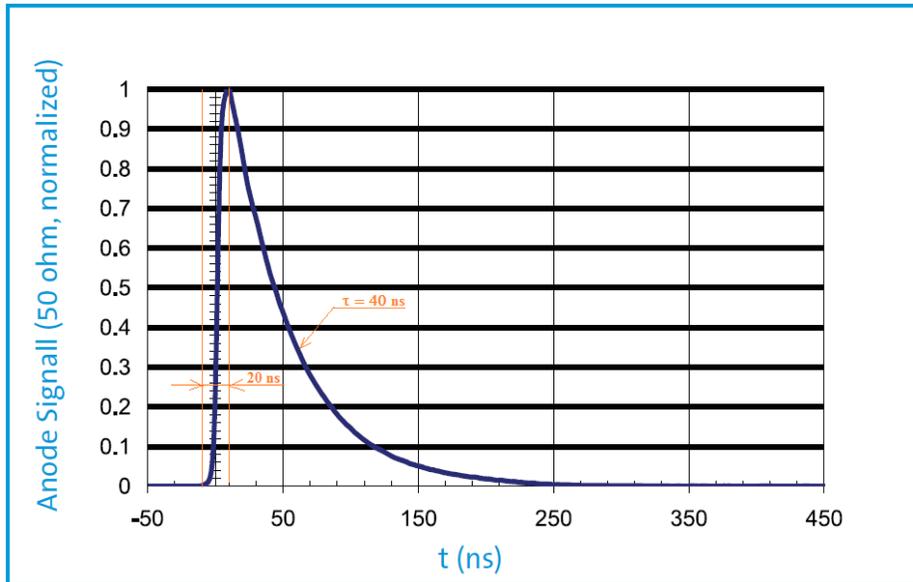
**В качестве детекторов гамма излучения используется LYSO кристалл.**

Ортосиликатлютеция легированный церием **LYSO**. Этот сцинтиллятор имеет сходные с **BGO** характеристики по энергетическому разрешению - от 7% до 11% по линии 662 кэВ. Плотность и эффективный атомный номер кристаллов **LYSO** также близки к характеристикам кристаллов **BGO** и, соответственно, сцинтилляторы **LYSO** имеют близкую, хотя и несколько большую, эффективность регистрации по сравнению с кристаллами **BGO**.

Основной недостаток кристаллов **LYSO** - высокая собственная радиоактивность, обусловленная наличием изотопа Lu-176.

#### **Свойства сцинтиллятора LYSO:**

Параметр	Значение
Плотность, г/см <sup>3</sup>	7.1
Ориентация кристалла	---
Твердость	5
Гигроскопичность	нет
Максимальная длина волны излучения, нм	420
Коэффициент преломления при максимальном излучении	1.81
Время спада, нс	41



PreLude<sup>TM</sup> 420 response to 511 keV with R3241 PMT

Передний фронт нарастания LYSO кристалла равен 15 нс, если учесть, что он должен быть больше  $5 \cdot T_s$ , отсюда делаем вывод что частота дискретизации должна быть не менее 500 МГц, а желательно выше.

Воспользуемся тем, что сигнал от детектора на базе кристалла LYSO имеет форму типа CUSP с линейным передним фронтом (длительность переднего фронта 15 нс, постоянная времени спада 41 нс) используем полученные результаты и попробуем осуществить временную привязку методом **Crossover Timing**.

При моделировании примем, что частота дискретизации 1 ГГц разрядность 12 бит, частота синтезированного сигнала поступающего на дигитайзер 100 ГГц разрядность 16 бит. Рассмотрим в начале сигнал типа Гаусс, дисперсия сигнала определяет его длительность по времени и ширину на полувысоте, временная привязка методом **Crossover Timing**, внешние шумы отсутствуют. Оценим влияние степени полинома интерполяции на ошибку определения точки пересечения нуля дифференцированного сигнала типа Гаусс (отметки временной привязки).



Вершина Гаусс сигнала сдвинута на половину периода частоты дискретизации.  
Результаты моделирования приведены в таблице ниже, ошибка дана в нс.

дисперсия	степень интерполяции полинома				ширина на полувысоте
	1	2	3	4	
2	-0,0053	-0,0038	-0,0065	-0,0431	4,7
3	-0,0051	-0,0044	-0,0044	-0,0034	7,06
4	-0,0051	-0,0047	-0,0048	-0,0056	9,4
5	-0,0050	-0,0048	-0,0049	-0,0053	11,76
10	-0,0050	-0,0049	-0,0050	-0,0050	23,54
25	-0,0050	-0,0050	-0,0050	-0,0050	58,86
50	-0,0050	-0,0050	-0,0050	-0,0050	117,74
100	-0,0050	-0,0050	-0,0050	-0,0050	235,48

Вывод – для уменьшения затрат вычислительной мощности и упрощения выполнения в FPGA в дальнейшем будем использовать линейную интерполяцию (полином 1 степени.)

Согласно данным ранее выполненной работы - при определении времени прихода сигнала предпочтительным выглядит такой вариант как предварительное сглаживание выходного сигнала фильтра методом локальной регрессии, далее дифференцирование сигнала и при переходе дифференцированного сигнала в область отрицательных значений, а ошибка определения времени составляет +/- один такт частоты дискретизации при выбранных параметрах. Используем это.

Воспользуемся методом взвешенной локальной регрессии. Каждой точке из набора значений выходного сигнала ставится в соответствие взвешенная сумма значений в точках, соседних с ней.

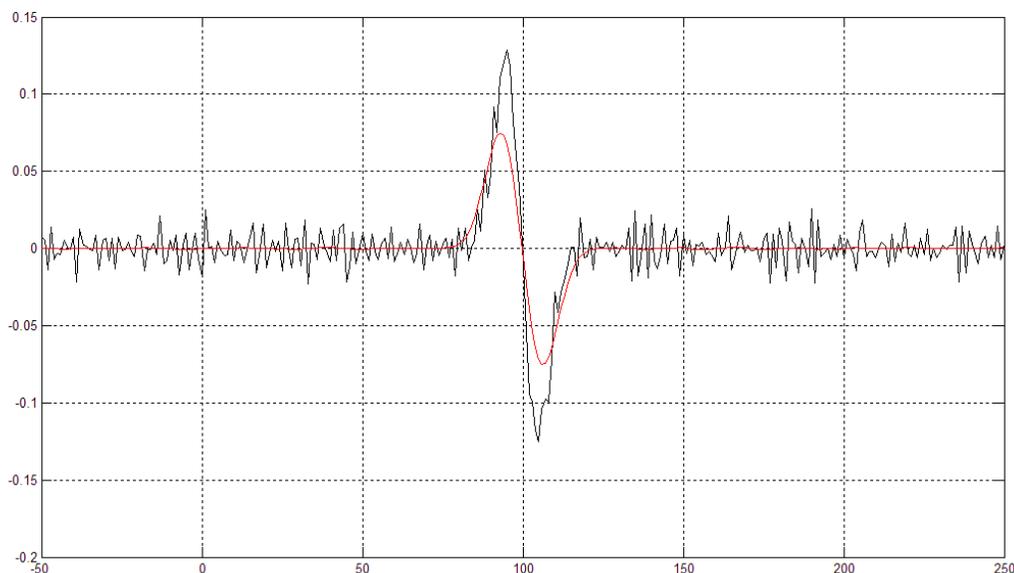
$$B_i = \sum_{j=-m}^m W_j A_{i+j}$$

где  $B_i$ - искомые значения сглаженного сигнала,  $2m + 1$ -количество точек, выбираемых для сглаживания,  $W_j$ - весовые коэффициенты, определяющиеся по следующему правилу:



$$W_j = \left[ 1 - \left| \frac{t_i - t_{i+j}}{d(t_i)} \right|^3 \right]^3$$

$t_i$ - момент времени, соответствующий значению  $A_i$ ,  $d(t_i)$ - расстояние от  $t_i$  до наиболее удаленной точки из набора точек, участвующих в суммировании.



На рисунке выше представлен черным цветом дифференцированный сигнал типа Гаусс при дисперсия 5 соотношение сигнал шум 20дб, красным цветом сглаженный сигнал типа Гаусс методом локальной регрессии по 20 точкам, а после дифференцированный. Вершина гауссового сигнала сдвинута на 0.5 периода частоты дискретизации.

### Моделирование

Сигнал типа CUSP с линейным передним фронтом (длительность переднего фронта 5, 10, 15, 20 нс, постоянная времени спада 41 нс, при соотношении сигнал шум 30дб, 40 дб – характерные величины для сигналов с ФЭУ) сдвигалась от 0.0 до 0.1 с шагом 0.1 тактового периода, частота дискретизации 1ГГц, 2ГГц, 5ГГц. При оценке выбиралась максимальная переменная ошибка. Постоянная составляющая ошибки не влияет на относительную точность измерения и не вносит временной джиттер – поэтому она удалена из окончательного результата. Результаты моделирования методом **Crossover Timing** приведены в таблице ниже.



итоговая таблица 1ГГц						
время нарастания нс	сигнал/шум дб	сглаживание точек				
		-	3	5	7	10
5	30	0,06	0,05	0,13	0,05	0,12
	40	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02
10	30	0,09	0,13	0,15	0,1	0,11
	40	0,04	0,02	0,05	0,04	0,03
15	30	0,16	0,12	0,22	0,14	0,17
	40	0,06	0,07	0,09	0,05	0,04
20	30	0,17	0,34	0,27	0,24	0,25
	40	0,06	0,06	0,04	0,07	0,06

итоговая таблица оцифровка 2ГГц							
время нарастания нс	сигнал/шум дб	сглаживание точек					
		-	3	5	10	15	20
15	30	0,18	0,17	0,24	0,15	0,19	0,06
	40	0,04	0,04	0,08	0,04	0,03	0,03

итоговая таблица оцифровка 5ГГц							
---------------------------------	--	--	--	--	--	--	--



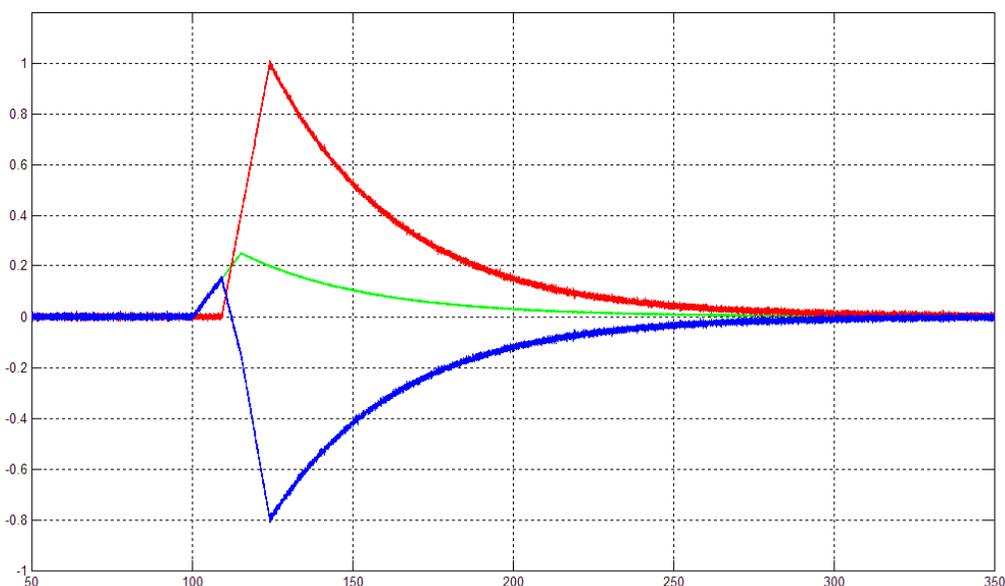
время нарастания нс	сигнал/шум дб	сглаживание точек					
		-	3	5	10	20	30
15	30	ND	ND	0,19	0,17	0,05	0,07
	40	0,1	0,04	0,04	0,03	0,05	0,04

**Выводы, для обеспечения точности временной привязки сигнала от детектора на базе кристалла LYSO с точностью не хуже 70 пс (при ошибке определения времени прихода двух сигналов 70пс – ошибка определения временного промежутка между этими двумя сигналами составит  $(70^2\text{пс}+70^2\text{пс})^{1/2}=100\text{пс}$  :**

- При соотношении сигнал шум 40 дб достаточно частоты дискретизации 1 ГГц и сглаживания по 7 или 10 точкам – теряем форму сигнала.
- При соотношении сигнал шум 30 дб достаточно частоты дискретизации 2 ГГц и сглаживания по 20точкам– теряем форму сигнала.
- При соотношении сигнал шум 30 дб достаточно частоты дискретизации 5 ГГц и сглаживания по 20точкам– теряем форму сигнала.

**Моделирование цифровой обработки сигналов с гамма-детектора на базе LYSO кристалла путем оцифровки сигналов 12 разрядным дигитайзером. Применение цифрового варианта ARC-CFD метода определения времени прихода события.**

Пояснение принципа работа метода ARC-CFD для сигналов от гамма детектора на основе LYSO сцинтиллятора приведены на рисунке ниже.



Принцип поясняющий красный задержанный на 9 тактов (9 нс) сигнал от LYSO отношение сигнал шум 30 дб, зеленый ослабленный в 4 раза (фракция 0.25), синий сигнал CFD. Без сглаживания.

### 12 разрядный дигитайзер работает на частоте 5ГГц.

Примем следующие условия: соотношение сигнал/шум –30дб;задержка для метода ARC-CFD – 9нс;длительность переднего фронта сигнала – 15нс;постоянная спада – 40нс; коэффициент пропускания прямого сигнала – 0,25 (для обработки в цифровой форме удобны числа кратные 2).

Используем 10 000 отсчетов моделирования, применяем сглаживание методом скользящего среднего по 12 точкам, так как увеличение количества точек сглаживания до 15 приводит к сдвигу положения пика временного разрешения при уменьшении фронта входного сигнала до 13 нс.

Применение 12 разрядного дигитайзера работающего на частоте 5ГГц при цифровой обработке сигналов от гамма квантов при использовании в качестве детектора LYSO сцинтиллятора, при соотношении сигнал/шум 30дб и сглаживании методом скользящего среднего по 12 точкам используя цифровой метод ARC-CFD позволяет получить временное разрешение  $FWHM = 70-80$ нс в динамическом диапазоне сигналов 1:20 и 10% джиттере длительности переднего фронта сигнала, **является достаточным**. Использование дигитайзера работающего на частоте 1ГГц и 2 ГГц при соотношении сигнал/шум 30дб временное  $FWHM = 160$ нс и  $FWHM = 110$ нс, соответственно, **что не достаточно**.



**Моделирование цифровой обработки сигналов с гамма-детектора на базе LYSO кристалла путем оцифровки сигналов 12 разрядным дигитайзером. Определение энергии гамма кванта после определения времени прихода события**

**Дигитайзер работает на частоте 5ГГц.**

Амплитудное разрешение. Определение энергии гамма кванта двумя способами:

максимального значения сигнала от детектора после сглаживания

определение площади сигнала от детектора после сглаживания.

Вывод электронного энергетического разрешения при дискретизации на частоте 5ГГц.

При динамическом диапазоне входных сигналов 1:20 и соотношении сигнал/шум 30дБ на входе 12 разрядного дигитайзера и применении сглаживания (используется алгоритм скользящего среднего по 12 отсчетам) метод определения максимального значения амплитуды сигнала дает FWHM на уровне 0,5%.

При динамическом диапазоне 1:20 входных сигналов от гамма детектора на основе LYSO сцинтилляторов и соотношении сигнал/шум 30дБ на входе 12 разрядного дигитайзера частоте дискретизации 5 ГГц и применении сглаживания (используется алгоритм скользящего среднего по 12 отсчетам) метод определения подсчете интегрального значения в пределах длительности переднего фронта 15нс+постоянная времени спада 40нс дает электронное FWHM на уровне 0.1%.

При динамическом диапазоне 1:20 входных сигналов от гамма детектора на основе LYSO сцинтилляторов и соотношении сигнал/шум 30дБ на входе 12 разрядного дигитайзера частоте дискретизации 5 ГГц и применении сглаживания (используется алгоритм скользящего среднего по 3 отсчетам) метод определения максимального значения амплитуды сигнала дает электронное FWHM на уровне 0.5%.

**Выводы по результатам моделирования цифровой обработки сигналов в среде MatLab определения временного и электронного разрешения гамма детекторов на основе LYSO сцинтилляторов для использования в установках работающих по методу меченного нейтрона и оцифровки 12 разрядным быстродействующим дигитайзером:**

-Применение 12 разрядного дигитайзера работающего на частоте 1ГГц при цифровой обработке сигналов от гамма квантов при использовании в качестве детектора LYSO сцинтиллятора, при соотношении сигнал/шум 40дБ и сглаживании методом скользящего среднего по 3 точкам используя цифровой метод ARC-CFD позволяет получить временное разрешение FWHM = 40-60нс в динамическом диапазоне сигналов



1:20 и 10% джиттере длительности переднего фронта сигнала. При соотношении сигнал/шум 30дб временное FWHM = 160нс, что не достаточно.

-Применение дискретизации на частоте 2ГГц нецелесообразно, так как FWHM=40пс при соотношении сигнал/шум 40дб в этом случае достаточно частоты дискретизации 1ГГц, а при соотношении сигнал/шум 30дб временного разрешения FWHM=110пс недостаточно.

-Применение 12 разрядного дигитайзера работающего на частоте 5ГГц при цифровой обработке сигналов от гамма квантов при использовании в качестве детектора LYSO сцинтиллятора, при соотношении сигнал шум 30дб и сглаживании методом скользящего среднего по 12 точкам используя цифровой метод ARC-CFD позволяет получить временное разрешение FWHM = 70-80нс в динамическом диапазоне сигналов 1:20 и 10% джиттере длительности переднего фронта сигнала.

- Метод определения энергии гамма квантов по максимальному значению сигнала не чувствителен к вариации времён нарастания сигнала и постоянной спада. Выбор частоты дискретизации 1ГГц или 2ГГц или 5ГГц осуществляется исходя из задачи получения временного разрешения.

-В общем случае для практических целей достаточно использовать метод определения энергии гамма кванта по максимальному значению сигнала при рабочих соотношения сигнал/шум 30-40дб. При этом точность определения амплитуды FWHM составит не хуже 1%, а ожидаемое FWHM детектора на основе LYSO сцинтилляторов не лучше 3%. для энергии 4 МэВ.

-Применение метода определения подсчета интегрального значения в пределах длительности переднего фронта 15нс+постоянная времени спада 40нс дает высокую точность, но она избыточна - электронное FWHM на уровне 0.3% при соотношения сигнал шум 30 дб и частоте дискретизации 1ГГц , так как реальное амплитудное разрешение детектора на основе LYSO сцинтилляторов не лучше 3%. для энергии 4 МэВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, Соглашение №075-02-2018-260 от 26.11.2018 г., уникальный идентификационный номер проекта RFMEFI60718X0200.