

УДК 004.3

Ладик О. І., к.т.н.; Богатирьова М. В. (Инст-т телекомунікаційних систем НТУУ «КПІ»)

СИСТЕМА БЕЗПРОВОДОВОЇ ОПТИЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ПІДВИЩЕНОЇ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ.

Ладик О. І., Богатирьова М. В. Система безпроводової оптичної передачі даних підвищеної завадостійкості. Проведений аналіз основних властивостей відкритих оптичних систем. Дана порівняльна оцінка завадостійкості сигналів з різними типами модуляції, запропоновано використання методу двоступеневої модуляції по затримці і поляризації, а також розроблено схеми реалізації системи на основі вибраних параметрів.

Ключові слова: ВІДКРИТА ОПТИЧНА СИСТЕМА, FSO, МОДУЛЯЦІЯ, ПОЛЯРИЗАЦІЯ, ЗАВАДОСТІЙКОСТЬ

Ладик А. И., Богатырева М. В. Система беспроводной оптической передачи данных повышенной помехоустойчивости. Проведен анализ основных свойств открытых оптических систем. Дана сравнительная оценка помехоустойчивости сигналов с различными типами модуляции, предложено использование метода двухступенчатой модуляции по задержке и поляризации, а также разработаны схемы реализации системы на основе выбранных параметров.

Ключевые слова: ОТКРЫТАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА, FSO, МОДУЛЯЦИЯ, ПОЛЯРИЗАЦИЯ, ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ

Ladyk O. I., Bogatyriova M. V. The system of free space optical data communication with increased noise immunity. The basic properties of the open optical systems were analyzed. A comparative assessment of the noise immunity of signals with different types of modulation is given, the method of two-tier modulation of delay and polarization is proposed. The scheme of the system bases on selected parameters is developed.

Keywords: FREE SPACE OPTICS SYSTEM, FSO, MODULATION, POLARIZATION, NOISE IMMUNITY

Вступ і постановка задачі. Системи безпроводової оптичної передачі FSO (Free Space Optics), які використовуються для передавання великих обсягів даних, стають у світі все більш поширеними і складають конкуренцію іншим технологіям: xDSL та кабельним модемам, оптоволоконним і безпроводовим радіолініям. Перевагами технології FSO є малі терміни інсталяції і незалежність від традиційної проводової інфраструктури. Особливо широко використовуються такі системи під час проведення тимчасових заходів – виставок, фестивалів, а також при необхідності тимчасового під'єднання до мережі, наприклад при проведенні рекламної кампанії. При цьому швидкість такого тимчасового каналу може перевищувати 1 Гбіт/с [1].

Перевагами FSO є також те, що вони не потребують ліцензійності за частотним діапазоном, мають високий захист даних, надійність, витрати на їх встановлення одноразові. Інші засоби передавання даних потребують постійного фінансування – або за оренду каналу, провода чи оптоволокна, місця в кабельній каналізації, або за використання радіочастот. Це потребує залучення сторонніх організацій та викликає зростання вартості виконання проекту. Проте основними недоліками таких ліній є невисока завадостійкість від сторонніх джерел світла. Тому задача підвищення їх завадостійкості є актуальною.

Аналіз параметрів системи. Завадостійкість передачі інформації визначається, в першу чергу, природними шумами і завадами, які діють в оптичному каналі. Для системи з прямим детектуванням, що працює в умовах земної атмосфери в режимі обмеження зовнішніми шумами, такими факторами є амплітудні флуктуації прийнятого сигналу, викликані атмосферною турбулентністю і фоновим шумом. При прямому детектуванні оптичний приймач працює в режимі рахунку фотоелектронів [2].

У цифрових оптичних системах передачі інформації з прямим детектуванням найбільшого поширення набули кодово імпульсна амплітудна модуляція (КІАМ) та кодово імпульсна поляризаційна модуляція (КІПМ). Імовірність помилкового прийому сигналу для цих видів модуляції в разі обмеження зовнішніми шумами підпорядковується розрахункам за допомогою статистичної теорії оптичного зв'язку [3]. Були проведені подібні розрахунки для вказаних видів модуляції і побудовані графіки залежності ймовірності помилки (P_0) для

КІАМ і КІПМ при постійних значеннях дисперсії флуктуації інтенсивності сигналу σ_i^2 (рис. 1) та кількості фонових фотоімпульсів n_ϕ (рис. 2).

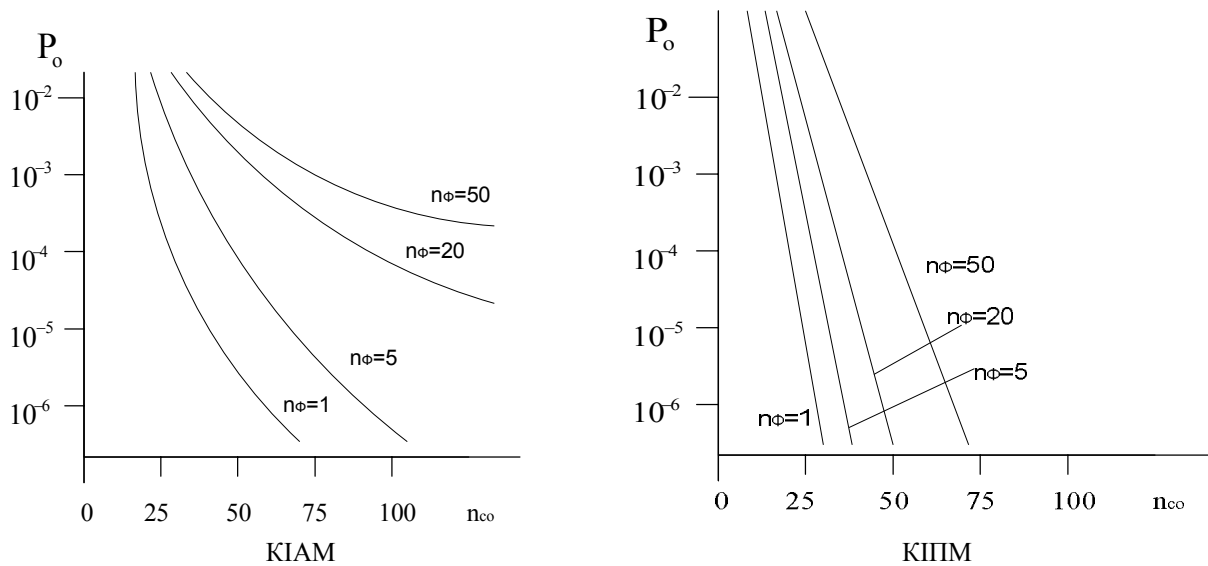


Рис. 1. Залежність ймовірності помилки від середнього числа сигнальних фотовіддіків

Графіки відповідають характерним умовам розповсюдження оптичних сигналів в атмосфері по похилих трасах зверху вниз у зенітних кутах до 45° і величини дисперсії флуктуації інтенсивності $\sigma_i^2 = 0,02$, яка пов'язана з оптичним турбулентним фактором на трасі розповсюдження.

На рис. 2 наведено залежності P_0 від n_{co} при $n_\phi = 1$ і різних значеннях σ_i^2 для КІАМ і КІПМ відповідно.

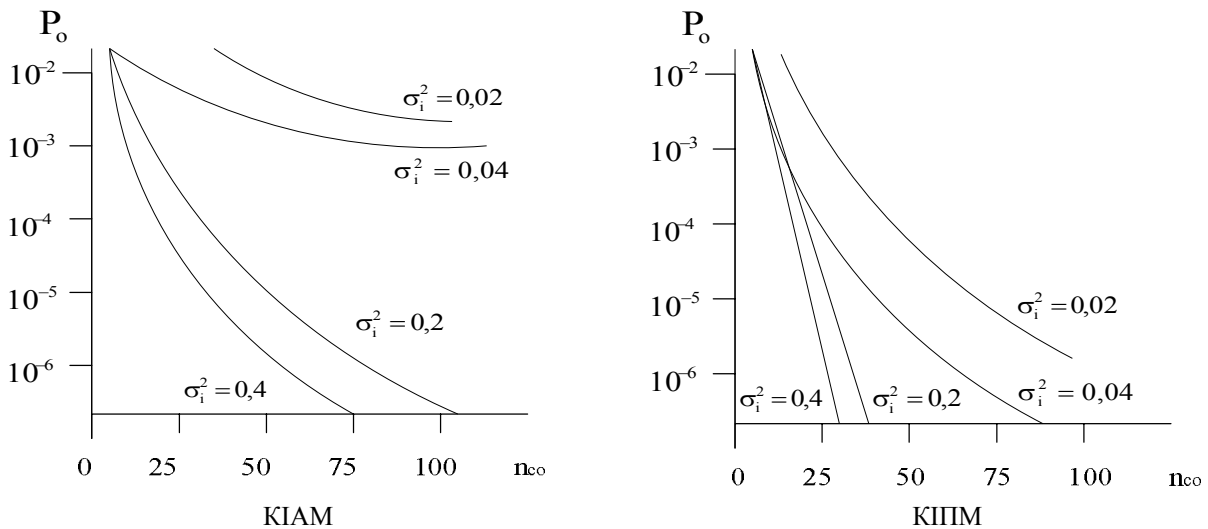


Рис. 2. Залежність ймовірності помилки від дисперсії флуктуації інтенсивності

Великі значення σ_i^2 можуть відповідати горизонтальним трасам, на яких турбулентностний фактор прямо пропорційний довжині траси. З графіків (рис. 1, 2) видно, що при досягненні ймовірності помилки $P_0 = 10^{-6} - 10^{-7}$ менш небезпечними для оптичних ліній передачі інформації (ОЛПІ) з КІМП є фонові шуми. Їх можна компенсувати збільшенням енергетичного потенціалу системи.

Таким чином, з точки зору досягнення малих ймовірностей помилки більш небезпечними є амплітудні флуктуації сигналу, які можуть призвести до насичення величини P_0 на деякій рівні (особливо небезпечно для КІАМ). Застосування КІПМ для цих цілей є дуже перспективним, оскільки середовище розповсюдження (атмосфера) вносить невеликі в

порівнянні з амплітудними поляризаційні флуктуації прийнятого оптичного сигналу, а застосування поляризаційних селекторів дозволяє просто і ефективно здійснювати селекцію сигналів з різною поляризацією для прийому інформації при блочному кодуванні.

У системі зв'язку з кодово імпульсною модуляцією по затримці (КІМЗ) двійкова інформація представлена у вигляді оптичного імпульсу на одній з M позицій усередині часового інтервалу T . Формування подібних сигналів здійснюється затримкою оптичного імпульсу на одну з дискретних градацій часу. В системі з КІМЗ немає необхідності знати рівень потужності прийнятого сигналу для проведення тестових випробувань, як це має місце в системі КІАМ. Це є основною перевагою в системі зв'язку з КІМЗ [4].

В системі з багаторівневим амплітудним кодуванням (БАМ), яке є різновидом КІАМ, для передачі оптичних сигналів з M різними градаціями амплітуди і впевненого розпізнавання їх на прийомному кінці необхідний запас по потужності на лінії, який виключав би можливість амплітудних флуктуацій сигналу, що складають величину порядку 10...15 дБ. У той же час для передачі M градацій сигналів з модуляцією по затримці необхідний енергетичний запас у 1,5...2 рази більший, ніж при передачі сигналів з КІАМ при $M=2$.

З усього вищезазначеного чітко вимальовуються переваги використання сигналів з КІПМ і КІМЗ для систем з блоковим кодуванням. Так для підвищення швидкості передачі інформації в 4 рази необхідно мати 16 різних реалізацій сигналу. В системі з КІПМ вже при $M > 8$ наступають значні труднощі в селекції прийнятих сигналів і ймовірність появи помилок різко збільшується. Для системи з КІМЗ збільшення M обмежується кінцевим максимальним часом затримки оптичного сигналу, внаслідок обмеженої швидкодії пристроїв обробки сигналів у приймачі. Тому доцільним є застосування змішаного виду модуляції: КІПМ-КІМЗ. Перевагою суміщення цих видів модуляції є повна відсутність завад, викликаних застосуванням подвійної модуляції.

З урахуванням застосування КІПМ-КІМЗ для збільшення швидкості передачі інформації в 4 рази необхідно 4 градації сигналу по поляризації і 4 градації по затримці. Це дозволяє отримати 16 різних реалізацій сигналу для передачі одним коротким оптичним імпульсом 4-розрядної двійкової кодової комбінації. Так як M не перевищує 4, то завадостійкість такої системи зменшується незначно в порівнянні з системами КІПМ і КІМЗ при $M=2$. У порівнянні з БАМ вигреш у завадостійкості систем при однаковій випромінюваній потужності передавачів є значним (близько 15-20 дБ) [5].

Реалізація системи на основі вибраних параметрів. Запропонуємо блок-схему оптичного передавача. Для того щоб передавач виконував покладені на нього функції, він повинен складатися з елементів, показаних на рис. 3.

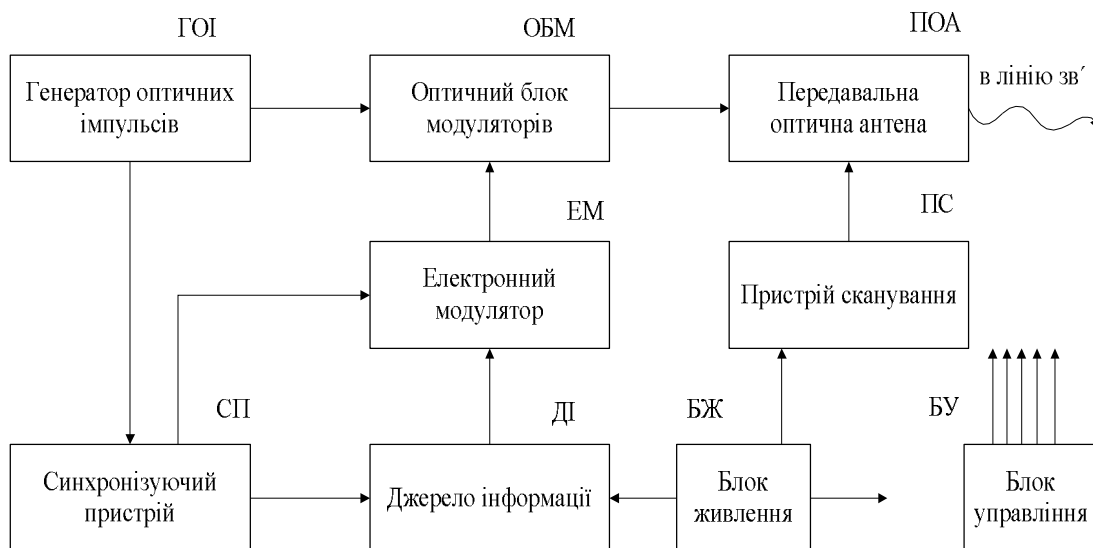


Рис. 3. Блок-схема оптичного передавача

Від ДІ в ЕМ надходить високошвидкісна двійкова послідовність імпульсів. ЕМ перетворює її в послідовність 4-розрядних блоків інформації, які кодуються відповідно до визначених законів і на виході ЕМ з'являються керуючі напруги, які керують роботою ОБМ. СП синхронізує роботу ЕМ і ДІ. ГОІ виробляє послідовність дуже коротких оптичних імпульсів, які модулюються в ОБМ по затримці і поляризації і через ПОА випромінюються в оптичний канал. ПС виконує функцію швидкодіючої точної системи наведення на кореспондента.

Пристрій синхронізації, слід зауважити, виробляє імпульси синхронізації по оптичним сигналам ГОІ. Блоки ГОІ, ОБМ і ЕМ функціонують у тісному взаємозв'язку. Тому розробка електронного модулятора без урахування особливостей побудови і характеристик ГОІ і ОБМ була б неправильною.

Розглянемо особливості ДОІ і ОБМ. Як вже зазначалося, енергетично вигідно застосовувати оптичні випромінювання середини інфрачервоного діапазону з довжиною хвилі 10 мкм у вигляді коротких імпульсів великої пікової потужності. Для отримання такого роду випромінювання застосовуються лазери на вуглекислому газі (СО₂) з довжиною хвилі випромінювання 10,6 мкм, які здатні працювати в режимі синхронізації модуляції або модуляції добротності резонатора. Тривалість імпульсу може бути близько 30 пікосекунд; при великій імпульсній потужності, відносно невеликих габаритах і високій надійності, що задовольняє нашим вимогам.

Для реалізації обраного виду модуляції КІПМ-КІМЗ буде потрібно застосування двох оптичних модуляторів: керованої оптичної лінії затримки (ОЛЗ) і керованого оптичного поляризатора (ОП). ОЛЗ може бути виконана на базі кристала з подвійним променезаломленням (на основі електрооптичного ефекту), наприклад, перспективні кристали ніобата літію LiNbO₃, при цьому напруга керування не повинна перевищувати 50...100 В.

ОП доцільно виконати на кристалах, в яких виявляється ефект Поккельса. При цьому напруга для повороту площини поляризації на кут 180° не перевищує у кращих зразків величини 50 В, при тому, що ефект практично безінерційний (до 10-13 секунд). Зазначені типи оптичних модуляторів розробляються для діапазону 0,5...2 мкм і можуть знайти застосування в ОБМ передавача, що проектується.

З огляду на міркування, викладені для вибору виду модуляції КІПМ-КІМЗ, доцільно вибрати 4 градації затримки за часом (реалізуються за допомогою ОЛЗ) і 4 градації повороту кута площини поляризації випромінюваних світлових імпульсів.

З огляду на обмежену швидкодію елементної бази, необхідно обмежити період проходження оптичних імпульсів до 5,2 нс. При цьому зручним є вибір 4-х дискретних часових затримок: 1 нс; 2 нс; 3нс; 4нс. Оптичний поляризатор доцільно виконати з чотирма дискретними значеннями повороту кута площини поляризації: 0°; 45°; 90°; 135°. Таким чином, на виході ОБМ можна отримати 16 різних реалізацій оптичного сигналу. Кодування сигналу представлено в табл. 1.

Отже, передачею одного оптичного імпульсу можна передати 4-розрядну двійкову кодову комбінацію (блок двійкової інформації), оскільки кожній комбінації відповідає своя реалізація сигналу.

Часова діаграма переданого сигналу (рис. 4) буде відповідати позиції 2 – залежність $E_{n2}(t)$ (передаваний сигнал).

На позиції 1 – залежність $E_{n1}(t)$ – наведено оптичний сигнал на виході ГОІ, який формує короткі ($\tau_i=0,3нс$) оптичні імпульси з постійним періодом проходження $T_i=4нс$. Кожен

імпульс ГОІ затримується на одну з чотирьох можливих дискретних затримок часу і поляризований на один з чотирьох можливих кутів повороту площини поляризації.

Тривалість імпульсів передавача має бути в межах 0,3 нс і менше, період проходження оптичних імпульсів дорівнює 4 нс. Модуляція оптичних імпульсів здійснюється шляхом затримки випромінювання на 4-х можливих дискретних значеннях: 1нс; 2нс; 3нс; 4нс; і поляризації над 4-ма можливими кутами повороту площини поляризації: 0°; 45°; 90°; 135°.

Таким чином, з урахуванням всіх вимог був проведений вибір структури оптичного сигналу передавача [6].

Важливо відзначити, що особливістю проектного пристрою є обов'язкове врахування перехідних процесів, що відбуваються в логічних елементах, електронних приладах і часі затримки пристроїв. Тому в таких пристроях необхідна жорстка синхронізація всіх процесів перемикання логічних елементів і електронних ключів. Це вносить значні корективи у побудову структурної схеми проектного пристрою.

Кодування сигналу Табл. 1

Кодова комбінація (блок)	Час затримки, нс	Кут поляризації, град
0000	4	135
0001	4	45
0010	4	90
0011	4	0
0100	3	135
0101	3	45
0110	3	90
0111	3	0
1000	2	135
1001	2	45
1010	2	90
1011	2	0
1100	1	135
1101	1	45
1110	1	90
1111	1	0

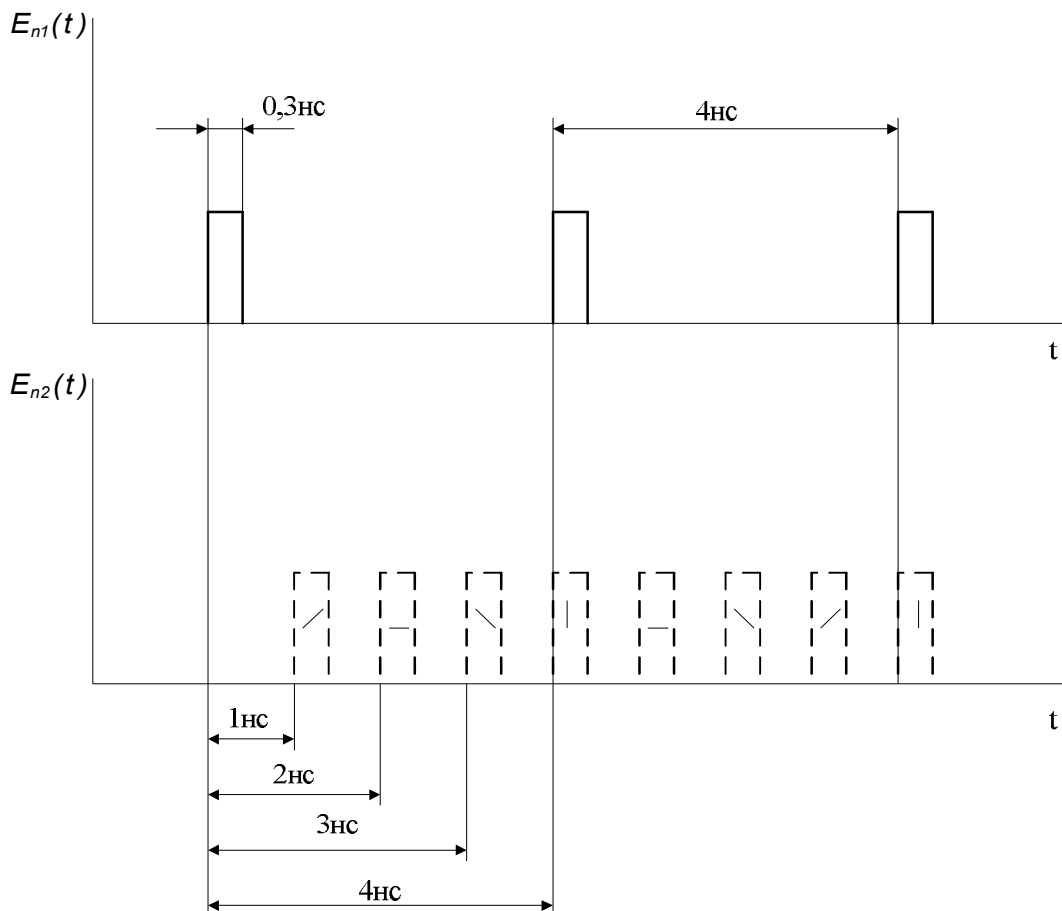


Рис. 4. Принцип формування сигналу

На рис. 5 зображена структурна схема електронного модулятора передавача.

Генератор оптичних випромінювань (ГОІ) формує послідовність коротких імпульсів в режимі синхронізації мод, яка надходить на оптичний вхід оптичного блоку модуляторів, де відбувається модуляція випромінювання по затримці (в ОЛЗ) і по поляризації (у ОП) відповідно з керуючими сигналами, що виробляються в електронному модуляторі.

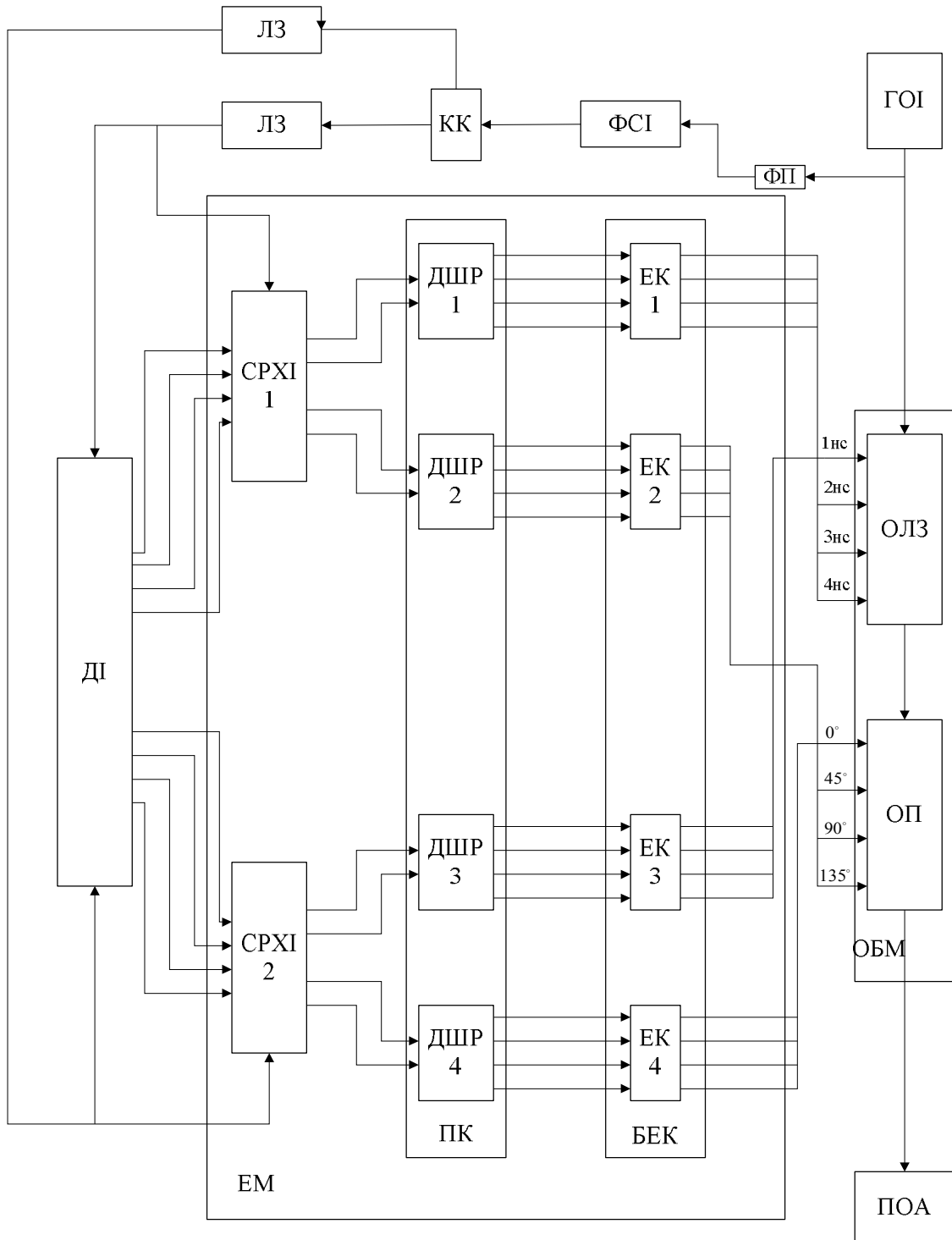


Рис. 5. Структурна схема електронного модулятора оптичного передавача.

ФП – фотоприймач; ФСІ – формувач синхроімпульсів; СРХІ – синхронний реєстр зберігання інформації; ДШР – дешифратор; ПК – пристрій кодування; ЕК – електронний комутатор; БЕК – блок електронних комутаторів; ОЛЗ – оптична лінія затримки; ОП – оптичний поляризатор; ЛЗ – лінія затримки; КК – комутатор каналів.

Вхідна 8-розрядна комбінація з джерела інформації (ДІ) надходить на один з двох синхронних регістрів зберігання інформації поблочно (чотириохрозрядними кодовими комбінаціями) з приходом сигналу синхронізації з блоку формування синхроімпульсів (ФСІ). Блок інформації записується в СРХІ і з тим же синхроімпульсом з'являється на входах детекторів пристрою кодування (ПК). У ПК здійснюється кодування кодової комбінації у відповідності з обраним законом кодування.

Дешифратор 1 (ДШР1) призначений для формування сигналів керування в каналі ОЛЗ, а ДШР2 – в каналі ОП. ДШР1 і ДШР2 ПК здійснюють перетворення двійкового двурозрядного сигналу в сукупність сигналів керування на своїх виходах, які відповідають табл. 1.

Таким чином, ДШР1 і ДШР2 виробляють сигнали керування, які надходять на електронні комутатори ЕК1 і ЕК2, блоку електронних комутаторів (БЕК). БЕК перетворює низьковольтні сигнали керування виходів детекторів в потужні високовольтні електричні сигнали, необхідні для нормальної роботи ОЛЗ та ОП.

Оптичний імпульс спочатку затримується в ОЛЗ на один з часових інтервалів, а потім здійснюється поворот площини поляризації. Такий порядок модуляції пояснюється особливостями побудови оптичного модулятора.

Висновки. В даній статті для підвищення завадостійкості оптичних ліній передавання запропоноване рішення про використання сигналів з подвійною модуляцією і схем обробки, які забезпечують компенсацію завад. Ці заходи збільшують відстань між станціями завдяки оптимальній обробці прийнятого сигналу.

Застосування виду модуляції КІММ-КІМЗ дозволяє значно збільшити швидкість передачі інформації і завадостійкість ОЛПІ без розширення спектру випромінюваного сигналу і збільшення потужності передавача. В цілому застосування виду модуляції КІММ-КІМЗ є перспективним, оскільки подвійна модуляція забезпечує більш ефективну роботу оптичної лінії.

В статті була розроблена схема оптичного передавача, враховуючи попередній вибір модуляції та запроповану структуру сигналу передавання. Розроблено функціональну схему модулятора в АОЛЗ. Необхідно зазначити, що в пристроях як приймання так і передавання необхідна жорстка синхронізація всіх процесів перемикавання логічних елементів і електронних ключів.

Запропоноване інженерне рішення щодо побудови системи, яка дає змогу детектувати прийнятий поляризований і затриманий імпульс, який несе в собі корисну інформацію, збільшуючи при цьому енергетичні характеристики лінії в 4 рази.

Література

1. Дмитриев А. Л. Оптические системы передачи информации: навчальний посібник / А. Л. Дмитриев. – СПб: СПбГУИТМО, 2007. – 17 с.
2. Шереметьев А. Г. Лазерная связь / А. Г. Шереметьев, Р. Г. Толпарев. – М: Связь, 1974. – С.48–250.
3. Гауер Дж. Оптические системы связи / Дж. Гауер. – М.: Радио и связь, 1989. – 397с.
4. Шереметьев А. Г. Статистическая теория лазерной связи. / А. Г. Шереметьев. – М: Связь, 1971. – 195с.
5. FSO-MANETs: Free-Space-Optical Mobile Ad-hoc Networks [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.cse.unr.edu/~yukse/fso-manet.htm> (12.12.2011).
6. А. с. 1688429, СССР, МПК Н 04 В 10/04. Передатчик цифровой оптической линии связи / А. И. Ладик (СССР). – № 4752644 ; заявл. 23.10.1989; опубл. 01.07.1991, бюл. № 1.