

**МЕЖА ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАВАННЯ У ФОТОННИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ
КАНАЛАХ ЗА ПОЗИЦІЙНОГО Й ТАЙМЕРНОГО КОДУВАННЯ**

**ПРЕДЕЛ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ В ФОТОННЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ
КАНАЛАХ ПРИ ПОЗИЦИОННОМ И ТАЙМЕРНОМ КОДИРОВАНИИ**

**TRANSMISSION SPEED LIMIT IN PHOTONIC TELECOMMUNICATION
CHANNELS WITH POSITION AND TIMER ENCODING**

Анотація. Здобуто оцінки максимальної швидкості передавання у фотонних телекомунікаційних каналах для трьох випадків: з використанням органічних, нанотехнологічних та квантових приймачів.

Аннотация. Получены оценки максимальной скорости передачи в фотонных телекоммуникационных каналах для трех случаев: с использованием органических, нанотехнологических и квантовых приемников.

Summary. There have been obtained estimations of maximum transmission speed in photonic telecommunication channels for three cases: with the use of organic, nanotechlogic and quantum receivers.

За високих темпів розвитку сучасних біо- та нанотехнологій відкриваються широкі можливості щодо удосконалення телекомунікацій. Розроблено наноелектронні логічні елементи, які замінюють напівпровідникові транзистори та інтегральні елементи. Техніка наблизилась до теоретичної можливості запам'ятовувати та передавати „один” біт інформації за допомогою одного електрона чи однофотонного елемента [1]. Можливість застосовування таких елементів задля створювання телекомунікаційних систем за Aktualizovuje низку проблем, зокрема, проблему вибору способів кодування інформації у процесах її передавання, опрацювання та зберігання. Нас цікавить порівняння кодів з фіксованою довжиною слів n (блокові коди) з таймерними сигналами такої самої довжини. Позичийні блокові коди детально досліджено у [2]. Таймерні конструкції сигналів подано у численних роботах вчених ОНАЗ [3, с. 406–422]. Незважаючи на глибину теоретичних досліджень та величезний досвід практичного застосовування методів кодування, залишаються нез'ясованими питання ефективності цих методів в умовах застосовування біотехнологій, нанотехнологій та квантової техніки.

Метою роботи є віднаходження межі пропускної здатності й максимальної швидкості передавання у фотонних каналах зв'язку та порівняння цих меж для позиційних і таймерних кодів у випадках застосовування приймачів, побудованих на засадах живого органічного середовища, нанотехнологічних промислових систем та квантово-механічного простору.

Пропускна здатність каналу є міра того, наскільки багато інформації передається у середньому при використуванні цього каналу [2, с. 16]. У разі телекомунікацій використання каналу визначається часом передавання, а у разі зберігання даних – займаним простором, за умови, що для кожного символу потрібна одна й та сама кількість часу або, відповідно, один і той самий обсяг простору. Отже, проблема полягає у віднаходженні найменшої довжини кодового слова, для якої досягне надійне передавання. Порівняння типів кодування будемо проводити за критерієм пропускної здатності систем передавання, яка використовує ці типи кодування.

За модель каналу обираємо найпростіший канал без шуму і з двома вхідними символами «0» та «1». Канал має певну „вхідну пам'ять”, тобто кожен окремих вхідний символ спричинює явище нечутливості до приймання, яке триває певний час, допоки можна прийняти наступний символ. Як відомо, кількість інформації, передаваної за допомогою одного двійкового символу, розглядається як одиниця кількості інформації, називаної *бітом*, а на квантовому рівні – *кубітом*.

Метод побудови блочних кодів є широко відомий. За позиційного розрядно-цифрового кодування формуються певні значення на інтервалі найквістового елемента t_0 і зміни сигналу здійснюються у моменти часу, кратні до t_0 (t_0 – величина, обернена смузі пропускання каналу ΔF). На інтервалі найквістового елемента приймач може фіксувати зміни кількох параметрів сигналів:

амплітуди, фази, частоти. Припустімо, що для позиційного кодування у фотонному каналі наявність частки (фотона) буде означати про приймання «одиниці», а відсутність – про приймання «нуля».

Таймерні конструкції передбачають можливості змінювання сигналу у часі. Завдяки змінюванню сигналу у не рівних найквістовому елементові проміжках часу формуються таймерні сигнали (ТС). Сигнальна абетка бінарних ТС формується на інтервалі часу $T_c = mt_0$ за базовим елементом Δ ($\Delta = t_0/s$; $s \in 1, 2, 3, \dots, k$ – цілі числа). Тоді на інтервалі $T_c = mt_0$ розміщується $n = t_0/s$ точок. З усієї множини T – можливих на інтервалі часу T_c сигналів дозволеними є лише ті, в яких сусідні значимі моменти модуляції (ЗММ) відстоять один від одного на певний час, не менше за t_0 . Ця умова забезпечує мінімум міжсимвольних спотворень у ТС. Кожен ЗММ може займати на осі часу позиції, розміщені на відстані $k\Delta < t_0$ один від одного, причому Δ визначається як мінімальна відстань між сусідніми положеннями одного ЗММ. Інформація про символи, передавані ТС, міститься у номері таймерної позиції – ЗММ. Отже, на одному й тому самому інтервалі T_c можна створити більшу кількість ТС, а ніж сигналів простого двійкового коду ($N = 2^m$). Вважатимемо, що у фотонному каналі для таймерних сигналів інформацію закладено у проміжках між двома послідовно прийнятими частками (фотонами).

Величина, обернена середній тривалості символу коду, є мірою використання каналу, називатиметься швидкістю передавання і може бути визначена за формулами

$$B = \frac{n}{t} = \frac{1}{t/n} = \frac{1}{t_c} = \frac{1}{t_{rc} + t_{wc}}, \quad (1)$$

де n – кількість символів, переданих за інтервал часу t ;

t_c – інтервал часу передавання одного символу;

t_{rc} – інтервал часу реєстрації одного символу коду

t_{wc} – інтервал часу нечутливості приймача після реєстрації одного символу коду.

Розглянемо далі кожен випадок окремо.

1. Біологічний приймач, побудований у відповідності із засадами функціонування біологічної речовини. Розглянемо молекулярний рівень і його елементарний об'єкт – молекулу у складі живої клітини. Існує певний ритм у роботі клітини. Вся та будь-яка енергія в біофізичних реакціях всередині організму і на його мембранах здійснюється уніфіковано, передається лише квантами енергії. Для всіх синтезів усередині будь-якої клітини енергія споживається порціями, не меншими, за квант енергії. Найзручніш вивчати процеси збудження на молекулах хлорофілу, які опромінюються світлом. У молекулі хлорофілу протікає процес з'єднання зовнішнього фотона енергії, реакційно-здатного електрона та атома водню [4, с. 192–193; 5]. Рослина чи бактерія уловлюють фотони і спрямовують їх один за одним у середину пласта. Потім фотон збуджує один із електронів, який з'єднується з протоном і далі у вигляді зарядженого атома водню ініціює довгий технологічний ланцюг різноманітних реакцій за рахунок прагнення збудженого атома звільнитись від зайвої енергії. Процес закінчується створенням молекули АТФ, високоенергетичного з'єднання фосфора.

Процес засвоєння енергії є квантований. Якщо він здійснюється цілковито, тоді долучається весь подальший ланцюг перетворювань до завершення процесу, тобто до упакування в АТФ [6]. За носій енергії слугує збуджений атом водню, розміри якого становлять близько 10^{-8} см, або один ангстрем, а тривалість його перебування у збудженому стані за Бауером дорівнює: $n \cdot 10^{-3}$ с, де n набуває цілочисельних значень [7, с. 191–192]. Якщо тривалість цього стану є менша за наведене значення, то біофізичної події, а за ними й усі біохімічні, а потім біологічні події не здійснюються, енергія не встигає засвоїтись живою молекулою.

Процес засвоєння енергії світла відбувається в одному з двох можливих станів збудженого фотонном світла електрона з молекули хлорофілу, а саме у стані засвоєння енергії, який триває 10^{-3} с, і у короткому стані, коли збудження поглинання триває 10^{-8} с. У першому випадку енергія встигає прореагувати у молекулі хлорофілу і задає старт ланцюгові біохімічних реакцій, які призводять до створювання первинних продуктів фотосинтезу. У другому випадку реакції засвоєння фотона не здійснюються і він випромінюється назад у середовище [8, с. 7].

Враховуючи наведені властивості, дійшли висновку, що мінімальна тривалість одиничного логічного елемента t_0 при використуванні біологічного приймача на засадах фотосинтезу не може бути меншою за суму часу поглинання фотона й засвоєння його енергії (рис. 1):

$$t_0 = t_{\text{погл}} + t_{\text{засв}}, \quad (2)$$

де $t_{\text{погл}}$ – інтервал часу поглинання фотона;
 $t_{\text{засв}}$ – інтервал часу засвоєння енергії фотона.

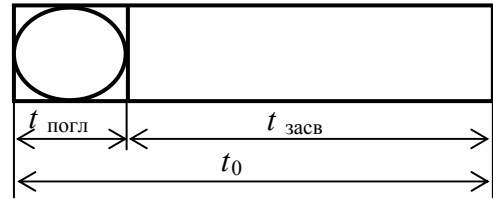


Рисунок 1 – Тривалість окремого логічного елемента

Тоді кодова комбінація блочного коду з п'яти елементів може мати вигляд, як на рис. 2, а її тривалість дорівнює $t_{\text{КК}} = 5t_0$, а швидкість передавання символів становитиме

$$B_{\text{ПІ}} = \frac{1}{t_{\text{КК}}} = \frac{1}{5t_0}. \quad (3)$$

Конструкція таймерного сигналу може виглядати так, як показано на рис 2, б. При її побудові враховувалось таке. Таймерний сигнал має розпочинатись з опорного окремого елемента t_0 і завершуватись захисним інтервалом засвоєння енергії фотона $t_{\text{засв}}$. Поміж ними має розміститись 2^5 інтервалів фіксації фотона, щоби кодувати таку саму кількість символів абетки, що й у блочному коді.

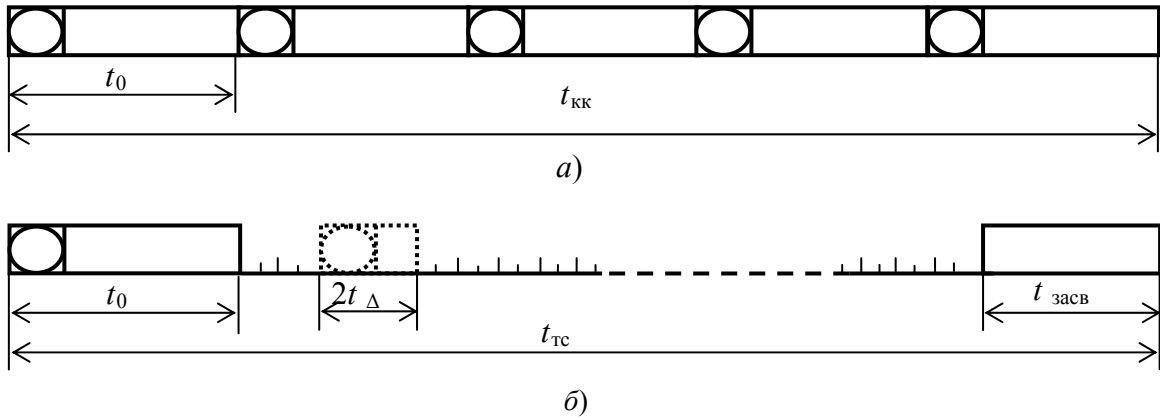


Рисунок 2 – Конструкції комбінації блочного коду (а) та таймерного сигналу (б) для приймача, чинного на засадах фотосинтезу

За вибору інтервалу фіксації сигналу треба мати на увазі, що фотон несе квант енергії й у разі захоплення кванта світла у фотосинтезі інший квант не може бути поглинений за певний період, необхідний для засвоєння енергії світла. [9, с. 21]. Органічна система на рівні однієї молекули працює строго послідовно або переривчасто. Окрім того, всередині живої клітини у тракці засвоювання енергії один об'єкт не може наблизитися до іншого у який завгодно спосіб. Можливо, це пов'язано з кристалографічними фактами. Відомо, що існує межа зближення атомів у молекулах та кристалах; в умовах звичайних температур та тиску. Припустімо, ймовірна найменша можлива відстань поміж атомами є така, яку було розраховано вперше кристалографом Е. С. Федоровим, і дорівнює в середньому розмірові самого атома [10].

Поміж двома сусідніми атомами в нормальних умовах біосфери завжди має залишатись проміжок у один атом (фотон). Можливо, і слідування їх один за одним не може бути злитим, атоми не можуть «злипнутися», й отже, нижня, найкоротша, кінцева межа перебігу часу для однієї молекули не може бути меншою за $2t_{\Delta} = 2t_{\text{погл}}$.

Отже, тривалість таймерного сигналу, інформаційно еквівалентного до кодового сигналу, дорівнює $t_{\text{тс}} = t_0 + 2^5 2t_{\text{погл}} + t_{\text{засв}}$, а швидкість передавання символів становитиме

$$B_{\text{ТІ}} = \frac{1}{t_{\text{тс}}} = \frac{1}{t_0 + 2^5 2t_{\text{погл}} + t_{\text{засв}}}. \quad (4)$$

Аналогічні результати можна здобути для приймача, побудованого на засадах дії ока людини.

2. Біологічний приймач, побудований у відповідності із засадами функціонування ока людини. 90-ми роками минулого сторіччя був установлений той факт, що одного поглинутого світлового кванта вистачає задля фізіологічного збудження рецептора сутінкового зору – палички сітківки ока [11]. Максимум чутливості ока припадає на довжину світлової хвилі 506...555 нм. Зорове відчуття з'являється не миттєво. Перш ніж виникне відчуття, у зоровій системі мають відбутися багаторазові перетворення і передавання сигналів. І зникає це відчуття не одразу після того, як зникло подразнення. Проміжок часу від моменту подання сигналу до моменту виникнення відчуття називають *латентним періодом*. У середньому латентний період зорової реакції лежить у межах 160...240 мс. Важлива властивість палички як лічильника окремих фотонів полягає у сталій формі та величині електричного відгуку, які забезпечуються суворо окресленою геометрією клітини. Паличка нагадує фото-помножувач із сотнями чи навіть з тисячами орієнтованих фоторецепторних дисків. Отриманий електричний сигнал є сумою однофотонних сигналів [12].

Розглянемо процес сприймання фотона оком людини. Іонний канал у плазматичній мембрані відкрито завдяки молекулам циклічного гуанозинмонофосфата (цГМФ), які перебувають у каналі. Через відкритий іонний канал всередину клітини по градієнту концентрації надходять іони натрію (Na^+) та кальцію (Ca^{++}). Унаслідок цього на мембрані підтримується електричний потенціал -40 мВ. При поглинанні кванта світла молекулою родопсину відбувається перетворення одного ізомера хромофора на інший (11-цис ретиналя) і змінюється геометрична форма білкової частини молекули. Це призводить до збездбарвлення родопсину, який активує трансдуцин (Т), котрий своєю чергою взаємодіє з фосфодіестеразою (ФДЕ). Активованій ФДЕ гідролізує цГМФ, унаслідок чого його концентрація в цитоплазмі зовнішнього сегмента падає. Іонний канал, який втрачає цГМФ, закривається, плазматична мембрана гіперполяризується (тобто різко збільшується мембранний потенціал, що супроводжується зниженням збуджуваності). Отже, формується електричний нервовий сигнал, який надходить до нервової клітини сітківки ока [12].

Сигнал передається до кори головного мозку у середньому за 160...240 мс (латентний період). При цьому наступний сигнал може бути сприйнято лише через 0,2...0,5 с, інакше цей сигнал буде накладено на попередній. Допоки реакція поглинання й перетворення фотона не дійде кінця, іонний канал не відкриється і різниця потенціалів на мембрані не відновиться. Тобто приймач на підґрунті людської палички не є активний на час перетворювання сигналу. Позначимо: $t_{\text{погл}}$ – час поглинання фотона молекулою родопсину; t_p – час, необхідний для проходження реакції та зміни потенціалу; $t_{\text{п}}$ – час, необхідний для передавання електричного нервового сигналу до нервової клітини сітківки ока. Тоді тривалість окремого логічного елемента може мати вигляд, поданий на рис. 3.

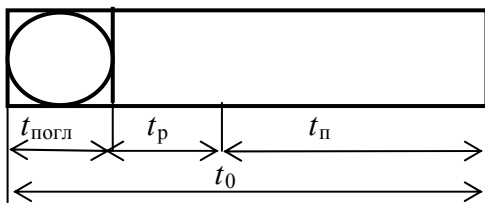


Рисунок 3 – Мінімальна тривалість окремого логічного елемента за використання приймача, побудованого на засадах зору людини

с. Реальний випромінюваний фотон являє собою цуг вихороподібних електромагнітних хвиль, який поширюється за час релаксації на відстань $L \sim 3$ м, містить приблизно $6 \cdot 10^6$ періодів коливачь за довжини хвилі $\lambda \sim 0,5 \cdot 10^{-7}$ м, має енергію фотона порядку ~ 3 еВ. Радіус поперечного перерізу реального фотона становить величину $r \sim 10^{-11}$ м. Енергію фотона концентровано у циліндрі довжиною 3 м, і загасає вона за експоненційним законом (рис. 4) [13, с. 2].

За аналогією можна ввести позначення часу засвоєння фотона як $t_{\text{засв}} = t_p + t_{\text{п}}$. Тоді швидкості передавання символів повідомлення можна обчислити за формулами (3) і (4).

3. Однофотонний нанотехнологічний приймач оптичної волоконної лінії зв'язку.

У кабелі оптичного волоконного зв'язку носієм інформації може бути окремий фотон. Відомо, що тривалість випромінювання збудженого атома, так званий час релаксації, становить величину $t_p \sim 10^{-8}$

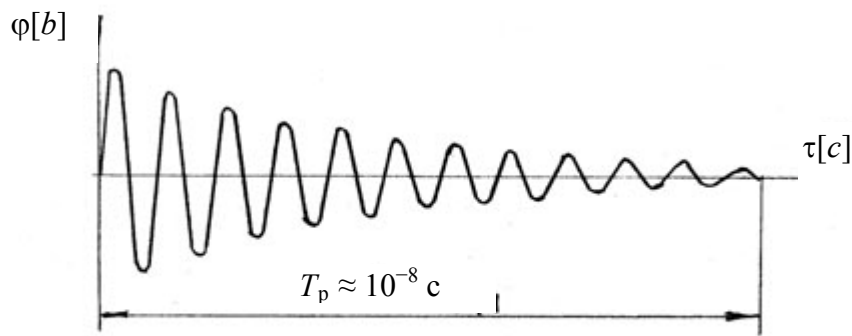


Рисунок 4 – Фотон у перерізі як цуг електромагнітних хвиль

Загальний вид рівняння цугу електромагнітних хвиль має вигляд

$$\varphi(\tau) = r e^{-n\tau} \sin(\omega\tau), \quad (5)$$

де ω – кутова частота коливань ($\omega = 2\pi f = 2\pi/T$);

T – період коливань ($T = t_p / 6 \cdot 10^6 = (1/6) \cdot 10^{-14}$);

n – параметр, пропорційний до логарифмічного декременту загасання (обвідної кривої), залежить від властивостей середовища передавання і лежить у межах $1 \leq n \leq 10^5$.

Оскільки електромагнітні коливання загасають не миттєво, то поміж двома послідовними цугами хвиль має існувати захисний інтервал, щоби уникнути накладання «хвоста» попереднього сигналу на наступний. Для $n = 1$ величина загасання на останньому проміжку цугу становить 13 дБ. При збільшенні n величина загасання зростає. Враховуючи, що проміжок простору поміж частками не може бути менше за їхню довжину, доходимо висновку, що тривалість окремого логічного елемента у складі комбінації блочного коду має бути $t_0 \geq 2t_p$, а швидкість передавання символів повідомлення можна обчислити за формулою (3).

При формуванні таймерної конструкції захисний інтервал має бути рівним t_0 . Час фіксації фотона для визначення положення часової позиції фотона у таймерній конструкції має бути достатнім, щоби прийняти (поглинути) значну частину енергії фотона, наприклад 75...90 % цієї енергії.

Розглянемо розподіл енергії фотону за його довжиною. Середня потужність електромагнітного коливання є пропорційна квадратові амплітуди коливання:

$$P_{\text{ср}} = k \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} \varphi^2(\tau) d\tau, \quad (6)$$

а функція розподілу енергії фотона за довжиною фотона відносно його повної енергії визначається за формулою

$$p(t) = \frac{k \frac{1}{t} \int_0^t \varphi^2(\tau) d\tau}{P_{\text{ср}}}, \quad (7)$$

де k – коефіцієнт пропорційності;

t – при розрахунках обирається кратним до періоду коливань T .

На рис. 5 представлено графік функції розподілу енергії фотона за його довжиною.

Якщо час прийому $t_{\text{пол}}$ обрати рівним $0,3 t_p$ – тривалості цугу коливань, то за цей час буде прийнято 90 % енергії фотона. Це надає можливість побудувати таймерну конструкцію сигналу аналогічно до поданої на рис. 2 і обрати тривалість цього таймерного сигналу, інформаційно еквівалентного до кодового сигналу, відповідно до виразу

$$t_{\text{тез}} = 2t_0 + 2^5 \cdot 0,3 t_p + t_0.$$

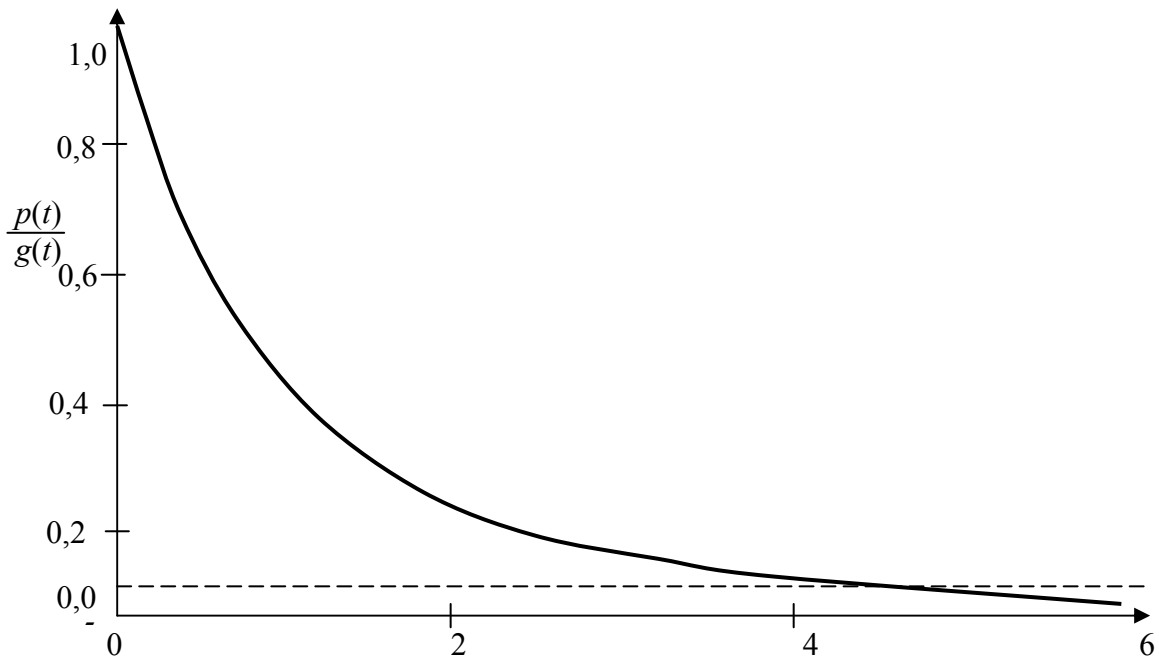


Рисунок 5 – Графік функції розподілу відносної енергії фотона за його довжиною

Тоді швидкість передавання символів буде становитиме

$$B_{ТЗ} = \frac{1}{t_{ТЗ}} = \frac{1}{3t_0 + 2^5 \cdot 0,3t_p} \quad (8)$$

Перейдемо далі до проблем передавання повідомлень на квантовому рівні.

4. Приймач, побудований на квантових засадах. Проблеми кодування повідомлень, введення/виведення інформації з макропристроїв та нанопристроїв є актуальні у царині створювання квантових комп'ютерів. Задля розв'язання проблем кодування на квантовому рівні важливим є мінімально розпізнаваний інтервал поміж двома послідовними частками.

Згідно з останніми дослідженнями в області квантової фізики [14], мінімально можлива відстань поміж квантами електромагнітного випромінювання дорівнює кванту довжини l і є величиною $l = 2,817940285(31) \cdot 10^{-15}$ м. Значення цієї константи цілковито збігається з класичним радіусом електрона. З позицій приймання сигналу, така константа є вихідною при обчисленні мінімального захисного інтервалу часу при конструюванні таймерного сигналу:

$$t_{min.з1} = l/c = 9 \cdot 10^{-16} \text{ с} \quad (9)$$

Відомо, що квант простору дорівнює приблизно $s_{пр} = 10^{-35}$ м, а квант часу, відповідно, дорівнює $t_{вр} = 10^{-43}$ с [15, с. 44]. Менші частки не може бути розрізнено жодними вимірювальними засобами. Обчислимо кількість квантів часу і простору, які відповідають одному періодові коливання електромагнітної хвилі фотона. Одному періоду коливання електромагнітної хвилі фотона відповідає $n_{пр} = \lambda/s_{пр} = 5 \cdot 10^{-7}/10^{-35} = 50 \cdot 10^{27}$ квантів простору. Час поширення одного коливання електромагнітної хвилі фотона $t_{p1} = \lambda/c = 1,67 \cdot 10^{-16}$ с. Тривалості одного періоду коливання електромагнітної хвилі фотона відповідає $n_{вр} = t_{p1}/t_{вр} = 1,67 \cdot 10^{-16}/10^{-43} = 1,67 \cdot 10^{27}$ квантів часу.

Наведені властивості свідчать про засадничу можливість доволі точно установлювати положення фотона у просторі й часі, аналізуючи один чи кілька перших періодів цугу електромагнітних коливань фотона, що може бути використано за для побудови квантового приймача фотонів за таймерного кодування.

За позиційного кодування наявність «довгого хвоста» фотона примушує обирати захисний інтервал не меншим за довжину фотона. Швидкість передавання у цьому разі може обчислюватись за формулою (3), в якій $t_0 \geq 2t_p$.

Створюючи таймерну конструкцію сигналу, можемо часовий інтервал $2t_{\Delta}$ (див. рис. 2) прирівняти до кількох періодів електромагнітних коливань фотона: $2t_{\Delta} = m t_{p1}$, де m – кількість періодів електромагнітного коливання фотона, за яких забезпечується надійна фіксація наявності

фотона. Що стосується захисних інтервалів часу, то вони мають перевищувати довжину «хвоста» фотона: $t_0 \geq 2t_p$. Отже, тривалість таймерного сигналу, інформаційно еквівалентного кодовому сигналові, дорівнює $t_{тс4} = 4t_p + 2^5 m t_{p1}$, а швидкість передавання символів становитиме

$$B_{т4} = \frac{1}{t_{тс4}} = \frac{1}{4t_p + 2^5 \cdot m t_{p1}} \quad (10)$$

На квантовому рівні мають місце стохастичні ефекти, вплив яких можна компенсувати, наприклад, шляхом повторного передавання повідомлень.

Ефективність способу кодування визначимо через коефіцієнт ефективності як відношення швидкості передавання таймерною конструкцією сигналу до швидкості передавання повідомлень позиційним кодом:

$$K_{т/п} = \frac{B_{ти}}{B_{пи}} \quad (11)$$

Результати розрахунків цього коефіцієнта наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Ефективність таймерних сигнальних конструкцій відносно позиційного коду

Відносна ефективність	Засада побудови приймального пристрою			
	фотосинтез	зір людини	оптичний канал	квантовий
$K_{т/п}$	2,5	2,5	0,64	1,97

Висновки. Фотонні канали зв'язку у випадках застосування приймачів, побудованих на засадах фотосинтезу, зору людини, існуючих нанотехнологій та квантового комп'ютера, мають більш високу пропускну здатність за використання таймерних конструкцій сигналів у порівнянні з позиційним кодуванням сигналів. Отже, в даній роботі знайдена межа пропускну здатності та максимальна швидкість передавання у фотонних каналах зв'язку для трьох випадків застосування приймачів: на базі живого органічного середовища, нанотехнологічних промислових систем та квантового простору, що дозволяє проводити вибір поміж позиційними та таймерними кодами. Завданнями подальших досліджень можуть бути питання вибору оптимальної розрядності кодів, раціонального часового інтервалу таймерної конструкції та захисного інтервалу поміж частками, які несуть інформацію.

Література

1. *Borisenko V.E.* Nanostructure Based Informatics // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures / Ed. V. E. Borisenko et al. Minsk: BGUIR, – 1995. P. 246-256.
2. *Чисар И.* Теория информации: теоремы кодирования для дискретных систем без памяти / И. Чисар, Я. Кернер; пер. с англ. – М.: Мир, – 1985. – 400 с.
3. *Захарченко Н. В.* Эффективные системы передачи информации / [Н.В. Захарченко, М.А. Мамедов, Е. М. Рудый, А. А. Вараксин, М. М. Гаджиев]; под ред. Н. В. Захарченко. – Баку ЭЛМ, – 2007. – 568 с.
4. *Аксенов Г.П.* Причина времени / Аксенов Г. П. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 255 с.
5. *Комиссаров Г.Г.* Химия и физика фотосинтеза / Комиссаров Г. Г. – М., 1980. – 64 с.
6. *Колеман У.* Как растения производят кислород? / У. Дж. Колеман, Говинджи // В мире науки. – 1990. – № 4. – С. 34 – 41.
7. *Бауэр Э. С.* Теоретическая биология / Бауэр Э.С. – М.-Л., 1935.
8. *Красновский А. А.* Преобразование энергии света при фотосинтезе. Молекулярные механизмы / Красновский А.А. – М., 1974.
9. *Белянин В.Н.* Светозависимый рост низших фототрофов (в управляемых условиях) / Белянин В.Н. – Новосибирск, 1984.
10. *Федоров Е.С.* Первые шаги в деле распознавания расположения атомов в кристаллах / Федоров Е.С. // Природа. – 1915. – № 3. – С. 339–350.
11. *Островский М. А.* Механизмы фоторецепции позвоночных / М.А. Островский, В.И. Говардовский // Физиология зрения. – М., 1992. – С. 5–59.
12. *Рере У. М. J.* Photochem. Photobiology / U. M. Rere. – 1999. – V. 48. – P.1–10.
13. *Енютин Г.В.* Закольцованный фотон / Г.В. Енютин. <http://sciteclibrary.ru/rus/catalog/pages/9521.html>.
14. *Косинов Н.В.* Новые фундаментальные физические константы / Косинов Н.В. <http://nt.ru/tp/ng/nfk.htm>.
15. *Демидов В.* Время, хранимое как драгоценность / Демидов В. http://www.oclock.info/library/book/demidov/nt_vh001.shtml