

## АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ АТМОСФЕРНИХ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ

Жук О.В.

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації

Яровий О.В., Паюн В.А.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Проведено аналіз параметрів, які визначають значення можливого енергетичного потенціалу атмосферних оптичних систем передачі. Розглянуто напрямки підвищення надійності роботи атмосферних оптичних систем передачі за рахунок використання нових оптимізаційних підходів.

**Ключові слова:** атмосферні оптичні системи передачі, оптичні випромінювачі, електромагнітні хвилі, лазери, моделі виявлення подій.

**Постановка проблеми.** Атмосферні (відкриті) оптичні системи передачі (АОСП) забезпечують передачу даних модульованим випромінюванням в інфрачервоній частині спектра через атмосферу. На сьогоднішньому етапі, застосування зазначених систем отримує все більше поширення в сегменті високошвидкісного безпроводового транспортування даних. Перспективність їх використання ґрунтується на певних особливостях даної технології. Це насамперед використання випромінюючих засобів, що працюють на частотах значно більших від встановленої для радіочастотного діапазону межі (400 ГГц). Отже такі системи не використовують радіодіапазон і не створюють перешкод в радіочастотному спектрі. Крім того, АОСП потребує невеликого часу для розгортання та має мінімальне енергоспоживання (десятки Вт). В результаті вище зазначеного, застосування АОСП може забезпечувати реалізацію ряду технічних переваг, зокрема: відсутність чутливості до радіоперешкод, висока скритність та розвідзачищеність, висока швидкість передачі, прозорий механізм передачі (можливість транспортування потоків створених за різними протоколами *SDH*, *ATM*, *Ethernet* і т. д.).

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Слід зазначити, що на якість зв'язку в АОСП впливає цілий ряд чинників, які при певних обставинах можуть суттєво знизити позитивний ефект від їх застосування. Найбільше це стосується особливих погодних умов, таких, як дощ, сніг, туман і т. д., що можуть значно погіршити видимість і, таким, чином понизити ефективність використання діапазону інфрачервоного зв'язку [1]. Крім того, в атмосфері спостерігаються турбулентні явища, які приводять до флуктуації показника заломлення середовища, коливанням світла і спотворенням сигналу, що приймається. Деякі з зазначених чинників можуть призводити до збільшення значення показника затухання на десятки дБ. Проте найбільше зростання втрат виникають в умовах щільного туману, коли вони можуть складати до 100 дБ/км і навіть більше. Це безумовно призводить до зменшення рівня сигналу на прийомі, і, як наслідок, до збільшення коефіцієнту помилки. Реальні зразки апаратури, які на сучасному етапі пропонуються для практичного використання, гаран-

тують дальність зв'язку до 4 км (при швидкості передачі 100 Мбіт/с і надійності зв'язку 99,9%) [2]. Це цілком конкурентоздатні показники, але все ж такі досить скромні, якщо порівнювати їх з сучасними радіорелейними інтервалами або системами безпроводового ширококутового доступу WiMax.

**Мета статті.** Основна мета статті полягає у аналізі параметрів, які визначають значення можливого енергетичного потенціалу АОСП, а також у забезпеченні відповідної дальності зв'язку.

**Виклад основного матеріалу.** Для збільшення енергетичного потенціалу АОСП і, відповідно, підвищення надійності їх роботи можливе використання наступних підходів:

- збільшення потужності оптичних випромінювачів (передавачів);
- збільшення чутливості оптичних детекторів (приймачів);
- звуження діаграми спрямованості передавальних антен;
- використання адаптації за довжиною хвилі;
- використання методів рознесеного прийому і ін.

Проаналізуємо кожний з зазначених підходів. В якості оптичних випромінювачів у АОСП використовують світловипромінюючі або напівпровідникові лазери.

1. *Світловипромінюючий діод* (СВД) є напівпровідниковим приладом з р-п переходом, протікання електричного струму через який викликає інтенсивне спонтанне випромінювання. Найбільше застосування отримали торцеві або суперлюмінесцентні СВД. У конструкції такого світлодіода передбачено виведення оптичної потужності випромінювання через один з торців (рис. 1). При цьому інший торець виконаний у вигляді дзеркала, яке відображає фотони в активний шар.

У приладі застосовуються додаткові шари напівпровідникового матеріалу GaAlAs, які відрізняються від активного шару показником заломлення і шириною забороненої зони. Робота світлодіодів заснована на випадковій рекомбінаційній люмінесценції надмірних носіїв заряду, які інжектують в активну область світлодіода. В результаті інжекції неосновних носіїв заряду і дрейфу основних в активному шарі відбувається накопичення і рекомбінація цих зарядів

з виділенням квантів енергії (фотони світла), які приблизно відповідають ширині забороненої зони активного шару. При цьому фотони, що випадково утворилися, можуть рухатися в будь-якому випадковому напрямі, відбиватися від меж різних шарів напівпровідників, поглинатися кристалами і випромінюватися з торця. Величина випромінюваної потужності СВД приблизно лінійно залежить від величини струму інжекції. СВД називають слабокогерентними джерелами світла.

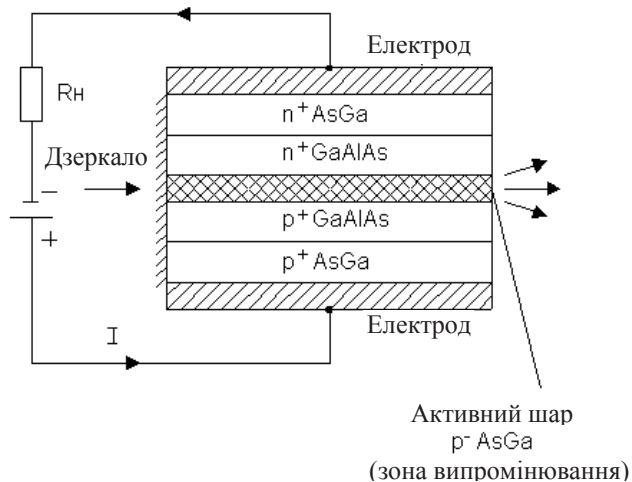


Рис. 1. Конструкція торцевого світловипромінюючого діода

Сучасні світловипромінюючі діоди здатні забезпечувати випромінювання з потужністю декілька одиниць мВт, з кутом розходження порядку до 30° (у вертикальній площині) і до 60° (у горизонтальній) та шириною спектра випромінювання 50 нм.

2. *Лазер* – прилад, що генерує оптичне когерентне випромінювання на основі ефекту вимушеного, стимульованого випромінювання. Принцип роботи лазера заснований на створенні активного середовища, в якому під впливом зовнішнього поля створюються електрони, що перебувають у збудженому стані. Так же саме, як і в СВД під впливом модулюючого струму, створюється спонтанне випромінюється. Утворений фотон потрапляє у резонансну систему, яке представляє собою двохдзеркальну систему, що охоплює активне середовище з двох боків (рис. 2). Відстань між дзеркалами та їх прозорість обирають таким чином, щоб забезпечити когерентне випромінювання лазера.

Електромагнітна хвиля, яка випромінюється лазером вважається когерентною, оскільки її амплітуда, частота, фаза, напрям поширення і поляризація постійні або змінюються впорядковано. Сучасні напівпровідникові лазери здатні забезпечити випромінювання з потужністю декілька сотень Вт, з кутом розходження порядку до 5° (у вертикальній площині) і до 15° (у горизонтальній) та шириною спектра випромінювання до 3 нм.

Очевидно, що з економічної (техніко-економічної) точки зору доцільне використання СВД. Однак для роботи на великі відстані, де важливо забезпечити високу потужність випромінювання та зменшити втрати пов'язані із великим кутом розходження, що призводить до невлучення

частини випромінювання у приймальну антену, перевагу має застосування лазерів. Отже потенційно можливе використання, оптичного випромінювача (лазера) з потужністю до 100 Вт (зразки, що випускають серійно). Проте треба зазначити, що існують також обмеження щодо використання високопотужних оптичних джерел випромінювання, які пов'язані із встановленими вимогами до безпеки персоналу. Максимальне допустиме лазерне випромінювання залежить від типу використовуваного лазерного діода (довжини хвилі). Міжнародний стандарт ІЕС.825 визначає максимальний рівень лазерного випромінювання для кожного лазерного класу відповідно до довжини хвилі (таблиця 1).

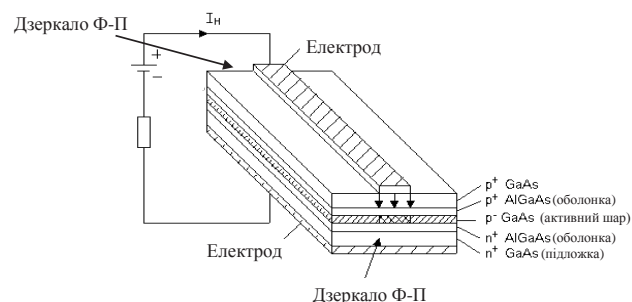


Рис. 2. Конструкція смужкового лазера Фабрі-Перо (Ф-П)

В якості приймачів АОСП використовують, як правило, фотодіоди *p-i-n* або лавинні фотодіоди (ЛФД). Фотодіоди *p-i-n* відрізняються простотою конструкції, високою надійністю, низкою вартістю.

Таблиця 1

Класи лазерних пристроїв за міжнародним стандартом ІЕС 825

Клас лазера	Довжина хвилі випромінювання, нм	Максимальна потужність лазерного випромінювання, мВт
1	810	25
	830	35
	910	25
	1300	8.85
	1550	10
2	910	100
3А	1300	31
	1550	50
3А*	1300	81
3В	1300	500
	1550	500

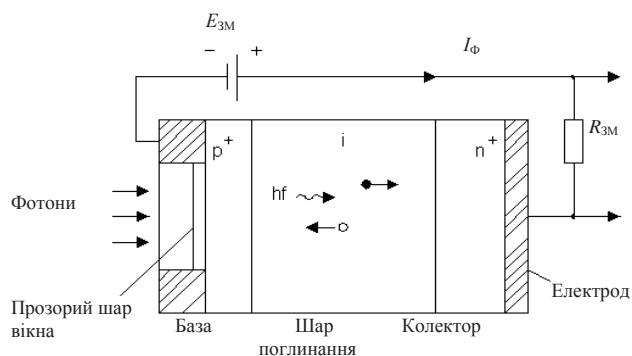


Рис. 3. Конструкція *p-i-n* фотодіода

На рис. 3 наведений приклад конструкції  $p-i-n$  фотодіода. В ньому між областями з провідністю  $p+$  (база) і  $n+$  (колектор) розміщений шар  $i$  (шар поглинання фотонів). При подачі зворотної напруги зміщення ЕЗМ в базі та колекторі створюється підвищена концентрація носіїв заряду. При надходженні до  $i$ -шару випромінювання певної довжини хвилі утворюються пари «електрон-дірка». На них впливає поле, яке створене напруженою ЕЗМ та зосереджене в  $i$ -шарі, воно примушує заряди дрейфувати.

Створюється фотострум дрейфу, величина якого прямо пропорційна величині потужності прийнятого оптичного випромінювання:

$$I_{\Phi} = \frac{P \cdot \lambda \cdot e}{h \cdot c} \eta, \quad (1)$$

де  $P$  – потужність оптичного випромінювання,  $\lambda$  – довжина хвилі оптичного випромінювання,  $e$  – заряд електрона,  $h$  – постійна Планка,  $c$  – швидкість світла та  $\eta$  – квантова ефективність фотодіода.

Чутливість фотодіода оцінюється відношенням утвореного фотоструму до потужності оптичного випромінювання, що його утворила:

$$S = \frac{I_{\Phi}}{P} = \frac{\lambda \cdot e}{h \cdot c} \eta. \quad (2)$$

Реальні приймальні оптичні модулі обладнані  $p-i-n$  фотодіодами мають чутливість порядку  $-20$  дБм [4] (для швидкості передачі сигналу  $10$  Гбіт/с).

У лавинному фотодіоді досягається підсилення первинного фотоструму за рахунок керованого лавинного множення числа носіїв заряду. Цьому сприяє конструкція ЛФД. Лавинне множення виникає у шарі множення (рис. 4).

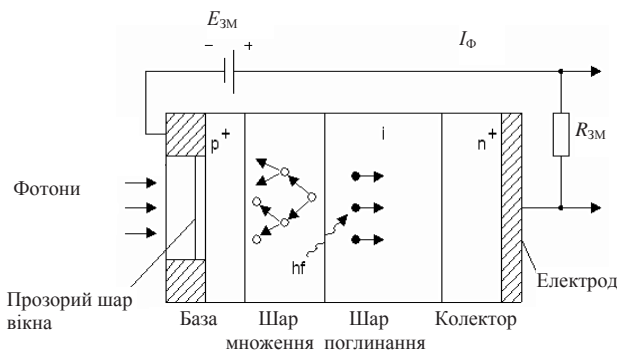


Рис. 4. Конструкція ЛФД

Лавинне множення досягається за рахунок збільшення напруги ЕЗМ до величини, близької до пробійної. При цьому на  $p-n$  переході встановлюється дуже сильне електричне поле причому у вузькій області. Висока швидкодія приладу буде досягнута, якщо основна частина фотонів поглинається в шарі, де існує сильне електричне поле. Фотони пролітають шар множення і не встигають взаємодіяти з кристалами. Носії зарядів утворюються в шарі поглинання і дрейфують до відповідних потенціалів. Рухаючись в сильному полі, носії набувають великої кінетичної енергії і, віддаючи частину її іншим носіям, звільняють нові носії (електрони і дірки).

Процес збільшення числа носіїв зарядів розвивається лавиноподібно і характеризується від-

повідним коефіцієнтом, який залежить від матеріалу виготовлення і може складати від  $2$  (для германієвих ЛФД) до  $100$  (для кремнієвих ЛФД). Відповідно до (2) цей процес призводить до аналогічного збільшення чутливості. Таким чином практична чутливість ЛФД може складати до  $-40$  дБм [4] (для швидкості передачі сигналу  $10$  Гбіт/с). Крім того, приймачі обладнані ЛФД мають значну швидкодію, що дозволяє їхнє використання на швидкостях передачі даних вище  $10$  Гбіт/с.

Недоліками ЛФД прийнято вважати високу напругу зсуву (до  $400$  В) і складність схеми управління регульованим джерелом ЕЗМ.

Третій з факторів, що впливають на енергетичний потенціал АОСП є діаграма спрямованості або апертура передавача. Дійсно, якщо розглянути спрощену схему розповсюдження оптичного променя (рис. 5), то стає очевидним, що лише частина випромінюваної потужності буде потрапляти в лінзу приймальної частини.

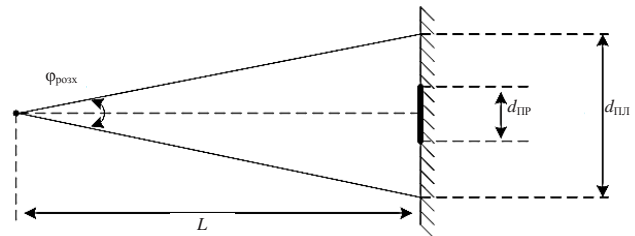


Рис. 5. Спрощена схема розповсюдження оптичного променя

Відповідно до рис. 5 втрати за рахунок розходження променя можна оцінити за формулою:

$$W_{\text{розх}} = 20 \log \left( \frac{L \phi_{\text{розх}}}{d_{\text{ПР}}} \right). \quad (3)$$

При чому потужність, що зосереджена у пучку, що влучає в отвір  $d_{\text{ПР}}$  може бути розрахована за виразом [5]

$$P = 1 - \exp \left[ -2 \left( \frac{d_{\text{ПР}}/2}{\beta L} \right)^2 \right], \quad (4)$$

де  $\beta = \frac{2\lambda}{\pi \omega_0}$ ,  $\lambda$  – довжина хвилі,  $\omega_0$  – радіус променя в найвузжочому місці.

Типове значення розходження оптичного променя без застосування систем наведення відносно велике –  $2 \dots 10$  мрад, що еквівалентно діаметру пучка ( $d_{\text{ПЛ}}$ )  $2 \dots 10$  м на відстані  $1$  км). За наявності системи наведення розбіжність променя може бути істотно знижена (зазвичай до  $0,05 \dots 1$  мрад, що еквівалентно розміру пучка  $5 \dots 100$  см на відстані  $1$  км) для збільшення доступності зв'язку, в тому числі і за погодними умовами. Слід мати на увазі, що вартість системи наведення досить велика. Крім того, в процесі експлуатації виникають ситуації неузгодженості (порушення юстировки) оптичних осей передавача та приймача. Такі неузгодженості пов'язані, наприклад з температурними коливаннями опор, на яких закріплюється обладнання. Отже можуть виникати випадки, коли потрібно адаптивно змінювати діаграму спрямованості передавача для забезпечення потрапляння променя у лінзу приймальної частини. Зрозуміло, що така адаптація буде при-

Таблиця 2

**Порівнювальний аналіз  
енергетичного потенціалу АОСП**

№ з/п	Назва параметру	Значення параметру для	
		існуючих АОСП	перспективних АОСП
1.	Потужність випромінювання	50 мВт (17 дБм)	100 Вт (50 дБм)
2.	Чутливість приймача	10 нВт (-50 дБ)	10 пВт (-80 дБ)
3.	Втрати юстировки	3 дБ	0 дБ
4.	Енергетичний потенціал	64 дБ	130 дБ
5.	Дальність зв'язку в ясну погоду/в туман	21 км / 0,64 км	43 км / 1,3 км

зводити до зменшення потужності  $P$ , що визначається виразом (4).

Механізм реалізації алгоритму зазначеної адаптації може бути досить складним, оскільки єдиним адекватним її критерієм є значення потужності (4). Але на цю величину впливає надто багато факторів, які мають різну природу походження, що фактично унеможлиблює здійснення адаптації лише за рівнем потужності прийнятого сигналу. Введення ж інших параметрів адаптації суттєво ускладнює систему.

Проте можливий інший варіант збільшення енергетичного потенціалу АОСП – шляхом використання декількох передавачів і декількох приймачів. Таке рішення дозволяє реалізувати схему рознесеної передачі, що є фактично безальтернативним заходом для боротьби із впливом турбулентності атмосфери та іншими явищами, що носять випадковий характер впливу. Одночасно збільшується сумарна площа приймальної поверхні, без збільшення апертури приймача, що дозволяє компенсувати порушення юстировки і при цьому уникнути збільшення ймовірності потрапляння до приймальної лінзи стороннього випромінювання (наприклад, сонячного світла). При певній реалізації, заходів адаптації діаграми спрямованості та рознесеної передачі можливо повністю мінімізувати втрати за рахунок неузгодженості.

Таким чином, враховуючі все вище зазначене можна порівняти характеристики типового існуючого обладнання АОСП та перспективного. Результати порівняння, які були зроблені для випадку найгірших умов передачі (щільний туман), коли втрати будуть складати порядку 100 дБ/км, наведені у таблиці 2.

**Висновки і пропозиції.** Проведено аналіз параметрів, які визначають значення можливого енергетичного потенціалу атмосферних оптичних систем передачі. Запропоновано напрямки підвищення надійності роботи атмосферних оптичних систем передачі, і відповідно, за рахунок використання нових оптимізаційних підходів: збільшення потужності оптичних випромінювачів (передавачів), збільшення чутливості оптичних детекторів (приймачів), звуження діаграми спрямованості передавальних антен, використання адаптації за довжиною хвилі, використання методів рознесеного прийому і ін. Найбільшу ефективність показав метод рознесеного прийому, який дозволяє реалізувати схему рознесеної передачі, що є фактично безальтернативним заходом для боротьби із впливом турбулентності атмосфери та іншими явищами, що носять випадковий характер впливу.

## Список літератури:

1. Яременко Ю.И. Применение открытых оптических систем передачи в сетях связи [Текст] / Яременко Ю.И. – Радиоэлектроника и телекоммуникации № 1(37), 2005. – С. 35-42.
2. Каталог. Атмосферные оптические системы передачи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.micromax.ru/catalog/comparePAV.shtml>.
3. Конспект лекций. Волоконно-оптические системы передачи (ВОСП) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://ndo.sibsutis.ru/magistr/courses\\_work/vosp\\_work/lectures\\_index.htm](http://ndo.sibsutis.ru/magistr/courses_work/vosp_work/lectures_index.htm).
4. Корнійчук В.І. Аналіз чутливості приймальних пристроїв ВОСП-СРК [Текст] / Корнійчук В.І., Барба І.Б., Дойжа Г.І. – Збірник наукових праць ОНАЗ ім. О.С. Попова. – № 2/2010.
5. Scott Bloom. Принципы работы FSO – систем (перевод ООО «МОСТКОМ») [Текст] / Scott Bloom, Eric Korevaar, John Schuster, Heinz Willebrand // JOURNAL OF OPTICAL NETWORKING. – June 2003, Vol. 2, № 6.

**Жук А.В.**

Военный институт телекоммуникаций и информатизации

**Яровой А.В., Паюн В.А.**

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

## АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ

### Аннотация

Проведен анализ параметров, которые определяют значение возможного энергетического потенциала атмосферных оптических систем передачи. Рассмотрены направления повышения надежности работы атмосферных оптических систем передачи за счет использования новых оптимизационных подходов. Ключевые слова: атмосферные оптические системы передачи, оптические излучатели, электромагнитные волны, лазеры, модели выявления событий.

**Zhuk A.V.**

Military Institute of Telecommunications and Informatization

**Yaroviy A.V., Payun V.A.**

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Politechnic Institute»

## **ANALYSIS OF ENERGY POTENTIAL ATMOSPHERIC OPTICAL TRANSMISSION SYSTEMS**

### **Summary**

An analysis of the parameters that determine the value of the potential energy potential of atmospheric optical transmission systems is carried out. The directions of increasing the reliability of atmospheric optical transmission systems due to the use of new optimization approaches are considered.

**Keywords:** atmospheric optical transmission systems, optical emitters, electromagnetic waves, lasers, models of event detection.