

10

Оптимизация передачи информации с помощью случайного потока одиночных фотонов гамма-излучения

© Р.Н. Шахмуратов^{1,2}, А.Л. Зиннатуллин¹, Ф.Г. Вагизов¹¹ Казанский федеральный университет, Казань, Россия² Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань, Россия

E-mail: Shakhmuratov@mail.ru

Поступило в Редакцию 14 ноября 2024 г.

В окончательной редакции 14 ноября 2024 г.

Принято к публикации 26 декабря 2024 г.

Недавно нами был предложен метод передачи информации с помощью случайного потока фотонов. Он управляется сборкой поглотитель-пьезопреобразователь, на которую подаются импульсы напряжения прямоугольной формы. Информация кодируется в длительности импульсов и временных интервалах между ними. Оказалось, что такие импульсы возбуждают механические колебания в нашей сборке, которые приводят к появлению небольших импульсов излучения в нежелательные моменты времени. Предложены импульсы другой формы с плавным изменением фронтов, которые уменьшают вероятность возбуждения механических колебаний. Преимущества предлагаемых импульсов демонстрируются экспериментально.

Ключевые слова: передача информации, пьезоэлектрические преобразователи.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.08.60165.20187

Развитие методов передачи информации с помощью одиночных фотонов является актуальным в связи с необходимостью создания надежных протоколов криптографии [1]. Информацию предлагается кодировать в поляризации фотонов [2], в относительной фазе компонент однофотонного волнового пакета, расщепленного во времени на два импульса [3,4], и с помощью многих других методов (см. обзор [1]). Недавно нами был предложен метод передачи информации с помощью случайного потока одиночных фотонов гамма-излучения [5]. Этот поток управляется с помощью резонансного поглотителя, который подвергается быстрым смещениям на полдлины волны излучения. Каждый раз, когда поглотитель испытывает смещение, возникает гамма-импульс. В основе эффекта лежит интерференция падающего излучения источника и излучения, когерентно рассеянного поглотителем. В результате быстрого смещения поглотителя по отношению к источнику интерференция этих полей становится конструктивной и рождается импульс. Импульсы можно наблюдать, если смещение поглотителя синхронизировано с регистрирующим блоком сбора фотоотчетов резонансных гамма-фотонов [6,7]. Предлагаемый метод имеет преимущества по сравнению с традиционными средствами связи, использующими радиочастотное, СВЧ- и оптическое излучение, благодаря энергоэффективности, компактности и большой проникающей способности гамма-излучения через многие среды, которые непрозрачны для традиционных средств связи. Кроме того, метод имеет существенно более высокую скорость модуляции интенсивности излучения по сравнению с известными методами механической модуляции излучения радиоактивных ядер с помощью затворов (см., например, [8]).

Мы используем радиоактивный источник ⁵⁷Co, который испускает фотоны с энергией 14.4 keV. В качестве резонансного поглотителя применяется фольга нержавеющей стали (AISI 304), которая приклеена на полимерный пьезопреобразователь (PVDF). На него подаются прямоугольные импульсы напряжения. На рис. 1, *a* показаны изменение фазы излучения под действием прямоугольного импульса напряжения и зависимость вероятности детектирования фотонов, вышедших из поглотителя, от времени. Нами использовался генератор, который позволяет создавать прямоугольные импульсы напряжения длительностью 1000 ns с фронтами порядка 15 ns. Наличие электрической емкости пьезоэлемента приводит к удлинению фронтов импульсов до 30 ns. На этом же рисунке показана теоретическая зависимость вероятности детектирования фотонов на выходе из поглотителя $N(t)$, которая получена с использованием теории, развитой в работах [6,7]. Изменение фазы излучения $\varphi_s(t) = kx(t)$, которая определяется зависимостью от времени смещения поглотителя под действием пьезопреобразователя $x(t)$ и волновым вектором излучения k , описывается выражением

$$\varphi_s(t) = \alpha \left[\phi(t - t_1) - \phi(t - t_2) \right], \quad (1)$$

где α — максимальное значение фазы, $\phi(t) = [1 - \exp(-t/\tau)]\theta(t)$, $\theta(t)$ — функция Хэвисайда, τ — время нарастания/спада фазы, $t_{1,2}$ — моменты времени, в которые напряжение включается и выключается. Время τ определяется емкостью пьезопреобразователя. Из рис. 1, *a* видно, что на переднем и заднем фронтах прямоугольного импульса напряжения, вызывающего смещение, наблюдается всплеск гамма-излучения. Следует отметить, что

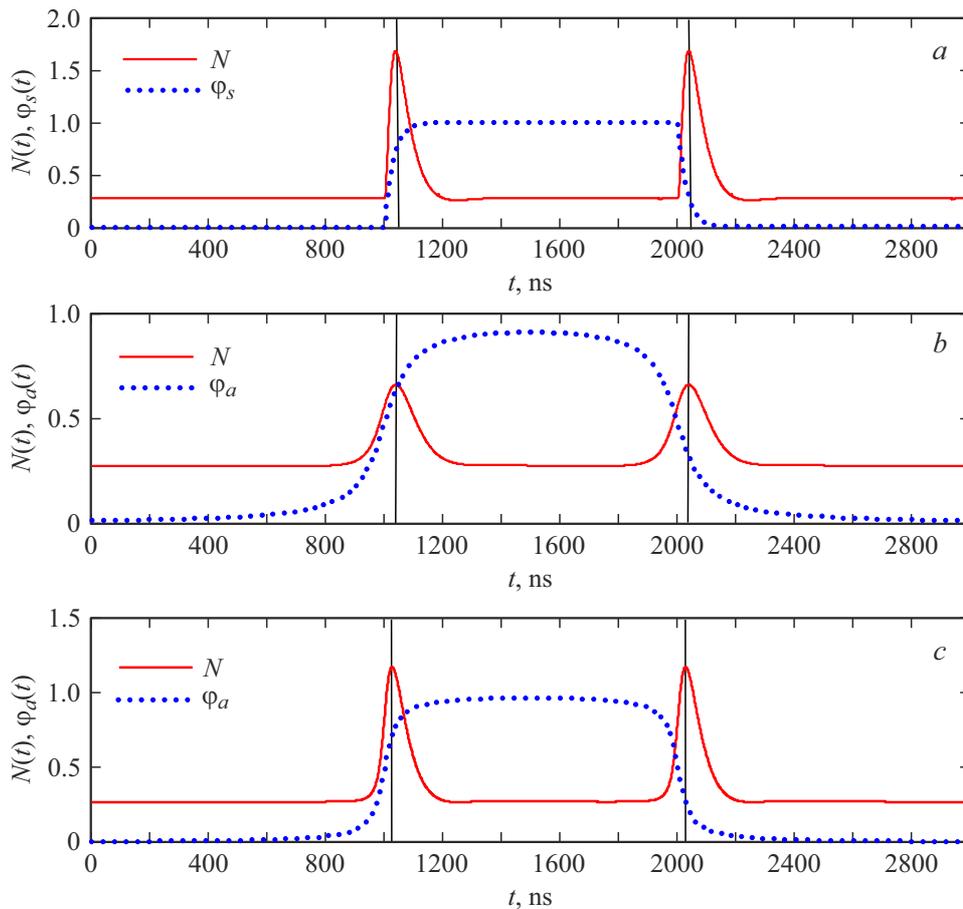


Рис. 1. Зависимость вероятности детектирования фотона на выходе из поглотителя $N(t)$ (сплошная линия) и изменение фазы излучения $\varphi(t)$ под действием смещения пьезопреобразователя (пунктирная линия). Индексы s и a соответствуют ступенчатому смещению $\varphi_s(t) = kx(t)$ и смещению $\varphi_a(t) = kx(t)$, которое описывается функцией арктангенса. Параметр τ этих смещений равен 30 (a), 70 (b) и 30 ns (c). Фаза излучения нормирована на π . Вертикальными линиями показаны положения максимумов излучения.

необязательно максимальное значение изменения фазы должно равняться π для получения оптимального значения сигнала. Оно может быть меньше π . Тогда всплеск излучения будет меньшей интенсивности. Оно может быть также больше π и даже превосходить значение 2π . В этом случае теория предсказывает, что будут наблюдаться два всплеска при пересечении значений π и 2π , т.е. каждый раз, когда фаза будет изменяться на π : от нуля до π и от π до 2π .

Между тем в наших экспериментах мы наблюдали появление повторных всплесков гамма-излучения независимо от максимального значения фазы, которое пропорционально приложенному напряжению. На рис. 2 показаны экспериментальные результаты наблюдения генерации гамма-импульсов, вызванной прямоугольным импульсом напряжения. Максимальное напряжение составляло 10 V (рис. 2, a). Из рисунка видно, что после первого пика гамма-излучения, вызванного передним фронтом импульса напряжения, примерно через 100 ns появляется второй пик. То же самое происходит и на заднем фронте импульса напряжения. С уменьшением

максимального напряжения от 10 до 2.5 V с шагом 2.5 V картина качественно не изменяется. Поэтому мы приходим к выводу, что появление вторичных всплесков излучения не зависит от максимального смещения фазы. Скорее всего, оно вызвано механическими колебаниями пьезопреобразователя, которые возбуждаются передним и задним фронтами импульса напряжения. Мы предполагаем, что эти фронты возбуждают колебания пьезоэлемента с частотой ~ 10 MHz. Аналогичные вторичные всплески наблюдались в работе [9], в которой использовался кварцевый пьезопреобразователь, возбуждающий смещения источника излучения $^{57}\text{Co}(\text{Pd})$. Кроме того, возникают всплески излучения гораздо меньшей интенсивности с задержкой ~ 400 ns от переднего и заднего фронтов прямоугольного импульса напряжения. Можно предположить, что наблюдение вторичных и задержанных всплесков излучения вызвано тем, что наша сборка имеет две частоты собственных колебаний, значения которых близки к 10 MHz. Разница этих частот составляет ~ 2.5 MHz. Крутой фронт импульса напряжения возбуждает эти частоты, которые приводят к изменению

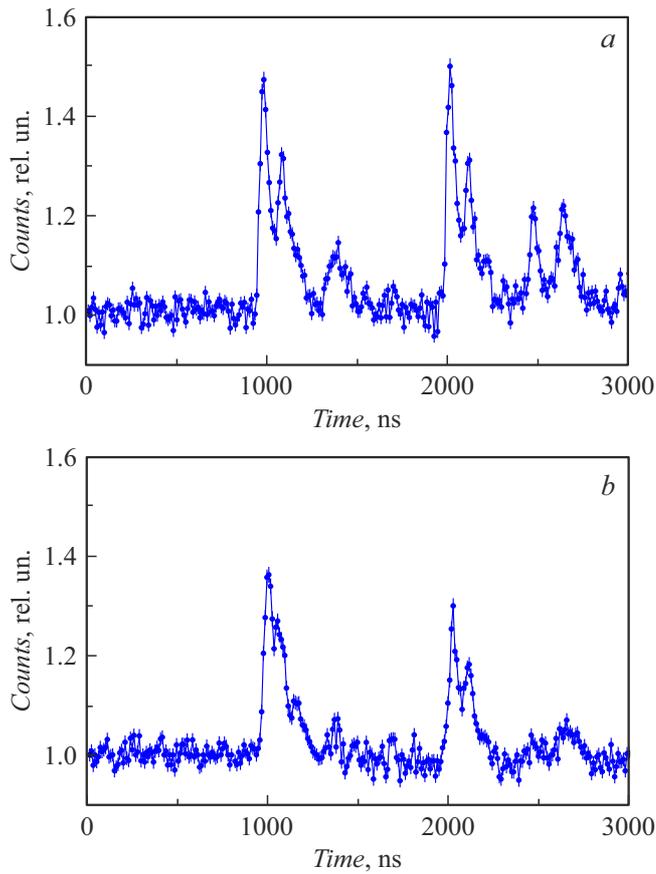


Рис. 2. Всплески гамма-излучения на выходе из поглотителя при подаче на пьезопреобразователь прямоугольного импульса напряжения, вызывающего изменение фазы (1), с амплитудой 10 (a) и 5 В (b).

фазы излучения. Вторичный всплеск вызван этими механическими колебаниями. Задержанный всплеск обусловлен интерференцией двух высокочастотных колебаний, которая вызывает биения с периодом ~ 400 ns.

Учитывая приведенные выше аргументы, мы решили применить импульсы напряжения с такими фронтами, которые позволят избежать возбуждения собственных частот сборки, вызывающих генерацию нежелательных импульсов излучения. Два фактора в характере изменения фазы (смещения), которое описывается формулой (1), могут привести к возбуждению колебаний. Первый — крутизна фронта, которая определяется параметром τ . Второй — производная смещения dx/dt . В выражении (1) производная на переднем фронте испытывает скачок от нуля до максимально возможного значения. Для того чтобы такого скачка не было, мы выбрали форму импульса напряжения, которая создает следующее изменение фазы излучения во времени:

$$\varphi_a(t) = \frac{\alpha}{\pi} \left[\arctan\left(\frac{t-t_1}{\tau}\right) - \arctan\left(\frac{t-t_2}{\tau}\right) \right]. \quad (2)$$

Примеры такой зависимости показаны на рис. 1, b, с пунктирной линией для двух разных значений параметра τ .

Используя генератор импульсов напряжения произвольной формы, мы создали смещения, которые приводят к изменению фазы согласно формуле (2). На рис. 3 показаны всплески гамма-излучения, которые возникают под действием такого импульса напряжения со следующими параметрами: $\tau = 70$ (a) и 30 ns (b). Из этих рисунков видно, что мы практически избавились от нежелательных всплесков излучения. Интересно отметить, что в случае $\tau = 70$ ns (a) импульс излучения приобретает симметричную форму, как и предсказывает теория (рис. 1, b). С уменьшением этого параметра форма импульса становится асимметричной согласно теоретическому предсказанию (рис. 1, c).

В нашей предыдущей работе [5] для передачи информации мы использовали слово „Nature“ в восьмибитовой ASCII-кодировке, которое содержало 48 бит информации. Для генерации импульсов гамма-излучения создавалась последовательность из 14 прямоугольных импульсов напряжения разной длительности с различающимися временными интервалами между ними. Общая длительность последовательности составляла 17 μ s. Она

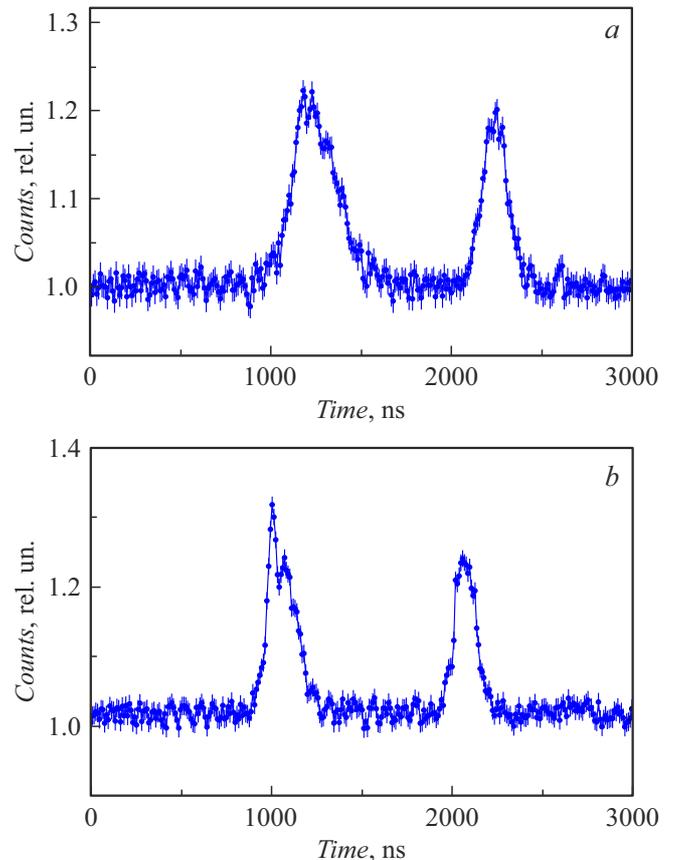


Рис. 3. Генерация гамма-импульсов с помощью прямоугольных импульсов напряжения, имеющих фронты, которые описываются функцией арктангенса (2). Параметр этой функции равен $\tau = 70$ (a) и 30 ns (b).

была разделена на временные слоты длительностью 347 ns. Временному слоту, в котором присутствовало напряжение, мы приписывали бит 1, а тому, в котором оно отсутствовало, приписывался бит 0. По наблюдаемым импульсам гамма-излучения можно однозначно восстановить последовательность импульсов напряжения и получить передаваемый текст. Наличие паразитных всплесков, обусловленных упругими свойствами нашего модулятора, приводит к тому, что для уверенного приема информации приходится накапливать данные с большим соотношением сигнал/шум. В свою очередь это требует дополнительного времени для безошибочного прочтения передаваемой информации. Поэтому предложенный нами метод подавления паразитных всплесков позволяет существенно сократить время восстановления информации из наблюдаемых сигналов.

Следует отметить, что подавление паразитных сигналов обусловлено особенностями формы предлагаемых импульсов, фурье-спектр которых имеет исчезающе малые компоненты на резонансной частоте модулятора ~ 10 МГц. Как было показано нами ранее, возбуждение гармонических колебаний используемой сборки наиболее эффективно именно на этой частоте [10].

Финансирование работы

Результаты получены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-22-00261).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, H. Zbinden, *Rev. Mod. Phys.*, **74**, 145 (2002). DOI: 10.1103/RevModPhys.74.145
- [2] C.H. Bennet, G. Brassard, in *Proc. of IEEE Int. Conf. on computers, systems and signal processing* (IEEE, 1984), vol. 175, p. 8.
- [3] P.D. Townsend, J.G. Rarity, P.R. Tapster, *Electron. Lett.*, **29**, 634 (1993). DOI: 10.1049/el:19930424
- [4] J. Brendel, N. Gisin, W. Tittel, H. Zbinden, *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 2594 (1999). DOI: 10.1103/PhysRevLett.82.2594
- [5] R.N. Shakhmuratov, A.L. Zinnatullin, F.G. Vagizov, *Europhys. Lett.*, **147**, 38001 (2024). DOI: 10.1209/0295-5075/ad63c8
- [6] P. Heliö, E. Ikonen, T. Katila, K. Riski, *Phys. Rev. Lett.*, **49**, 1209 (1982). DOI: 10.1103/PhysRevLett.49.1209
- [7] Р.Н. Шахмуратов, Ф.Г. Вагизов, О.А. Кочаровская, *Изв. РАН. Сер. физ.*, **78** (3), 300 (2014). DOI: 10.7868/S0367676514030223 [R.N. Shakhmuratov, F.G. Vagizov, O.A. Kocharovskaya, *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, **78** (3), 199 (2014). DOI: 10.3103/S1062873814030174].
- [8] F. Li, J. Wu, Q. Jiang, Z. Zheng, T. Zhou, Z. Zhang, L. Li, Q. Zhao, M. Cheng, F. Wang, Z. Cheng, T. Gao, C. Zhao, Z. Wang, L. Bai, R. Zhou, C. Yang, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*, **1039**, 166920 (2022). DOI: 10.1016/j.nima.2022.166920
- [9] Э.Х. Реало, К.К. Ребане, М.А. Хаас, Я.Я. Ыйги, *Письма в ЖЭТФ*, **40** (11), 477 (1984). [É.Kh. Realo, K.K. Rebane, M.A. Khaas, Ya.Ya. İygi, *JETP Lett.*, **40**, 1309 (1984).]
- [10] F. Vagizov, V. Antonov, Y.V. Radeonychev, R.N. Shakhmuratov, O. Kocharovskaya, *Nature*, **508**, 80 (2014). DOI: 10.1038/nature13018