

**АСИНХРОННАЯ ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ
ПО ОПТИЧЕСКОМУ КАНАЛУ СВЯЗИ СО СЧЕТЧИКОМ ФОТОНОВ**

**АСИНХРОННА ПЕРЕДАЧА ДАНИХ
ОПТИЧНИМ КАНАЛОМ ЗВ'ЯЗКУ З ЛІЧИЛЬНИКОМ ФОТОНІВ**

**ASYNCHRONOUS DATA TRANSMISSION THROUGH
THE OPTICAL COMMUNICATION CHANNEL WITH PHOTON COUNTER**

Аннотация. Предложено устройство для асинхронной передачи данных по оптическому каналу связи со счетчиком фотонов и кодированием информации временными интервалами. Определены характеристики этого устройства.

Анотація. Запропоновано пристрій для асинхронної передачі даних оптичним каналом зв'язку з лічильником фотонів і кодуванням інформації часовими інтервалами. Визначено характеристики цього пристрою.

Summary. A device for asynchronous data transmission through the optical communication channel equipped with photon counter and data encryption with time gaps has been offered. Technical characteristics of this device have been identified.

Для организации оптической связи с удаленными космическими объектами, когда невозможно осуществить ретрансляцию сигнала, при передаче информации по волоконно-оптическим линиям, подверженным высоким механическим воздействиям, возникающим вследствие чрезвычайных ситуаций и приводящим к значительной потере мощности оптического излучения в волокне, целесообразно использовать асинхронный способ передачи данных, а для приема информации – счетчик фотонов.

Асинхронный способ, в отличие от синхронного, не требует передачи данных дополнительных оптических импульсов для синхронизации работы источника и приемника информации. При трансляции оптической информации на сверхдальние расстояния или в чрезвычайных ситуациях оптическое излучение синхрои́мпульсов подвержено сильным потерям, также, как и излучение, используемое для передачи данных. Это увеличивает вероятность ошибки регистрации синхрои́мпульсов и приводит к уменьшению скорости передачи информации по сравнению с асинхронным способом передачи данных.

Для регистрации оптической информации в указанных случаях передачи данных необходимо использовать наиболее чувствительный метод регистрации излучения. Таким является счет отдельных фотонов [1]. Этот метод регистрации оптического излучения реализуется при помощи счетчиков фотонов.

В работе [2] предложено устройство для асинхронной передачи данных со счетчиком фотонов в качестве приемника излучения. В устройстве для передачи двоичных символов «0» и «1» использовались оптические импульсы фиксированной длительности, среднее число фотонов в которых равно N_1 и N_2 соответственно ($N_1 < N_2$). Формирование этих импульсов осуществлялось путем изменения мощности транслируемого оптического излучения. Однако это не удается реализовать для всех типов источников оптического излучения. В таких случаях можно мощность источника излучения не изменять, а для передачи двоичных символов «0» и «1» используются оптические импульсы различной длительности, среднее число фотонов в которых равно N_1 и N_2 соответственно. В настоящее время отсутствуют устройства, реализующие этот способ передачи данных. Поэтому **целью данной работы** являлось создать устройство для асинхронной передачи данных по оптическому каналу связи со счетчиком фотонов в качестве приемника излучения и кодирования двоичных символов «0» и «1» различными временными интервалами.

Для асинхронной передачи данных группами фотонов по волоконно-оптическим линиям связи было разработано следующее устройство, структурная схема которого представлена на рис. 1.

Для передачи символов «0» и «1» используются оптические импульсы длительностью t_1 и t_2 ($t_1 < t_2$) одинаковой мощности и с постоянной длиной волны излучения.

Поскольку символы «0» и «1» передаются оптическими импульсами различной длительности, то на выходе лавинного фотодиода (ЛФД), работающего в режиме регистрации отдельных фотонов, за время передачи символа формируется различное количество одноквантовых импульсов, которое будет прямо пропорционально длительности оптического излучения. Длительности импульсов t_1 и t_2 подбираются таким образом, что максимальное число импульсов, соответствующее символу «0», будет меньше, чем минимальное число импульсов, соответствующее символу «1».

Подсчитывая количество импульсов за время передачи одного бита информации, определяют, какой из символов «0» или «1» был передан.

Перед началом передачи данных счетчики Сч1, Сч2 и RS-триггеры Тр1 и Тр2 сбрасывают в нулевое состояние. На формирователь Ф поступают данные, представляющие собой последовательность, состоящую из символов «0» и «1». Формирователь Ф кодирует эти данные таким образом, что символам «0» и «1» соответствуют прямоугольные импульсы длительностью t_1 и t_2 соответственно, причем $t_1 < t_2$ (рис. 1). С формирователя Ф импульсы поступают на вход источника оптического сигнала ИС, на выходе которого при передаче символа «0» формируется оптический сигнал длительностью t_1 , а при передаче символа «1» - длительностью t_2 . Оптические сигналы с выхода источника сигнала ИС поступают через нейтральный светофильтр Н в линию связи Л. При прохождении оптического сигнала через нейтральный светофильтр его мощность ослабляется. Из оптической линии связи оптический сигнал подается на ЛФД, который работает в режиме счета фотонов и включен по схеме пассивного гашения лавины [1].

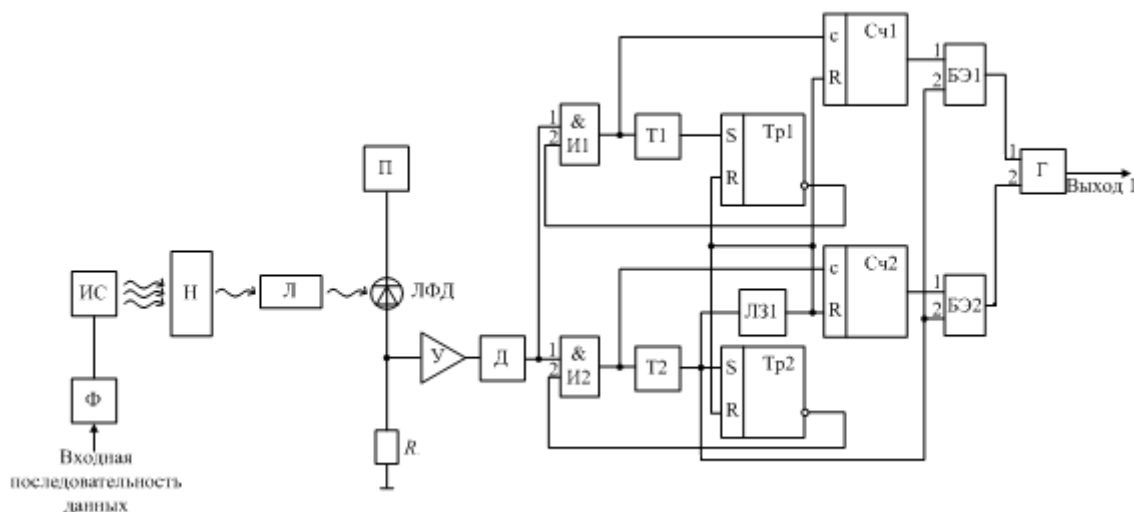


Рисунок 1 – Структурная схема устройства асинхронной передачи данных по оптическому каналу связи: П- источник питания ЛФД; R- сопротивление нагрузки

Импульсы ЛФД усиливаются усилителем У и поступают на вход амплитудного дискриминатора Д. При помощи дискриминатора выполняется амплитудная селекция усиленных импульсов напряжения на фоне шумов усилителя У, а также их стандартизация по амплитуде и времени.

С выхода дискриминатора импульсы поступают параллельно на первые входы первого и второго логических элементов «И» И1 и И2. Наличие на вторых входах логических элементов «И» И1 и И2 уровня напряжения, соответствующего логической единице, подаваемого с инверсных выходов первого и второго RS-триггеров Тр1, Тр2 соответственно (см рис. 1), позволяет импульсам с выхода амплитудного дискриминатора поступать на входы счетчиков импульсов Сч1 и Сч2, которые подсчитывают число последовательности импульсов, поступающих на их вход.

С момента прихода первого импульса с выхода амплитудного дискриминатора Д на первый таймер Т1 через промежуток времени t_1 на выходе Т1 формируется импульс, который поступает на S-вход первого RS-триггера Тр1, переводя его в нулевое состояние. На инверсном выходе первого RS-триггера Тр1 формируется сигнал, соответствующий логическому нулю, который подается на второй вход первого логического элемента «И» И1 и останавливает поступление импульсов на вход первого счетчика импульсов Сч1.

Также с момента прихода первого импульса с выхода амплитудного дискриминатора Д на второй таймер Т2 через промежуток времени t_2 на выходе Т2 формируется импульс, который поступает на S-вход второго RS-триггера Тр2, переводя его в нулевое состояние. На инверсном

выходе второго RS-триггера Tr2 формируется сигнал, соответствующий логическому нулю, который подается на второй вход второго логического элемента «И» И2, что останавливает поступление импульсов на вход второго счетчика импульсов Сч2.

Таким образом, первым и вторым счетчиками импульсов Сч1 и Сч2 обеспечивается подсчет числа поступивших импульсов за интервалы времени t_1 и t_2 соответственно.

При количестве $N_T < N_1 \leq N_2$ (где N_T – количество темновых импульсов) сосчитанных импульсов первым счетчиком Сч1 при передаче символа «0» на его выходе появляется уровень, соответствующий логической единице. Темновые импульсы – это импульсы, возникающие в ЛФД в отсутствии оптического излучения.

При количестве сосчитанных импульсов $N > N_1$ вторым счетчиком Сч2 при передаче символа «1» на его выходе появляется уровень, соответствующий логической единице.

В момент поступления импульса от второго таймера Т2 на разрешающие входы первого и второго буферных элементов БЭ1 и БЭ2 последние обеспечивают передачу данных со своих входов на выходы. Импульсы с выходов буферных элементов БЭ1 и БЭ2 подаются на первый и второй входы генератора Г соответственно. Если на первом информационном входе генератора Г уровень напряжения соответствует логической единице, а на втором входе – логическому нулю, то на выходе генератора Г формируется импульс отрицательной полярности. Если на первом и втором информационных входах генератора Г уровень напряжения соответствует логической единице, на его выходе формируется импульс положительной полярности.

Сброс счетчиков импульсов Сч1 и Сч2 и RS- триггеров Tr1 и Tr2 в нулевое состояние осуществляется при поступлении сигнала логической единицы с выхода второго таймера Т2, задержанного первой линией задержки ЛЗ1. Первая линия задержки ЛЗ1 обеспечивает сброс Сч1, Сч2, Tr1 и Tr2 только после того, как сформируется выходной импульс генератора прямоугольных импульсов Г. Поступление на R-входы RS-триггеров Tr1 и Tr2 с выхода первой линии задержки ЛЗ1 уровня напряжения, соответствующего логической единице, обеспечивает формирование на инверсных выходах Tr1 и Tr2 уровня напряжения, соответствующего логической единице, который подается на вторые входы логических элементов «И» И1 и И2 соответственно, что позволяет принимать следующий символ.

Таким образом, реализуется асинхронная передача данных по оптическому каналу связи с приемником в виде счетчика фотонов.

В качестве фотоприемника в устройстве использовались кремниевые лавинные фотодиоды ФД-115Л и со структурами $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$ и $p^+n\text{-}v\text{-}n^+$. Передача данных в устройстве осуществляется на длине волны оптического излучения 850 нм. В этом случае в счетчиках фотонов не требуется их охлаждения ЛФД, необходимого при использовании больших длин волн излучения и других типов фотоприемников.

Согласно работе [3] для получения максимальной скорости передачи данных необходимо подбирать интенсивность регистрируемого оптического излучения J и напряжение питания ЛФД $U_{\text{пит}}$. Это можно сделать, используя зависимость динамического диапазона регистрации ЛФД Δn_c от его $U_{\text{пит}}$. Под Δn_c понимается величина линейного участка зависимости скорости счета одноквантовых импульсов ЛФД от интенсивности оптического излучения $n_c(J)$. Поскольку для различных ЛФД напряжения пробоя $U_{\text{пр}}$ различны, то при сравнении зависимостей $n_c(J)$ от напряжения питания $U_{\text{пит}}$ использовалась величина перенапряжения $\Delta U = U_{\text{пит}} - U_{\text{пр}}$.

Величина этого участка определялась как $\Delta n_c = n_{\text{стmax}} - n_m$, где $n_{\text{стmax}}$ – максимальная скорость счета темновых и одноквантовых импульсов, при которой зависимость $n_c(J)$ линейная, n_m – скорость счета темновых импульсов. Полученные зависимости динамического диапазона счетчика фотонов от ΔU показаны на рис. 2. Все зависимости нормированы на максимальное значение Δn_c , полученное для соответствующего типа ЛФД в исследуемом диапазоне перенапряжений.

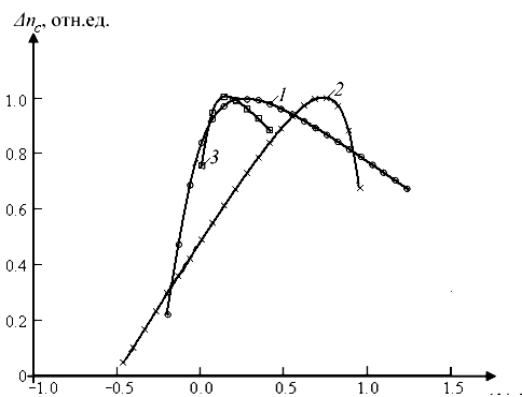


Рисунок 2 – Зависимости величины динамического диапазона счетчика фотонов от перенапряжения:
1 – ФД-115Л; 2 – ЛФД со структурой $p^+n\text{-}v\text{-}n^+$;
3 – ЛФД со структурой $n^+p\text{-}\pi\text{-}p^+$

Как видно из приведенных результатов, каждая из зависимостей $\Delta n_c(\Delta U)$ имеет максимум. Максимальное значение Δn_c в исследуемом диапазоне перенапряжений, полученное для ЛФД со структурой p^+n-v-n^+ составило $\approx 1,4 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. Наличие максимума зависимости $\Delta n_c(\Delta U)$ обусловлено характером изменения скоростей счета темновых n_t и одноквантовых импульсов n_c с увеличением перенапряжения. Как получено в [1] с увеличением перенапряжения вначале происходит рост как n_t , так и n_c . Однако при дальнейшем увеличении перенапряжения скорость счета темновых импульсов продолжает расти, а зависимость $n_c(\Delta U)$ достигает насыщения и практически не изменяется. Поэтому вначале зависимость $\Delta n_c(\Delta U)$ увеличивается, достигая своего максимального значения, а после – спадает. В связи с этим напряжение питания ЛФД необходимо выбирать соответствующим максимуму зависимости $\Delta n_c(\Delta U)$, а интенсивность оптического излучения такой, для которой скорость счета смеси темновых и одноквантовых импульсов равна $n_{\text{стmax}}$.

Длительностью t_1 выбиралась из условия $\Delta n_c t_1 \geq D_r^{1/2}$, где D_r – дисперсия среднего числа темновых импульсов, зарегистрированных за время t_1 , а длительностью t_2 выбиралась из условия $\Delta n_c t_2 \geq (n_{\text{стmax}} t_1)^{1/2}$. Продолжительность передачи одного бита информации $\tau_b = t_2 + \Delta t_3$, где Δt_3 – длительность защитного интервала. Для того, чтобы отделить передачу одного символа от другого, используется защитный временной интервал Δt_3 по аналогии с защитным частотным интервалом, используемым в работе [4]. Длительность защитного интервала Δt_3 необходимо выбирать, с одной стороны, как можно меньшей. Это связано с тем, что с увеличением Δt_3 увеличится вероятность регистрации темновых импульсов, поэтому увеличится вероятность ошибочной регистрации. С увеличением Δt_3 растет τ_b , что, в свою очередь, снижает пропускную способность канала связи. С другой – минимальное значение длительности t_3 также ограничено, поскольку, приняв $\Delta t_3 < t_2$, в случае, если счетчик фотонов при приеме двоичного символа, например, сработает не от первого, а от последнего фотона излучения в оптическом импульсе длительностью t_2 , может произойти перекрытие временных интервалов, т.е. счетчиком фотонов регистрируются фотоны оптического излучения, которые относятся и к текущему передаваемому двоичному символу, и к последующему, однако на выходе счетчика фотонов сформируется только один символ. В этом случае увеличится общая вероятность ошибочной регистрации, что снизит пропускную способность. Поэтому длительность Δt_3 целесообразно выбирать равной длительности t_2 – тогда исключается возможное перекрытие временных интервалов.

Для определения максимальной скорости передачи информации C_{max} использовали следующее выражение:

$$C_{\text{max}} = \{-[0,5[P(0/0) + P(0/1)]]\log_2[0,5(P(0/0) + P(0/1))] - [0,5[P(1/0) + P(1/1)]]\log_2[0,5(P(1/0) + P(1/1))] - [0,5[P(-/0) + P(-/1)]]\log_2[0,5(P(-/0) + P(-/1))] + 0,5[P(0/0)\log_2 P(0/0) + P(1/0)\log_2 P(1/0) + P(-/0)\log_2 P(-/0)] + 0,5[P(0/1)\log_2 P(0/1) + P(1/1)\log_2 P(1/1) + P(-/1)\log_2 P(-/1)]\} / \tau_b, \quad (1)$$

где $P(0/0)$ и $P(0/1)$ – вероятности регистрации на выходе канала связи символа «0» при наличии на входе символов «0» и «1», $P(1/0)$ и $P(1/1)$ – вероятности регистрации на выходе канала связи символа «1» при наличии на входе символов «0» и «1», $P(-/0)$ и $P(-/1)$ – вероятности того, что при регистрации на выходе канала связи не будет зафиксировано ни символа «0», ни символа «1», в то время как на передающей стороне были сформированы символы «0» и «1» соответственно.

Численные значения вероятностей $P(0/0)$, $P(-/0)$, $P(1/0)$, $P(0/1)$, $P(-/1)$, $P(1/1)$ можно определить на основании статистических распределений числа импульсов на выходе счетчика фотонов $P_{\text{st}0}(N)$ и $P_{\text{st}1}(N)$, обозначив числами N_1 и N_2 нижний и верхний пороговые уровни регистрации, соответственно, как описано в работе [3]. Пороговые уровни позволяют определить какой из символов «0» или «1» принят. Если число зарегистрированных импульсов попадает в интервал $N_1 \leq N \leq N_2$, то считается, что принят символ «0», в случае, когда $N > N_2$ – принят символ «1». Если $N < N_1$, то символы не передавались. На основании этого вероятности $P(0/0)$, $P(-/0)$, $P(1/0)$, $P(0/1)$, $P(-/1)$, $P(1/1)$ равны соответственно:

$$P(0/0) = \sum_{N=N_1}^{N_2} P_{\text{st}0}(N), \quad P(-/0) = \sum_{N=0}^{N_1-1} P_{\text{st}0}(N), \quad P(1/0) = 1 - \sum_{N=0}^{N_2} P_{\text{st}0}(N);$$

$$P(0/1) = \sum_{N=N_1}^{N_2} P_{\text{st}1}(N), \quad P(-/1) = \sum_{N=0}^{N_1-1} P_{\text{st}1}(N), \quad P(1/1) = 1 - \sum_{N=0}^{N_2} P_{\text{st}1}(N). \quad (2)$$

Рассчитать пропускную способность канала связи можно путем подстановки в выражение (1) соответствующих вероятностей (2) с учетом измеренных статистических распределений смеси темновых и сигнальных импульсов $P_{st0}(N)$ на интервале времени t_1 и $P_{st1}(N) - t_2$.

Данные о максимальной скорости передачи информации, рассматриваемого устройства для исследуемых ЛФД, представлены в таблице для пороговых уровней $N_1 = 1$ и $N_2 = 2$.

Как видно из приведенных результатов, для рассматриваемого устройства наибольшее значение скорости передачи информации ($\approx 15,2$ кбит/с) получено при использовании в счетчике фотонов фотоприемника со структурой p^+n-v-n^+ . Это обусловлено тем, что для него наблюдался наибольший динамический диапазон за счет более высокой квантовой эффективности регистрации по сравнению со счетчиком фотонов, построенном на базе других типов исследуемых ЛФД.

Предложено устройство для асинхронной передачи данных по оптическому каналу связи со счетчиком фотонов и кодированием информации временными интервалами.

Получено, что для достижения максимальной скорости передачи данных необходимо выбирать величину перенапряжения ЛФД, соответствующее максимуму зависимости $\Delta n_c(\Delta U)$.

Максимальное значение скорости передачи данных ($\approx 15,2$ кбит/с) удалось получить при использовании в счетчике фотонов ЛФД со структурой p^+n-v-n^+ . Такая скорость передачи данных может быть использована при передаче данных и речи. Для увеличения скорости передачи данных может быть использован многоканальный способ, описанный в работе [5].

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор №Т13-018).

Таблица 1 – Характеристики исследуемого устройства

Сравниваемые параметры	Тип исследуемого ЛФД		
	ФД-115Л	структура p^+n-v-n^+	структура $n^+p-\pi-p^+$
Напряжение пробоя, В	52,71	279,05	190,21
Максимальная пропускная способность счетчика фотонов, кбит/с	10,4	15,2	10,2
– скорость счета темновых импульсов $n_T \cdot 10^{-3}, c^{-1}$	3,0	18,0	12,2
– перенапряжение ΔU , В	0,25	0,75	0,10
– динамический диапазон $\Delta n_c \cdot 10^{-3}, c^{-1}$	94,5	137,2	94,8
Длительность t_1 , мкс	10	10	10
Длительность t_2 , мкс	30	30	30
Длительность бита τ_b , с	60	60	60

Литература

1. Гулаков И.Р. Метод счёта фотонов в оптико-физических измерениях / И.Р. Гулаков, С.В. Холондырев. – Мн.: Университетское, 1989. – 256 с.
2. Устройства передача данных: пат. 17250 Респ. Беларусь, МПК (2006.01) Н 04В 10/12 / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев; заявитель Бел. гос. ун-т. – № а 20111247; заявл. 27.09.2011; опубл. 30.06.2013. // Официальный бюл. / Нац. Центр интеллектуал. собственности. – 2013. – № 3. – С. 150–151.
3. Гулаков И.Р. Исследование скорости передачи информации по оптическому каналу связи с приемником на основе счетчика фотонов / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев // Автометрия. – 2011.Т. 47. – № 4. – С. 31–40.
4. Ключев Л.Л. Теория электрической связи: учебник / Л.Л. Ключев. – Мн: Техноперспектива, 2008. – 423 с.
5. Многоканальная квантовая система связи для передачи кофиденциальной информации / А.О. Зеневич [и др.] //Междунар. науч. конф., приуроченная к 50-летию МРТИ – БГУИР, (Минск, 18-19 марта 2014 г.) / Белорус. гос. ун-т. информатики и радиоэлектроники; редкол.: А.А. Кураев [и др.]. – Минск, 2014. – Ч.1. – С.426-427.