

ПРИЙМАННЯ ПРИХОВАНИХ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ ВИДИМОГО ДІАПАЗОНУ

У статті розглянуті питання практичної реалізації приймача прихованих світлових імпульсів видимого діапазону. Використання лавинного фотодіоду та селективних кіл дало можливість збільшити відстань надійного приймання прихованих світлових імпульсів до 2.3 м. Використання просвітленої оптичної системи дозволяє збільшити чутливість приймача практично в 30 разів і звужує апертуру до трьох градусів. Описано генератор світлових імпульсів, частота генерованих коливань якого змінюється в залежності від фонового освітлення за отриманим емпіричним законом.

Ключові слова: інформаційна безпека, світлові імпульси видимого діапазону, лавинний та рпн фотодіоди, емпіричний закон зміни частоти генерованих коливань.

Вступ

Збільшення кількості використовуваних інформаційних технічних засобів у повсякденному та професійному житті людини призводить до збільшення кількості випадків несанкціонованого зняття інформації [1]. Наявність і доступність до глобальної мережі дозволяє зловмисникам з легкістю отримувати і продавати [2] конфіденційну інформацію, здобуту злочинним шляхом. Незахищеними є і персональні дані, що передаються по незахищених каналах зв'язку. Вказані дії наносять значну матеріальну шкоду комерційним підприємствам, державним установам тощо. Стан безпеки інформаційних систем, низький рівень захисту в процесі передавання інформації від зовнішніх чи внутрішніх загроз змушує здійснювати пошук нових методів передавання інформації.

Одним з найменш використовуваних способів передачі інформації у вільному просторі є оптичний канал у видимій області спектру. З точки зору захищеності інформації оптичний канал вважається досить надійним. Передавання оптичної інформації відкритим каналом в принципі не може супроводжуватись виникненням, наприклад, акусто-волоконного каналу витоку інформації, який притаманний каналізованим (оптоволоконним) системам зв'язку [3, 4]. Використання оптичних інформаційних систем, в доповнення до Wi-Fi, дозволить знизити рівень електромагнітного поля, яке впливає на різні типи електронного обладнання і, що не менш важливо, на організм самої людини. Оптична інформаційна система працює тільки в області прямого бачення. Втручання в таку систему можливе лише шляхом розміщення спеціальних технічних засобів безпосередньо в області роботи оптичної інформаційної системи. Можливість приховування самого факту передачі світлового сигналу [5-7] значно збільшує надійність роботи такої системи.

Основна частина

У попередніх дослідженнях [5-7] неодноразово підтверджена можливість приховування світлових імпульсів видимого діапазону від людського зору. Зокрема, показано, що прихованість світлових імпульсів залежить від того, в якій частині поля зору людина спостерігає за світловими імпульсами (пряме чи периферійне поле зору [5]), наявності фонового освітлення, спектрального складу [7] випромінюваних світлових імпульсів, їх тривалості, потужності та частоти слідування. Не останню роль відіграють і суб'єктивні характеристики людини як спостерігача: стан його здоров'я, рівень втомленості. Вказані фактори є визначальними і при правильній їх комбінації дозволяють приховати випромінювані у видимій області спектра світлові імпульси. Одним з найважливіших параметрів є рівень фонового освітлення. При достатньо великому рівні фонового освітлення (порядку десятка тисяч люкс) більшістю з вище перелічених факторів можна знехтувати і відносно просто отримати прихований режим роботи світлової інформаційної системи. При відсутності фонового освітлення неможливо забезпечити прихованість світлових імпульсів.

Результати експериментів [5] показали, що границі периферійного поля зору лівого і правого ока людини мало відмінні. Загальна закономірність зон чутливостей для обох очей практично однакова.

Для з'ясування спектрального розподілу частот прихованих світлових імпульсів видимого діапазону за допомогою RGB світлодіоду сформовано послідовність світлових імпульсів зі спектром, близьким до спектру білого світла. При фоновому освітленні 100 лк та тривалості імпульсів штучно утвореного білого світла 5 мкс прихованість зберігалась при частотах слідування імпульсів $125 \div 620$ Гц. При такому ж рівні фонового освітлення та тій же тривалості імпульсів для світлодіоду червоного свічення діапазон частот прихованості спостерігався в інтервалі $170 \div 760$ Гц, а для світлодіоду зеленого свічення - $175 \div 860$ Гц. В той же час для світлодіоду синього свічення діапазон частот прихованості становив $350 \div 1500$ Гц [7].

Раніше проведені дослідження [5, 6, 7] дали можливість сформулювати технічні характеристики до оптичної інформаційної системи, що дозволяє забезпечити прихованість випромінювання світлових імпульсів видимого діапазону. На рис.1 зображена структурна схема запропонованої інформаційної системи з відкритим оптичним каналом.

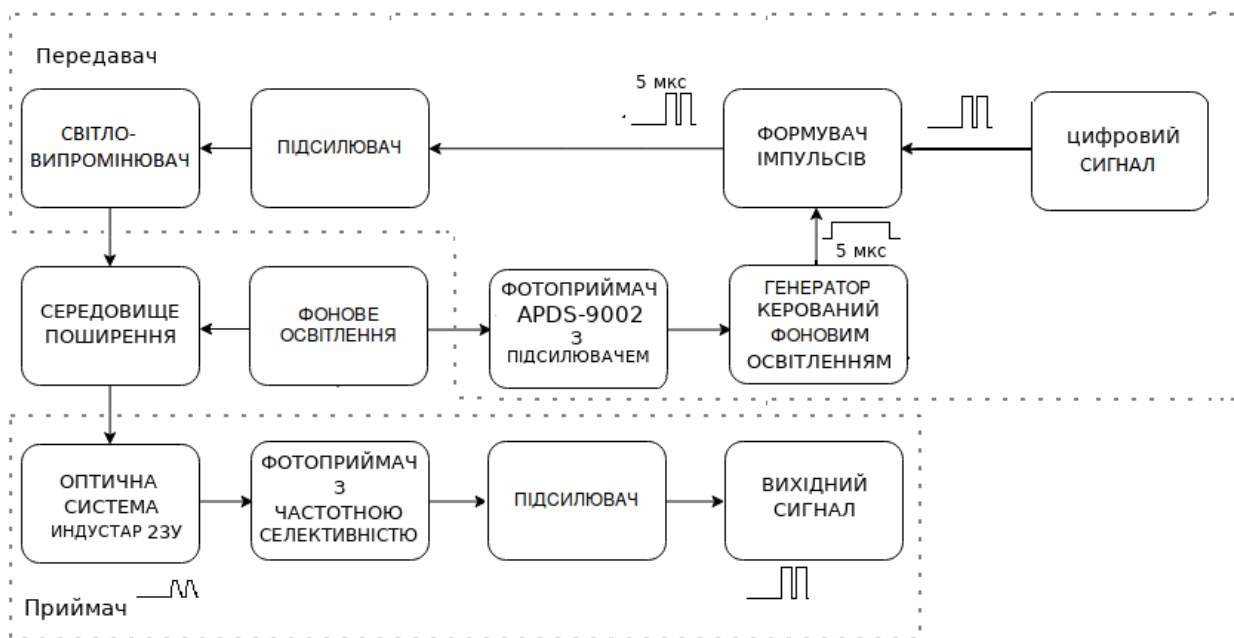


Рис. 1. Блок-схема оптичної інформаційної системи з використанням неканалізованого світла

У процесі передавання інформації оптичною інформаційною системою необхідно витримувати умови, які забезпечують маскування випромінюваних світлових імпульсів. Однією з таких умов є величина частоти слідування світлових імпульсів при постійній їх тривалості та певному рівні фонового освітлення. Для задання необхідної частоти слідування імпульсів та забезпечення режиму маскування світлових інформаційних променів розроблено генератор, який змінює частоту генерованих коливань в залежності від величини падаючого на фотоприймач світлового потоку, а отже і величини рівня фонового світла. Давачем рівня фонового світла слугує фотосенсор APDS-9002-021, який за спектральною характеристикою чутливості близький до людського ока. Генератор реалізовано на мікроконтролері DD1 STM32F030F4P6, що містить 12-розрядний АЦП. На виході мікроконтролера DD1 (рис.2) формуються імпульси різної тривалості – логічний «0» кодується тривалістю T (мкс), а «1» - $3 \times T$, де час T підбирається експериментально і приблизно рівний 2 мкс.

Для зв'язку з керувальною ЕОМ використаний інтерфейс UART, а для під'єднання мікросхем пам'яті – шина I2C. Живиться модуль від джерела стабілізованої напруги 12В $\pm 1В$.

Частота генерованих генератором електричних імпульсів в залежності від рівня фонового освітлення змінюється за законом

$$F = 6 \cdot 10^{-4} \cdot E^2 + 189, \quad (1)$$

де F , Гц – частота слідування імпульсів; E , лк – рівень фонового освітлення.

Зазначена вище формула отримана експериментально на основі результатів досліджень чутливості людського зору до світлових імпульсів [5, 7]. Суть експерименту полягала у встановленні такої частоти слідування світлових імпульсів, при якій спостерігач не вирізняв випромінювані світлові імпульси. Дослідження величини частоти прихованих світлових імпульсів проводились при різних рівнях фонового освітлення та незмінній тривалості імпульсів.

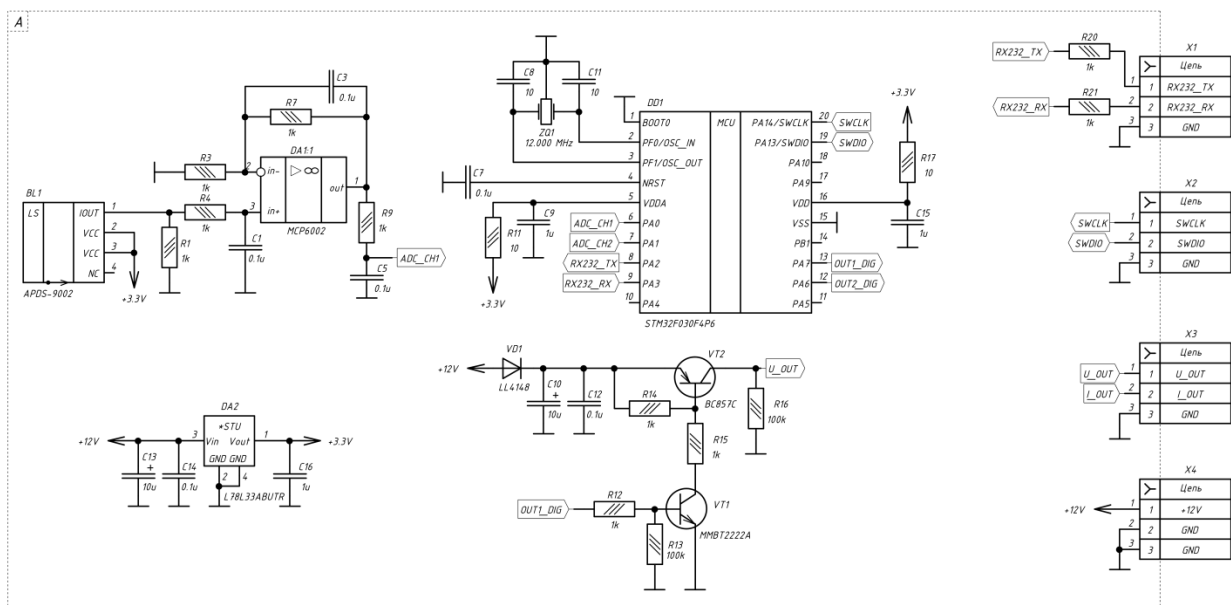


Рис. 2. Схема електрична принципова генератора коливань, керованого освітленням

Дальність дії інформаційної системи залежить від потужності випромінюваних світлодіодом світлових імпульсів і чутливості приймальної частини. Збільшення величини випромінюваної світлової енергії, в кінцевому результаті, призводить до втрати прихованості джерелом світлових імпульсів.

Враховуючи умови, в яких повинен працювати фотоперетворювач, було вирішено відмовитись від використання чутливих до слабкого світлового потоку фотоелектронних помножувачів. Найбільш придатними за своїми характеристиками є напівпровідникові фотодіоди.

Чутливість приймальної частини обмежена рівнем власних шумів саме фотодіоду, що, в свою чергу, встановлює обмеження на прийнятну максимальну величину коефіцієнту підсилення підсилювача. Зміщений в оберненому напрямку фотодіод характеризується високим (не менше 5 МОм) опором. Для підсилення сигналу такого високоомного джерела виготовлено попередній підсилювач (рис.3).

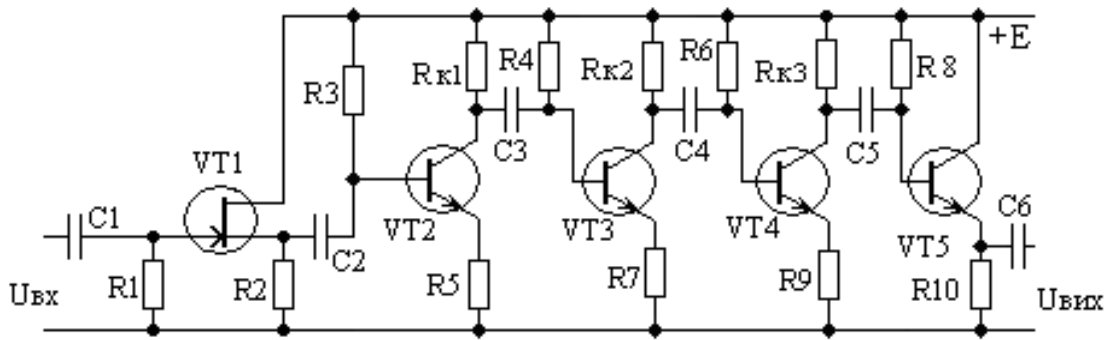


Рис. 3. Схема електрична принципова попереднього підсилювача

Підсилювач виконано на дискретних елементах. Перший підсилювальний каскад реалізовано на польовому транзисторі 2ПС202Г-2 з граничною робочою частотою 30 МГц і, що найбільш важливо в даному випадку, цей транзистор характеризується нормованою величиною електрорушійної сили шуму $20 \text{ нВ} / \sqrt{\text{Гц}}$. Польовий транзистор VT1 ввімкнений за схемою із загальним витокм (повторювач напруги). Така схема забезпечує вхідний опір не менше 10 МОм. Три підсилювальні каскади (транзистори VT2, VT3, VT4) забезпечують підсилення сигналу практично в 1000 разів. З метою забезпечення низького вихідного опору попереднього підсилювача його останній каскад (транзистор VT5) виконано за схемою із загальним колектором. Експериментально визначена величина вихідного опору попереднього підсилювача становила 180 Ом.

Відомо, що високоомні кола дуже чутливі до дії завад. Тому підсилювач, що характеризується високим вхідним опором, розміщено в металевому (алюмінієвому) корпусі, всередині якого вмонтовано екран з магнітно-м'якого матеріалу (пермалой). Самий підсилювач заживлений від акумулятора напругою 9 В, отже, не потребує додаткових провідників живлення. Таким чином, вдалось суттєво зменшити кількість з'єднувальних провідників, які необхідні для роботи попереднього підсилювача. В кінцевому результаті до попереднього підсилювача під'єднувалось тільки два провідники, необхідні для зняття уже підсиленого вихідного сигналу. Враховуючи відносно низький вихідний опір останнього, такі з'єднувальні провідники практично не спричиняють виникнення наведених завад. Попередній підсилювач характеризується споживанням струмом не більше 14 мА

Реалізація прихованого режиму роботи інформаційної системи передбачає наявність фонового освітлення. Причому, чим вищим є рівень фонового світла, тим вищою може бути частота прихованих інформаційних сигналів, а отже вища швидкість передачі даних. Таким чином, на фотоприймач, окрім послідовності інформаційних світлових імпульсів, поступає потужний постійний фоновий світловий потік. В таких умовах роботи інформаційної системи виникає питання підвищення чутливості системи саме до перемінної (інформаційної) складової світлового потоку і низької чутливості до постійної складової. Для вирішення цієї проблеми фотоприймач (рис.4, а) доповнено вибіркою (резонансною) ланкою (рис.4, б). На частоті резонансу послідовного контура його опір низький. Якщо частота слідування інформаційних світлових імпульсів рівна частоті резонансу контура, то на виході отримаємо високий рівень корисного електричного сигналу. Введення коливального контура дозволяє здійснювати селекцію інформаційних сигналів за частотною ознакою, а отже приймати інформаційний оптичний сигнал з заданою частотою, яка відповідає частоті резонансу контура. Забезпечення селективності інформаційної системи дає можливість працювати такій системі в режимі багатоканальності.

Під час тестування оптичної інформаційної системи як фотоприймач використано рпн-фотодіод ФД-255 та лавинний фотодіод, які є експериментальними зразками ЦКБ «РИТМ» м. Чернівці. На світлодіод подавались імпульси прямокутної форми амплітудою 9.4 В. Контроль за рівнем вихідного сигналу з передавальної частини та рівнем вихідного сигналу на приймальній частині здійснювався за допомогою цифрового осцилографа DS5032E.

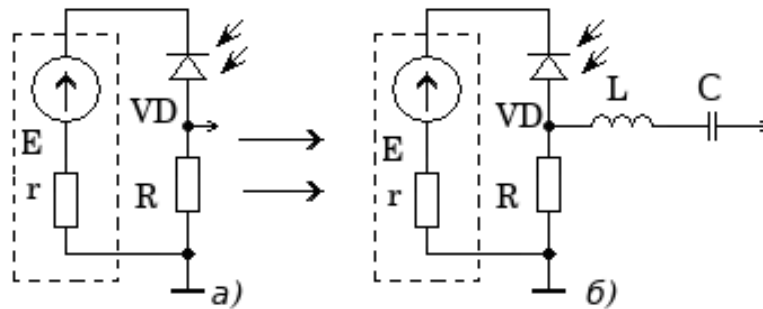


Рис. 4. Фотоприймачі: а) резистивний, б) з вибіркою (резонансною) ланкою

При незмінних параметрах прихованих світлових імпульсів проведено дослідження залежності величини вихідного сигналу приймальної системи від рівня постійного фонового світла. На рис. 5 зображено залежність сигналу рпн-фотодіода, підсиленого попереднім підсилювачем від рівня фонового освітлення. Неважко бачити, що при незмінних параметрах світлових імпульсів величина вихідної напруги приймальної системи (в даному випадку 14 мВ) практично не змінюється зі зростанням рівня фонового освітлення до 2500 лк. Отримані результати забезпечуються лінійністю залежності струму фотодіода від інтенсивності падаючого світлового потоку. Характерно, що лінійність залежності фотоструму від світлового потоку зберігається навіть якщо останній змінюється більше ніж на десять порядків [8]. Це дозволяє зробити висновок, що оптична інформаційна система може працювати і при денному фоновому сонячному освітленні практично без втрати чутливості до перемінної складової світлового потоку.

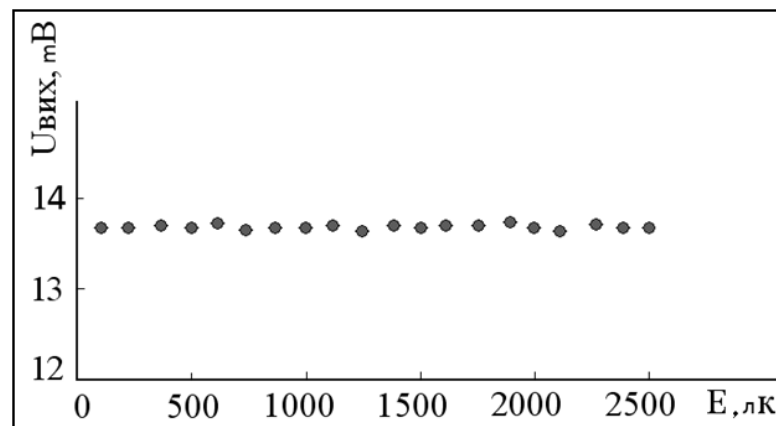


Рис. 5. Залежність сигналу на виході попереднього підсилювача від рівня фонового освітлення

Ефективність використання фотодіодів у оптичній інформаційній системі

Одним із можливих варіантів збільшення дальності дії інформаційної системи є вибір фотоприймача з високою ефективністю перетворення послідовності світлових імпульсів у відповідний електричний сигнал, тобто струмова чутливість. З літературних джерел [8] відомо, що типова (середня) величина струмової чутливості для рпн-діодів складає 0.5-0.8 А/Вт, в той час як для лавинних фотодіодів (ЛФД) ця величина суттєво вища - 20-60 А/Вт. З цієї точки зору беззаперечною є перевага ЛФД. Лавинні фотодіоди, окрім високої чутливості, характеризуються достатньо високою швидкістю відгуку. В той же час для роботи ЛФД потрібна висока стабілізована напруга зміщення.

Для вирішення питання ефективності застосування рпн- та лавинного фотодіодів в умовах, коли необхідно приймати імпульсні світлові сигнали на фоні потужного постійного світла, проведено відповідні експериментальні дослідження. На рис. 6 зображено залежність величини вихідного сигналу підсилювача при освітленні вказаних фотодіодів імпульсами світла тривалістю 5мкс, частотою слідування 200 кГц та при фоновому світлі 500 лк.

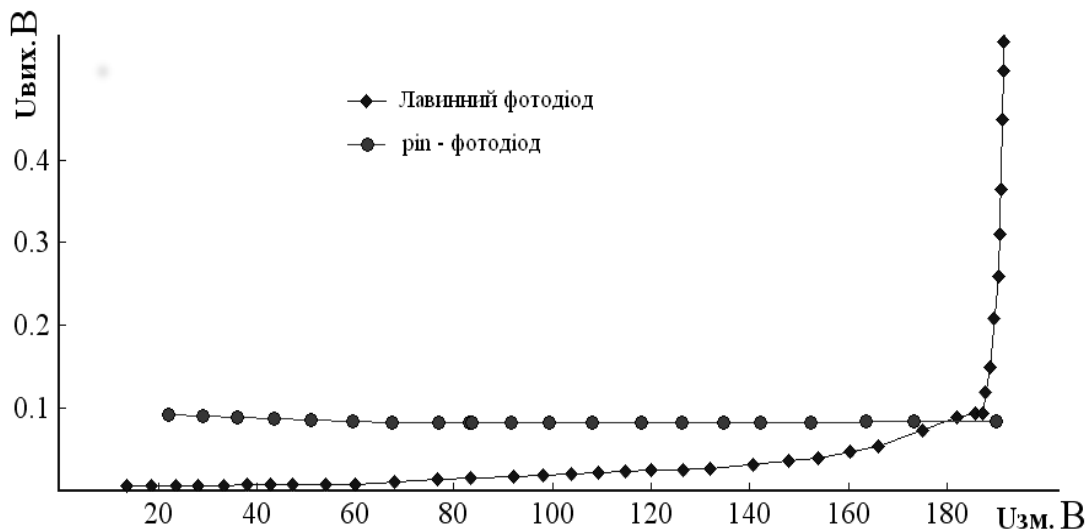


Рис. 6. Залежність величини вихідного сигналу фотоприймача від напруги зміщення лавинного та рпн-фотодіодів

З рисунку видно, що при малих напругах зміщення чутливість рпн-фотодіоду вища, ніж у лавинного. Лавинний фотодіод в області пробою (перехід в область низького динамічного опору) більш ніж у 24 рази чутливіший в порівнянні з рпн-фотодіодом. Однією з найбільш важливих умов використання лавинного фотодіода є необхідність у забезпеченні напруги зміщення, яка повинна бути близькою до напруги пробою. Для рпн-фотодіоду характерна постійна, не залежна від напруги зміщення величина чутливості до імпульсних сигналів.

Встановлено, що максимальна віддаль, на якій реєструється прихований оптичний сигнал, становила 2.3 м. Вимірювання рівня вихідного сигналу попереднього підсилювача оптичної інформаційної системи здійснювалось мілівольтметром ВЗ-38.

З метою зменшення впливу сторонніх джерел імпульсного чи потужного постійного оптичного випромінювання на роботу оптичної інформаційної системи штучно обмежувалася просторова область, в межах якої фотоприймач може приймати оптичні сигнали. По суті, формувалась певна діаграма напрямленості фотоприймача. На рис.7 зображена діаграма напрямленості фотоприймача з лавинним фотодіодом в центрі основи захисного циліндру. Використано захисний циліндр довжиною 60 мм і внутрішнім діаметром 40 мм. Діаграма напрямленості визначена за умови використання оптичної інформаційної системи в режимі прихованості.

Значне зменшення амплітуди прийнятого оптичного сигналу спостерігається при відхиленні оптичної системи $\pm 15^\circ$ в той чи інший бік.

Для забезпечення можливості знаходження джерела прихованих світлових імпульсів приймальна частина інформаційної системи доповнена оптичною системою И23У. Оптична система кріпиться до вільної основи захисного циліндра. Використання оптичної системи змушує діаграму напрямленості до $\pm 0.5^\circ$. При цьому чутливість приймальної частини зростає практично в 30 разів.

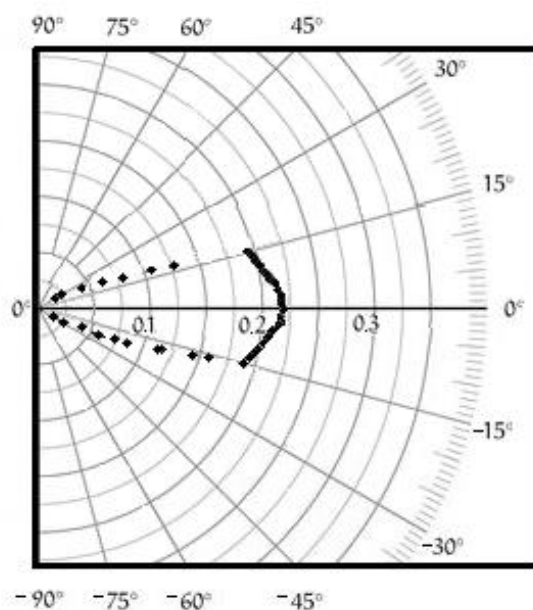


Рис. 7. Діаграми напрямленості фотоприймача з лавинним фотодіодом, розміщеним в центрі основи захисного циліндру

Висновки

Проведені дослідження підтвердили можливість технічної реалізації прихованої передачі світлових імпульсів видимого діапазону. Розроблений генератор електричних імпульсів, параметри яких змінювались відповідно до зміни фонового освітлення розширив діапазон практичної реалізації принципу прихованості світлових імпульсів. Використання лавинного фотодіода та селективних кіл в приймальній частині дали можливість отримати приховані світлові імпульси на відстані 2.3 м від джерела випромінювання.

Встановлено, що прихованість світлових імпульсів видимого діапазону забезпечується при синусоїдальній так і при прямокутній формах оптичних, а отже і електричних сигналів.

Список використаної літератури

1. Попович Н. І. Фізичні основи утворення технічних каналів витоку інформації / Н. І. Попович. // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. – 2015. – №37
2. Крилова Ю. І. Захист персональних даних: вітчизняний та зарубіжний досвід / Ю. І. Крилова. // Інформація і право. – 2017. – №3. – С. 57–63.
3. Гришачев В.В., Халяпин Д.Б., Шевченко Н.А. / Опасности возникновения каналов утечки конфиденциальной речевой информации по волоконно-оптическим структурированным кабельным системам // Материалы X Международной научно-практической конференции "Информационная безопасность". Ч.2. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. – С. 103–105.
4. Аналіз каналів витоку мовної інформації волоконно-оптичними лініями зв'язку, що проходять через об'єкти інформаційної діяльності / В. В.Овсянніков, С. А. Паламарчук, Н. А. Паламарчук, Ю. О. Черниш. // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ „КПІ”. – 2013. – №2. – С. 58–62.
5. Браїловський В. В. Физиологические аспекты проектирования систем скрытой передачи информации на оптическом излучении видимого диапазона / В. В. Браїловський, І. В. Пислар, М. Г. Рождественська. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2015. – №1. – С. 13–16.
6. Браїловський В. В. Завадостійка інформаційна система на світлових променях / В. В. Браїловський, І. В. Пислар, М. Г. Рождественська. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – №3. – С. 157–160.
7. Spectral sensitivity of human vision to the light pulses / V. Brailovsky, I. Pyslar, M. Rozdestvenska, M. Michalska. // Informatyka, Automatyka Pomiaru w Gospodarce i Ochronie Środowiska (IAPGOS). – 2018. – №1. – P. 32–35.
8. Дорошенко Г. Д. Системи телебачення та технічного зору / Г. Д. Дорошенко, В. П. Кожем'яко, С. В. Павлов. – Вінниця, 2014. – 209 с.

Надійшла: 02.06.2019

Рецензент: д.т.н., професор Сльотов М.М.