УДК 621.372.544

Лукін В. Є., к.пед.н.
(Державний університет телекомунікацій, м. Київ. +380 (95) 458 99 10. lukin2008@ukr.net)

ПРОБЛЕМИ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ В ОПТИЧНИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ВСЕРЕДИНІ БУДІВЛІ

Лукін В. Є. Проблеми цифрової обробки сигналів в оптичних системах зв'язку, що використовуються всередині будівлі. В роботі розглянуто проблеми цифрової обробки сигналів, які стосуються видимого оптичного зв'язку та їх можливі вирішення. Одним з підходів до збільшення швидкості передачі даних є використання ефективних типів модуляції. Для покращення прямої швидкості модуляції доцільним є використання блакитного оптичного фільтра в оптичних приймачах. Друга проблема оптичного зв'язку – це дуплексна передача. Розглянуто кілька підходів: використання світлодіодів інфрачервоного або імпульсного освітлення в портативних пристроях для передачі повідомлень, використання ретрорефлекторів (retro-reflector) для модуляції падаючого світла з метою створення сигналу передачі повідомлень. Третя проблема оптичного зв'язку – це контроль сили світла. Один з методів, який може бути використаний – це значне зменшення яскравості світлодіодів, для того, щоб людина сприймала світло як вимкнене. Показано, що використання цифрової обробки сигналів може значно збільшити продуктивність видимого оптичного зв'язку.

Ключові слова: видимий оптичний зв'язок, система оптичного зв'язку, світлодіод, швидкість прямої модуляції, пропускна здатність, коефіцієнт помилок, цифрова обробка сигналів

Лукин В. Е. Проблемы цифровой обработки сигналов в оптических системах связи, которые используются внутри здания. В работе рассмотрены проблемы цифровой обработки сигналов, которые касаются видимой оптической связи и возможные пути решения. Одним из подходов к увеличению скорости передачи данных есть применение эффективных типов модуляции. Для улучшения скорости прямой модуляции целесообразным является использование голубого оптического фильтра в оптических приемниках. Другая проблема оптической связи – это обеспечение дуплексной передачи. Рассмотрено несколько подходов: применение светодиодов инфракрасного или импульсного освещения в портативных устройствах для передачи сообщений, использование ретрорефлекторов (retro-reflector) для модуляции падающего света с целью создания сигнала передачи сообщений. Третья проблема оптической связи - это контроль силы света. Метод, который может быть использован – это значительное уменьшение яркости светодиодов, для того, чтобы люди воспринимали свет, как выключенный. Показано, что использование цифровой обработки сигналов может значительно увеличить продуктивность видимой оптической связи.

Ключевые слова: видимая оптическая связь, система оптической связи, светодиод, скорость прямой модуляции, пропускная способность, коэффициент ошибок, цифровая обработка сигналов

Lukin V. Ye. Problems of digital signal processing in optical communication systems for inside using. The paper discusses the problems of digital signal processing, which relate to the visible optical communication and possibility its solutions. The way to increase the transmission bit rate is the use of advanced modulation formats. One of the ways of increasing direct modulation rate is the use of the blue optical filter in optical receivers. Another problem of the optical communication is support of duplex transmission. Several approaches have been considered: the use of infrared light-emitting diodes, or pulse lighting in portable devices for the transmission of messages, the use of retro-reflectors to modulate the incident light for creating a signal of transmitting messages. The third problem is the control of light intensity. Method that can be used is a significant decrease in the brightness of LEDs, so, that people perceive the light as off switched. It has been shown that the use of digital signal processing can significantly increase the productivity of the visible optical communication.

Keywords: visible optical communication, optical communication system, LED, speed of direct modulation, bandwidth, bit error ratio, the digital signal processing.

Вступ. Реалізація розширеної ефективності світлодіодів та тенденція зниження витрат на оптичні освітлювальні системи сприятиме ширшому застосуванню їх в багатьох напрямках. Оптичні освітлювальні системи з додатковим позитивним функціональним призначенням щодо забезпечення оптичного безпровідного зв'язку дозволять застосування систем зв'язку за досить незначних додаткових витрат. Видимий оптичний зв'язок забезпечить послуги безпечного обміну інформацією, нешкідливість для людського організму та відмінне застосування в деяких радіочастотних обмежених зонах.

При порівнянні з традиційною лампою розжарювання, світлодіод споживає менше половини енергії при такому ж виході люменів. Останнім часом енергетична ефективність світло діоду перевищила люмінесцентні лампи, що робить його

одним з найефективніших джерел світла на ринку. Головні постачальники світло діодів (Cree, Nichia, Osram, Lumileds, etc…) конкурують у покращенні їх продуктивності. Наприклад, компанія Cree повідомила про досягнення виходу енергії в 254 lm/W при струмі живлення 350 mA в квітні 2012 року [1].

Світлодіод має унікальні характеристики, що дають можливість створювати нові застосування, які неможливі з іншими видами джерел світла. Він допускає значно більш високі швидкості модуляції, ніж традиційні джерела світла, такі, як люмінесцентні лампи. Як наслідок, світлодіодне освітлення можна використовувати для видимого оптичного зв'язку та для оптичних безпровідних мереж всередині будівлі.

Підвищення швидкості передачі оптичного зв'язку всередині приміщень. Існує два основних типи структури пристроїв для створення білого світлодіоду, які використовуються в освітленні. Перший тип складається з блакитного світло діодного чипа зі шаром люмінофора, покритого поверх нього. Коли електричний струм підводиться до світлодіодного чипу, випромінюється блакитне світло, і частина його поглинається люмінофором, щоб створити другий колір – жовте світло. В результаті поєднання блакитного та жовтого світла створюється біле світло. Інший тип світлодіоду створюється шляхом поєднання трьох основних кольорових чипів (RGB). Три чіпи випромінюють по одному кольору одночасно і в результаті створюється біле світло.

Перевагою люмінофору для створення білого світлодіоду є його невисока вартість. Однак, люмінофорне перетворення світла робить діод непридатним для високошвидкісної прямої модуляції, тому що час спрацьовування люмінофору є значно більшим, ніж світлодіодного чіпу, і швидкість прямої модуляції зазвичай обмежена до кількох MHz. Цей недолік став причиною кількох досліджень, які б мали покращити швидкість прямої модуляції білого світлодіоду.

Одним із підходів для покращення прямої швидкості модуляції є використання блакитного оптичного фільтру в приймачах, щоб усунути повільну реакцію жовтого світла. Однак це призводить до втрати потужності, так як уся енергія у видимому оптичному спектрі, крім блакитної частини, блокується і, як наслідок, обмежує відстань передачі за допомогою оптичного зв'язку.

За рахунок попереднього вирівнювання та подальшого вирівнювання характеристики світлодіоду може бути досягнута швидкість модуляції 40 Mb/s та 80 Mb/s з попередньо вирівняною on-off-маніпуляцією передачі (OOK) без використання та з використанням оптичного блакитного фільтру, і 100 Mb/s при подальшому вирівнюванні on-off-маніпуляції (OOK) повідомляється в роботах [2], [3] та [4] відповідно. Шляхом оптимізації електронної схеми, з'єднання оптичного зв'язку швидкість в 125 Mb/s при коефіцієнті помилок нижче $2x10^{-3}$ може бути досягнута. Використання в приймачах замість PIN-діоду фотодіодів з лавинним множенням (APD) може збільшити швидкість передачі до 230 Mb/s [5].

Іншим підходом до збільшення швидкості передачі даних є використання передових форматів модуляції. Ортогональне частотне розділення каналів (OFDM) (форма дискретного багато тонального процесора (DMT)) може бути використане для покращення спектральної ефективності [6]. Реалізація бітів та методів енергетичного навантаження піднесучих (subcarriers) сигналів ортогонального частотного розділення каналів підвищує швидкість до 231 Mb/s (з використанням PIN-діодів) та до 513 Mb/s (з використанням лавинних фотодіодів (APD)) як це було показано в роботах [7] та [8] відповідно.

Швидкість передачі даних 803 Mb/s була продемонстрована з застосуванням кольорових (LGB) світлодіодів, які дозволяють використовувати спектральне ущільнення (WDM) для передачі даних різними кольорами, що випромінюють такі світлодіоди [9]. Крім використання спектрального ущільнення, паралельна передача даних в кількох світлодіодах, використовуючи методи мультивведення та мультививедення, також може збільшити швидкість передачі даних за допомогою оптичного зв'язку видимого діапазону [10].

Забезпечення дуплексного передавання інформації. Оптичний зв'язок є циркулярним зв’язком, який ускладнює забезпечення каналу передачі повідомлень що виходять від користувача. В наявних роботах було розглянуто кілька підходів, таких як використання світлодіодів інфрачервоного діапазону або імпульсного освітлення в портативних пристроях для передачі повідомлень, що надходять від користувача. Ретрорефлектор (retro-reflector) може бути використаний для модуляції падаючого світла, створюючи сигнал передачі повідомлень що виходять від користувача [11]. Було також розглянуто використання радіочастоти для забезпечення зворотного каналу передачі. На даний момент немає конкретних висновків стосовно того, яке рішення є найкращим, і існує потреба в подальших дослідженнях, щоб розробити можливі методи та порівняти альтернативи.

Керування рівнем яскравості світла. Іншою проблемою оптичного зв’язку є те, як підтримувати з’єднання, коли світло вимкнене. Якщо світло увімкнене, то оптична передача забезпечується безкоштовно, так як вона вже використовується для освітлення. Однак, в денний час, люди зазвичай вимикають світло в кімнаті. Для того, щоб підтримати лінію зв’язку, світлодіод повинен бути увімкнений. В такому випадку, подібно до радіочастотного бездротового зв’язку, енергія, яка споживається для передачі даних, не є безкоштовною. Один з методів, який може бути використаний, це значне зменшення яскравості світлодіодів, для того, щоб люди сприймали світло як вимкнене [12].

Цифрова обробка сигналів для оптичного зв’язку. Системи оптичного зв’язку, які використовують світлодіоди на люмінофорах, є більш рентабельними, порівняно з системами на RGB білих світлодіодах, однак повільна реакція люмінофора обмежує пряму швидкість модуляції. На Рис. 1 показана частотна характеристика комерційно доступного світлодіода з використанням люмінофора, що може застосовуватись для освітлення (Cree, XLamp XR-E LED), показуючи максимальну частоту модуляції 1.28 MHz (на рівні 3 dB). Як наслідок, швидкість передачі даних буде обмежена до значення 1 Mb/s, якщо не буде використовуватися схема вирівнювання або розширена модуляція.

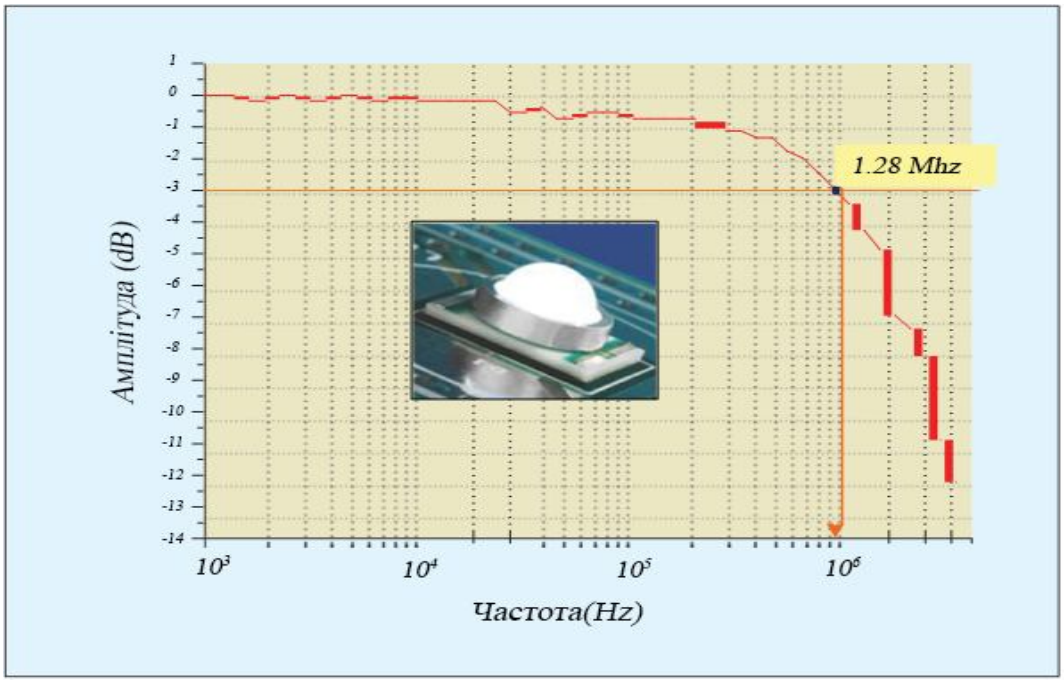

Рис. 1. Виміряна смуга частот модуляції світлодіоду, який створений на основі люмінофору

Перш за все, ми обговоримо застосування еквалайзеру кінцевої імпульсної реакції (FIR) для підвищення смуги частот прямої модуляції. Оптичний блакитний фільтр при цьому не

використовується. Експериментальний результат показує збільшення прямої швидкості модуляції світлодіодів білого світла в режимі оптичного зв'язку приблизно в 10 разів. Порівняно з попередньо наведеними даними, використання схеми широкосмугового вирівнювання, яка була створена на основі дискретних конденсаторів та резисторів [13], показує покращення якості сигналу та відстані передачі. Крім того було продемонстровано практично безпомилкову передачу даних зі швидкістю 10 Mb/s на відстань 1 м.

Було проведено моделювання з використанням простого FIR - еквалайзеру, щоб усунути вплив каналу оптичного зв'язку. Електричний і оптико електричний канал системи оптичного зв'язку (E-O-E channel) може бути змодельований як резистивно-ємнісний контур низької частоти першого порядку, як показано на Рис. 2 *(a)*. Відповідна імпульсна реакція аналогової системи резистивно-ємнісного контуру низької частоти може бути виражена наступною формулою:

$$H_1(t) = \exp\left(-\frac{t}{RC}\right). \qquad \textbf{(1)}$$

В цьому випадку розроблений еквалайзер може бути змодельований як високочастотний ланцюг першого порядку, щоб компенсувати реакцію каналу, як це показано на Рис. 2 *(b)*. Функція передачі (в частотному діапазоні) цього еквалайзера може бути виражена наступною формулою:

$$H_2(\omega) = \frac{R_2}{\frac{R_1}{j\omega CR_1} + R_2} \quad . \qquad \textbf{(2)}$$

У співвідношенні (1) величину 1/RC встановлено для значення 1,28 MHz, яка вимірюється на рівні 3 дБ та визначає ширину смуги пропускання системи (Рис. 2). Співвідношення (2) використовувався для моделювання еквалайзера та обрання відповідних параметрів, щоб компенсувати реакцію EOE оптичної системи.

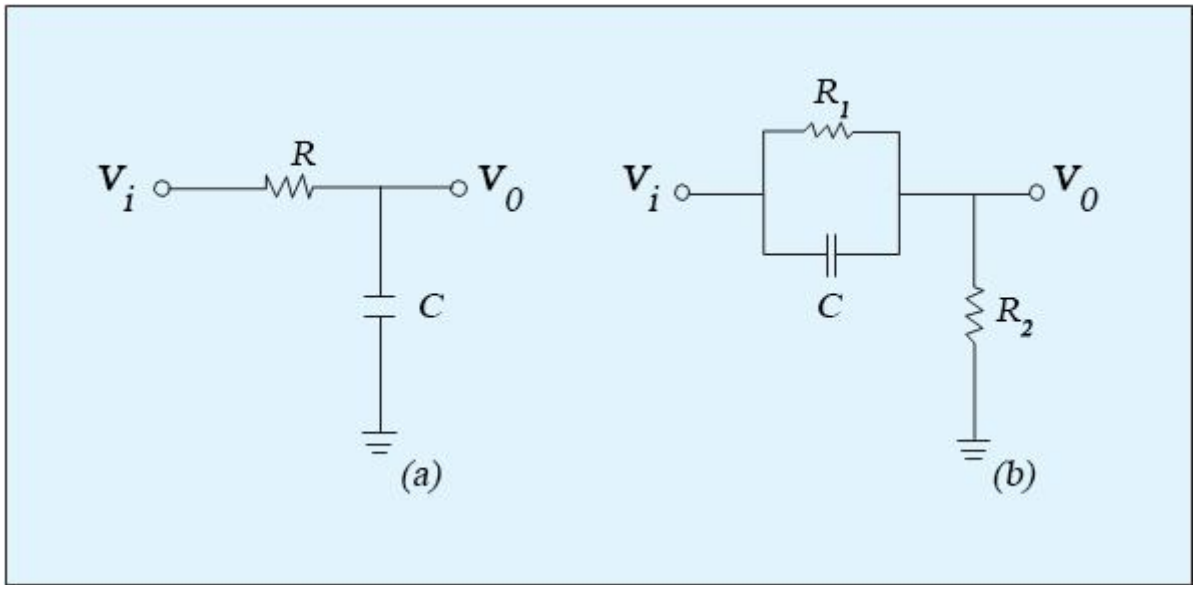

Рис. 2. Ланцюгова модель каналу оптичного зв'язку *(a)*
та ланцюгова модель еквалайзеру *(b)*

Було проведено випробування еквалайзеру в каналі оптичного зв'язку (Рис. 3). Псевдовипадкова двійкова послідовність (PRBS) даних була застосована зі швидкістю 10 Mb/s до світлодіоду на базі люмінофору. Послідовність формувалась на основі генератор сигналів вибіркової форми (AWG)). Ширина смуги частот та роздільна здатність генератора

сигналів вибіркової форми (AWG) становили 20 MHz та 14 bit відповідно. На світлодіод подавалась постійна напруга в 2 V. Величина напруги модуляції сигналу складала від 0.1 до 0.5 V. Щоб підвищити спрямованість та дальність дії використовували лінзи, при цьому відстань передачі у вільному просторі була встановлена на рівні 1 м. Видимий сигнал сприймавсь приймачем на базі PIN-діоду на кремнієвій основі, посилювавсь і подававсь на осцилограф реального часу (RTO). ПІН-діод мав робочу смугу довжин хвиль 350-1100 nm з чутливістю в 0.65 A/W та активною площею в 13 mm^2. Ширина смуги робочих частот складала 17 MHz та середньо-квадратична величина шуму мала значення 530 μV. Ширина смуги частот осцилографа (RTO) становила 100 MHz.

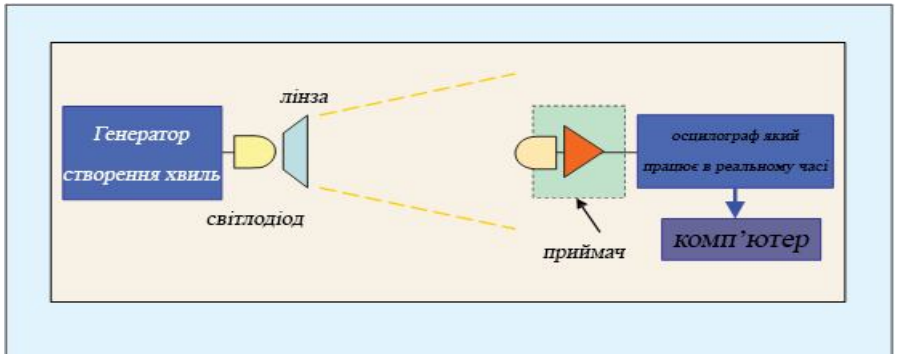

Рис. 3. Експериментальна установка оптичного зв'язку

BER (коефіцієнт помилок) був виміряний, використовуючи значення *Q*-фактору для різних око–діаграм. Наприклад, отримана око-діаграма для швидкості передачі 10 Mb/s показана на Рис. 4. Вставка на Рис. 4*(a)* показує виміряну око-діаграму без використання запропонованого FIR-еквалайзера. Діаграма повністю закрита завдяки міжсимвольним завадам (ISI), які створені за рахунок обмеженої ширини смуги пропускання світлодіоду. Інтенсивність помилкових бітів не може бути проаналізованою в цьому випадку.

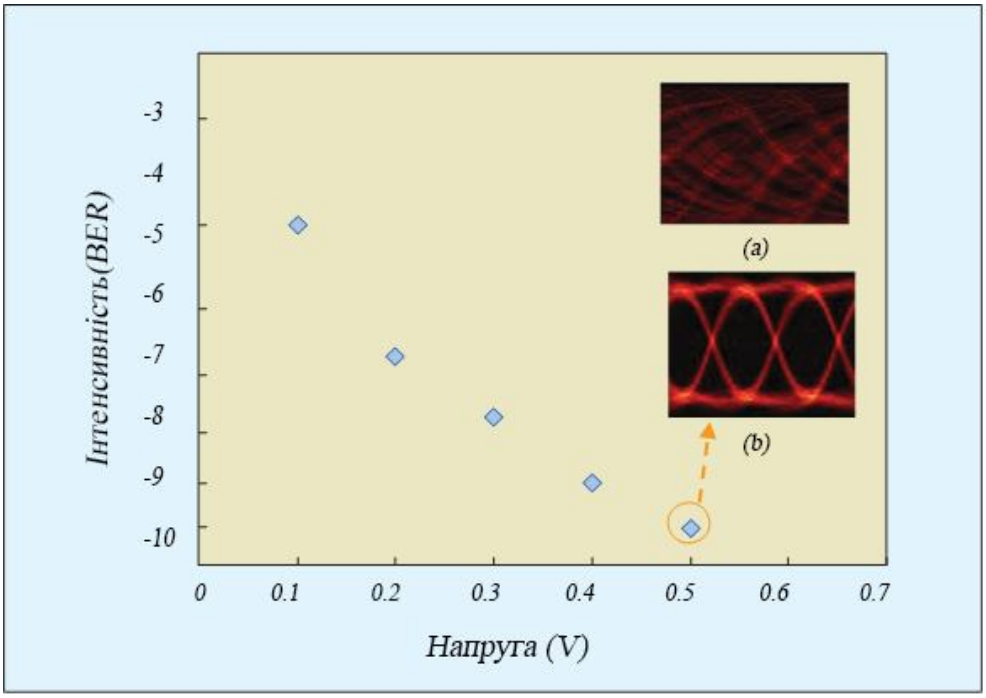

Рис. 4. Коефіцієнт помилок системи оптичного зв'язку без використання еквалайзеру *(a)*, та використанням еквалайзеру *(b)*

Вставка на Рис. 4*(b)* показує око-діаграму на основі FIR-еквалайзера зі значно покращеним розкриттям діаграми. Якщо повна амплітуда модулюючої напруги ≥0.5 V, то може бути досягнута практично безпомилкова передача BER (коефіцієнт помилок) ≤ 10^{-9}. Порівняно з попереднім прикладом з використанням високочастотної схеми вирівнювання, яка створена на основі дискретного конденсатора та резистора [12], дана запропонована схема цифрової обробки сигналів показує покращення дальності передачі (з 10 sm до 1 m) та якості сигналу BER ≤ 10^{-9}, повна амплітуда модулюючої напруги зменшується з 1V до 0.5V), а також цифровий FIR- еквалайзер дозволяє більш точно контролювати власні параметри.

Подальше збільшення швидкість передачі даних в каналі оптичного зв'язку, досягається за рахунок 4-х рівневої амплітудної модуляції (4-ASK) і цифрової фільтрації [13, 14]. Збільшення в 20 разів швидкості прямої модуляції білого світлодіоду системи оптичного зв'язку досягається з використанням лише цифрового фільтра, не застосовуючи оптичний блакитний фільтр. Цифровий фільтр та косінусоїдальний (SRRC) фільтр використовуються для вирівнювання сигналів.

На Рис. 5 показано проходження сигналу амплітудної модуляції, використовуючи цифрову обробку сигналів. По-перше, відображається двійкова послідовність символів амплітудної модуляції, які містить 4 різні амплітудні рівні, для представлення комбінації з 2-х біт. Виконується збільшення частоти вибірки за рахунок встановлення нулів між елементами вибірки. Цифровий FIR-еквалайзер створює частотну компенсацію відгуку системного каналу.

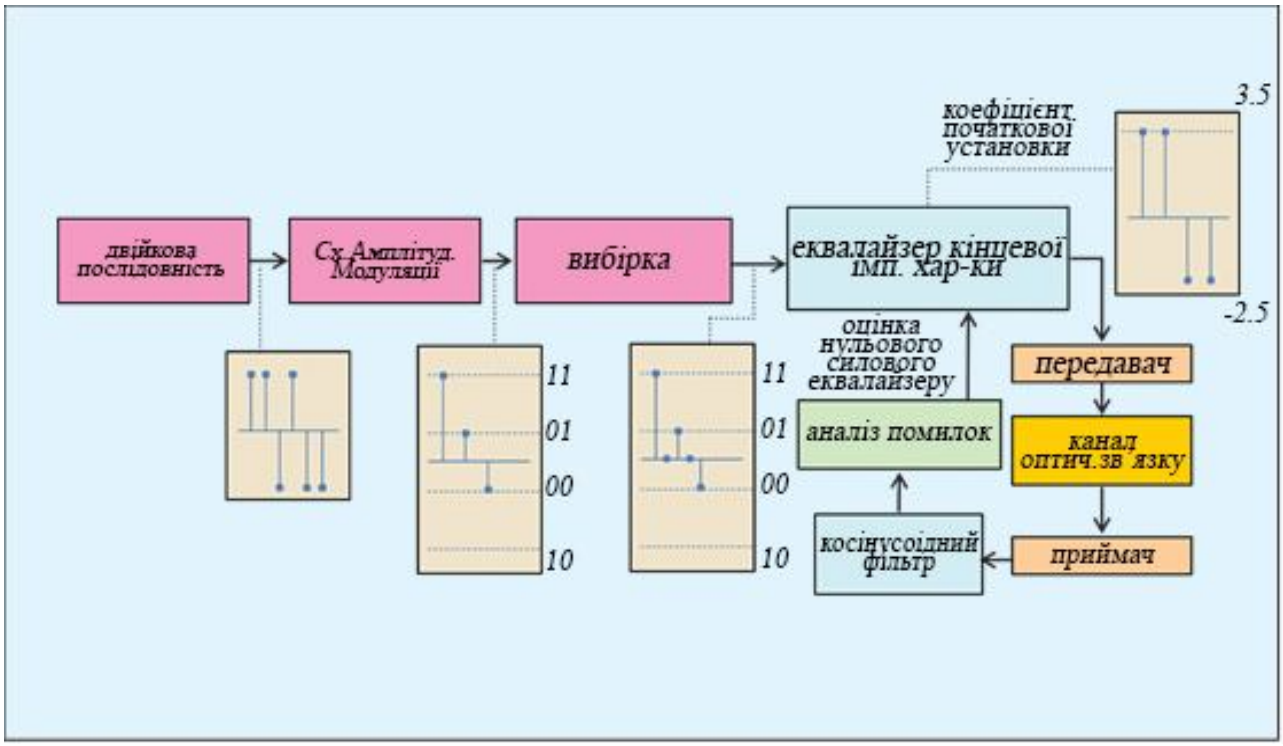

Рис. 5. Структурна схема цифрової обробки сигналу
при 4-х рівневій амплітудній модуляції(AM)

Канал передачі оптичного зв'язку і радіоприймач є ті самі, які описані в попередньому експерименті. Косінусоїдальний (SRRC) фільтр використовується після приймача. Процес адаптації з адаптивним управлінням FIR-еквалайзера полягає в передачі відомих серій навчальних символів та аналізі отриманих зразків. Результат використовується для регулювання коефіцієнтів FIR-еквалайзера для наступної передачі. Оцінка базується на

FFT(швидке перетворення Фурьє), щоб інвертувати реакцію каналу. FIR фільтр має 13 відведень, які позначаються як $h[t]$, з початковою установкою $h[0]=3.5$, $h[1]=3.5$, $h[2]=–2.5$, $h[3]=–2.5$, в усіх інших випадках $h=0$. Після 10 ітерацій коефіцієнти фільтра зходяться до фіксованих чисел і система стабілізується (стан узгодженої фільтрації). Оптичний амплітудний символ формується з урахуванням кінцевого результату фільтру FIR-еквалайзера і функції передачі фізичного електро-оптико-електричного каналу. Косинусоїдальний (SRRC) фільтр в приймачі підвищує співвідношення сигнал-шум (SNR) прийнятого сигналу. Математичний вираз косинусоїдального фільтру описаний в [15].

Інтенсивність помилкових бітів (BER). Вимірювання коефіцієнту помилок були виконані, використовуючи вимірювання *Q*-фактору різних око-діаграм, отриманих для різних напруг модулюючого сигналу, як показано на Рис. 6*(a)* для око-діаграми на швидкості передавання 20 Mb/s. Вставка на Рис. 6*(a)* показує око-діаграму без використання запропонованої схеми. Діаграма повністю закрита через між символьні перешкоди. Тому інтенсивність помилкових бітів BER не може бути проаналізована в цьому випадку. Чітка та розгорнута око-діаграма може бути отримана, використовуючи запропоновану схему, як показано на Рис. 6*(b)*. Якщо амплітуда модулюючої напруги ≥ 1V, то може бути досягнута практично безпомилкова передача – BER ≤ 10^{-9}.

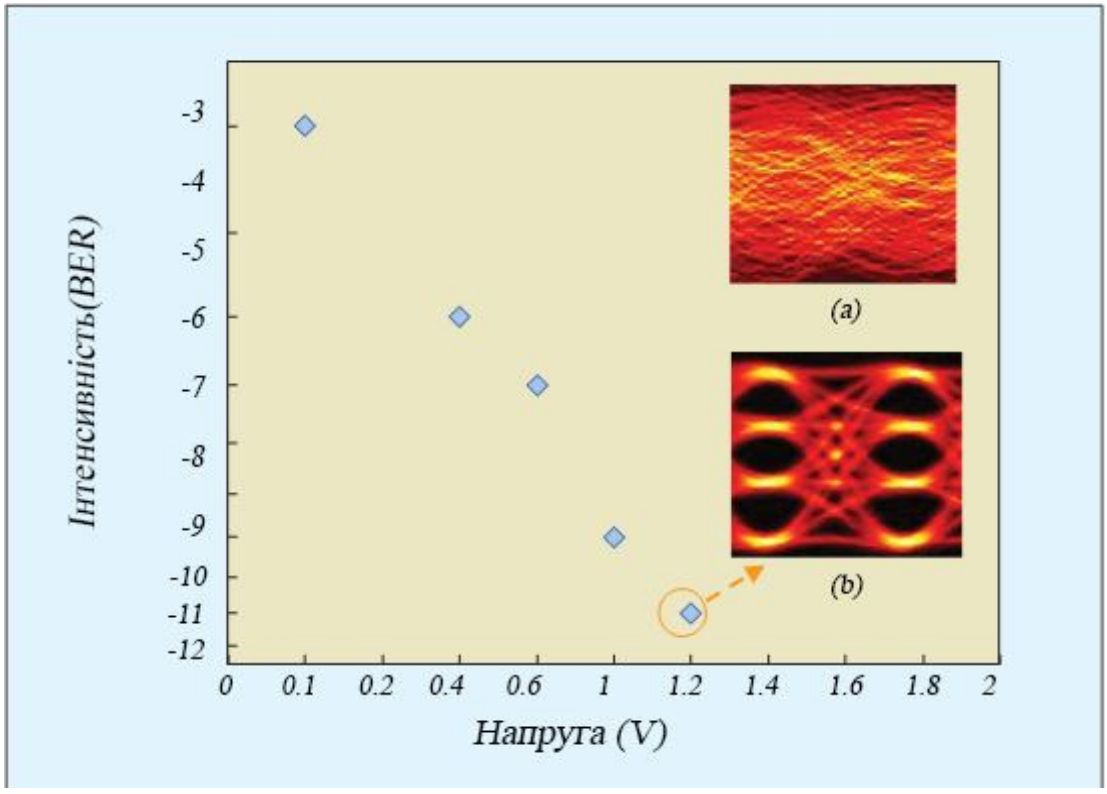

Рис. 6. Залежність коефіцієнта помилок від напруги модуляції

Висновки. В даній статті було обговорено переваги та проблеми оптичного зв'язку всередині приміщень, а також певні шляхи вирішення цих проблем. Використання цифрової обробки сигналів може стати ефективним засобом для підвищення можливостей оптичного зв'язку. Було запропоновано та продемонстровано використання простих цифрових еквалайзерів для покращення смуги пропускання світлодіодного каналу оптичного зв'язку. Оптичний блакитний фільтр при цьому не використовувався. Результати експериментів

показали збільшення швидкості прямої модуляції системи оптичного зв'язку приблизно в 10 разів при амплітудній маніпуляції сигналу. Також було показано шляхи підвищення швидкості прямої модуляції білого світлодіоду системи оптичного зв'язку в 20 разів.

Література

1. M. Wright, "Cree announces new EasyWhite LED and R&D efficacy high," LEDs Mag., April, 2012/

2. H. Le-Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D.Jung, and Y. Oh, "High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization," IEEE Photon.Technol. Lett., vol. 20, pp. 1243–1245, 2008/

3. H. Le-Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee,D. Jung, and Y. Oh, "80 Mbit/s visible light communications using pre-equalized white LED," in Proc. ECOC, 2008, Paper P.6.09.

4. H. Le-Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D.Jung, and Y. Oh, "100-Mb/s NRZ visible light communications using a post-equalized white LED," IEEE Photon.Technol. Lett., vol. 21, pp. 1063–1065, 2009.

5. J. Vucˇic/, C. Kottke, S. Nerreter, K. Habel, A. Buttner, K.-D. Langer, and J. W. Walewski, "230 Mbit/s via a wireless visible-light link based on OOK modulation of phosphorescent white LEDs," in Proc. OFC, 2010, Paper OThH3.

6. J. Grubor, K.-D. Langer, S. C. J. Lee, T. Koonen, and J. W.Walewski, "Wireless high-speed data transmission with phosphorescent white-light LEDs," in Proc. ECOC, 2007,Paper PDS 3.6.

7. J. Vucˇic/, C. Kottke, S. Nerreter, A. Buttner, K.-D. Langer, and J. W. Walewski, "White light wireless transmission at 200+ Mb/s net data rate by use of discrete-multitone modulation," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 21, pp.1511–1513, 2009.

8. J. Vucˇic/, C. Kottke, S. Nerreter, K.-D. Langer, and J. W. Walewski, "513 Mbit/s visible light communications link based on DMT modulation of a white LED," J. Lightwave Technol., vol. 28, pp. 3512–3518, 2010.

9. J. Vucˇic/, C. Kottke, K. Habel, and K.-D. Langer, "803 Mbit/s visible light WDM link based on DMT modulation of a single RGB LED luminary," in Proc. OFC, 2011. Paper OWB6.

10. L. B. Zeng, D. C. O'Brien, H. Le Minh, G. E. Faulkner, K. Lee, D. Jung, Y. Oh, and E. T. Won, "High data rate multiple input multiple output (MJMO) optical wireless communications using white LED lighting," IEEE J. Selected Areas in Comm., vol. 27, pp. 1654–1662, 2009.

11. T. Komine, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Bidirectional visible-light communication using comer cube modulator," IEIC Technical Report, vol. 102, pp. 41–46, 2003.

12. T. Borogovac, M. B. Rahaim, M. Tuganbayeva, and T. D.C. Little, " 'Lights-off' visible light communications," in Proc. IEEE Workshop on Optical Wireless Comm. (OWC),2010, Paper 6.

13. Y. F. Liu, C. Y. Chang, C. W. Chow, and C. H. Yeh, "Equalization and pre-distorted schemes for increasing data rate in in-door visible light communication system," in Proc. OFC, 2011, Paper JWA083.

14. C. H. Yeh, Y. F. Liu, C. W. Chow, Y. Liu, P. Y. Huang, and H. K. Tsang, "Investigation of 4-ASK modulation with digital filtering to increase 20 times of direct modulation speed of white-light LED visible light communication system," Optics Express, vol. 20, pp. 16218–16223, 2012.

15. J. G.Proakis and M. Salehi, Digital Communications,(McGraw-Hill, 2007), Chap. 9.

Дата надходження в редакцію: 16.04.2014 р. Рецензент: д.т.н., проф. Манько О. О.