

Д.А. Кондрашов, І.О. Музика, В.В. Костенко, В.А. Чубаров

ВПЛИВ ОПТИЧНИХ ЗВОРОТНИХ ВТРАТ НА НАДІЙНІСТЬ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ У GPON-МЕРЕЖІ

Анотація. Актуальність дослідження зумовлена стрімким зростанням ролі GPON-мереж у забезпеченні широкосмугового доступу до Інтернету та підвищеними вимогами до їхньої надійності в умовах інтенсивної експлуатації. Однією з ключових проблем функціонування GPON-мереж є вплив оптичних зворотних втрат, які виникають унаслідок відбиттів та розсіювання оптичного сигналу у волоконно-оптичній лінії зв'язку і можуть призводити до зниження якості передавання даних та порушення синхронізації. Метою роботи є дослідження впливу оптичних зворотних втрат на надійність передавання даних у GPON-мережах та визначення шляхів мінімізації їх негативного впливу. Для досягнення поставленої мети застосовано методи теоретичного аналізу фізичних процесів у волоконно-оптичних лініях, експериментального дослідження реальних GPON-ліній, аналізу рефлектограм, а також математичного та імітаційного моделювання. У результаті дослідження встановлено вплив рівня оптичних зворотних втрат на показник якості сигналу та надійністю передавання даних. Отримані результати дозволили обґрунтувати рекомендації щодо вибору параметрів оптичного обладнання, монтажу та експлуатації мережі. Зроблено висновок, що контроль і зменшення оптичних зворотних втрат є необхідною умовою підвищення стабільності та надійності GPON-мереж.

Ключові слова: GPON, пасивна оптична мережа, волоконно-оптична лінія зв'язку, оптичні зворотні втрати, оптичний бюджет, надійність передавання даних, якість сигналу, рефлектометрія.

Постановка проблеми. У сучасних умовах стрімкого розвитку телекомунікаційних технологій волоконно-оптичні мережі стали основою для забезпечення високошвидкісного та надійного доступу до інформаційних ресурсів. Особливе місце серед них займають мережі Gigabit Passive Optical Network (GPON), які завдяки високій пропускній здатності, енергоефективності та відсутності активних елементів у розподільчій частині широко застосовуються для реалізації різноманітних архітектур типу FTTx. В умовах підвищеного навантаження на мережеву інфраструктуру та необхідності забезпечення безперервного доступу до Інтернету питання надійності передавання даних у GPON-мережах набуває особливої актуальності.

Однією з ключових проблем експлуатації GPON-мереж є вплив фізичних факторів волоконно-оптичної лінії зв'язку на якість оптичного сигналу. Зокрема, оптичні

зворотні втрати, що виникають унаслідок френелівських відбиттів, релєївського розсіювання, дефектів з'єднань і неоднорідностей волокна, призводять до появи паразитних відбитих сигналів. У мережах типу PON, які використовують спільне середовище передавання та механізми часової синхронізації, такі відбиття можуть сприйматися приймальним обладнанням як корисні сигнали, що викликає погіршення співвідношення сигнал–шум, зростання ймовірності бітових помилок та порушення стабільності роботи системи.

Проблема ускладнюється прагненням операторів зв'язку до збільшення кількості абонентів на одному оптичному порту та роботи мережі в умовах обмеженого оптичного бюджету. За таких умов навіть незначне зростання рівня оптичних зворотних втрат може призвести до суттєвого зниження надійності передавання даних. Незважаючи на наявність нормативних вимог до параметрів обладнання, вплив сумарних оптичних зворотних втрат на функціонування GPON-мереж залишається недостатньо формалізованим, що зумовлює необхідність подальших досліджень у цьому напрямі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема оптичних зворотних втрат (ORL) та відбиттів у волоконно-оптичних лініях розглядається у двох взаємопов'язаних напрямках: фізиці оптичного зворотного зв'язку та його впливу на джерела випромінювання / приймання; прикладних аспектах вимірювання відбиттів і їх впливу на якість передавання в мережах доступу (PON/GPON). Класичною фундаментальною працею, що описує ефекти зовнішнього оптичного зворотного зв'язку на параметри напівпровідникових інжекційних лазерів, є робота науковців R. Lang та K. Kobayashi [1], яка заклала теоретичну основу аналізу чутливості лазерних приймачів до відбиттів.

У прикладній площині значну увагу приділено методикам вимірювання ORL, коефіцієнту відбиття та інтерпретації вимірювань за допомогою спеціалізованого обладнання – оптичних рефлектометрів (Optical Time-Domain Reflectometer, OTDR). Зокрема, у статті G. Lietaert [2] систематизовано підходи до вимірювання ORL та обґрунтовано типові джерела похибок. Практичні рекомендації щодо розмежування понять коефіцієнту відбиття та втрат під час тестування наведені у матеріалах The Fiber Optic Association [3]. Окремо слід відзначити методику компанії VeeX щодо вимірювання OTDR Reflectance і ORL, орієнтовану на діагностику комп'ютерних мереж різного рівня складності [4].

У контексті GPON суттєвими є аналіз продуктивності приймачів у режимі пакетної передачі з вирівнюванням фази тактового сигналу та корекцією помилок для GPON, де показано чутливість приймача до спотворень і завад, зокрема спричинених відбиттями та розсіюванням [5]. Хоча нормативну основу для параметрів фізичного рівня GPON (зокрема вимог до оптичного інтерфейсу) формують рекомендації ІТУ-Т серії G.984.x, зокрема G.984.2 [6], однак на практиці не завжди вдається досягти бажаної надійності передавання інформації у зв'язку з наявністю низки факторів у т. ч. і пов'язаних з якістю зварки оптоволокна, чистоти обладнання, якості електроніки тощо.

Загалом, аналіз публікацій показує, що методи вимірювання ORL добре формалізовані, однак прикладна залежність між ORL та показниками якості / надійності

(BER, стабільність синхронізації) для конкретних умов GPON-ліній потребує додаткового вивчення з урахуванням умов конкретних каналами зв'язку та параметрів обладнання.

Мета дослідження. Метою даного дослідження є вивчення впливу оптичних зворотних втрат на надійність передавання даних у мережах типу GPON та обґрунтування технічних рішень, спрямованих на зменшення їх негативного впливу на якість функціонування волоконно-оптичних ліній зв'язку. У межах дослідження передбачається встановити закономірності взаємозв'язку між рівнем оптичних зворотних втрат, параметрами оптичного бюджету та показниками якості передавання даних, зокрема стабільністю синхронізації та імовірністю бітових помилок. Особлива увага приділяється аналізу впливу конструктивних і монтажних особливостей оптичної лінії, а також характеристик активного обладнання OLT та ONU на формування сумарного рівня відбитого сигналу. Досягнення поставленої мети має забезпечити формування практичних рекомендацій щодо проектування, експлуатації та діагностики GPON-мереж з підвищеним рівнем надійності та стійкості до фізичних спотворень оптичного сигналу.

Викладення основного матеріалу дослідження. Надійність передавання даних у мережах Gigabit Passive Optical Network (GPON) значною мірою визначається параметрами фізичного рівня волоконно-оптичної лінії зв'язку. На відміну від активних топологій, GPON використовує спільне оптичне середовище та механізми часової синхронізації, що підвищує чутливість системи до фізичних спотворень сигналу. Одним із найбільш критичних факторів, що впливають на стабільність роботи таких мереж, є оптичні зворотні втрати (Optical Return Loss, ORL), зумовлені зворотними відбиттями та розсіюванням оптичного сигналу у волокні (рис. 1).

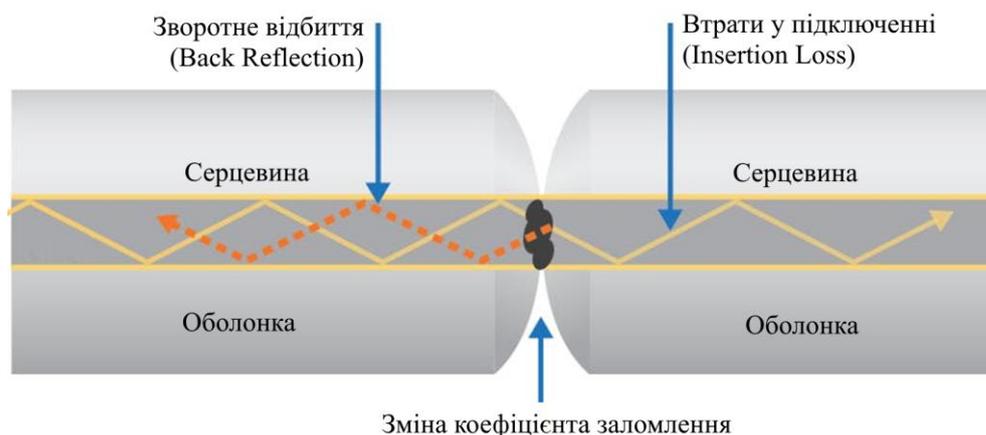


Рисунок 1 – Оптичний сигнал зазнає внесених втрат (Insertion Loss) і зворотного відбиття (Back Reflection) [7]

Оптичні зворотні втрати формуються внаслідок сукупної дії френелівських відбиттів на межах неоднорідностей та релєвського розсіювання в серцевині оптичного волокна. Френелівські відбиття виникають у місцях різкої зміни показника заломлення, зокрема на торцях конекторів, у місцях механічних пошкоджень, мікротріщин або заб-

руднення оптичних поверхонь. Релєвське розсіювання, своєю чергою, є об'ємним ефектом, пов'язаним із «вмороженими» мікронеоднорідностями структури волокна, і присутнє по всій його довжині.

Сумарний рівень ORL визначається як логарифмічне відношення потужності випромінюваного сигналу до потужності зворотно відбитого світлового потоку. Важливо відзначити, що ORL характеризує інтегральний ефект усіх відбиттів і розсіювання вздовж оптичної траси. Високі значення ORL відповідають меншим втратам на відбиття та свідчать про кращу якість волоконно-оптичної лінії.

У GPON-мережах (рис. 2) оптичні зворотні втрати мають особливо негативний вплив у висхідному напрямку передавання даних. Це пов'язано з використанням burst-mode приймачів на стороні OLT, які працюють у режимі приймання коротких імпульсів від різних ONU з різною відстанню та рівнем потужності. Зворотно відбиті сигнали можуть потрапляти в часові вікна приймання, порушувати процедури вирівнювання фаз і рівнів, а також знижувати ефективність механізмів корекції помилок.

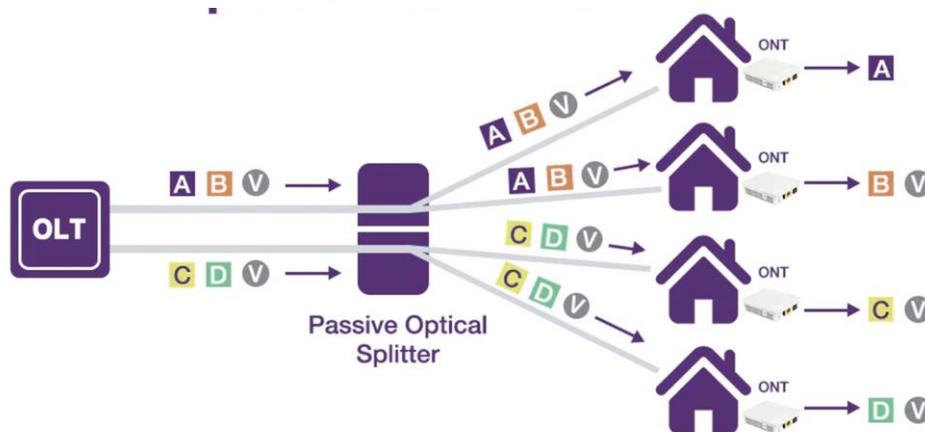


Рисунок 2 – Структура типової PON-мережі [8]

Підвищений рівень ORL призводить до погіршення співвідношення сигнал–шум, зростання ймовірності бітових помилок (BER) та нестабільної роботи системи динамічного розподілу смуги пропускання (DBA). У граничних випадках це може викликати втрату синхронізації між OLT та ONU, повторні процедури ресстрації абонентських терміналів або переривання сервісів.

Оптичний бюджет є базовим параметром при проектуванні та експлуатації GPON-мереж. Він визначається різницею між потужністю передавача та чутливістю приймача з урахуванням усіх втрат у волоконно-оптичній лінії. До основних складових втрат належать загасання усередині волокна, втрати на зварних з'єднаннях, втрати на конекторах, а також втрати, внесені пасивними розгалужувачами.

Оптичні зворотні втрати формально не зменшують енергетичний бюджет у прямому сенсі, проте вони погіршують ефективність використання наявного бюджету. В умовах, коли мережа працює поблизу граничних значень допустимих втрат, навіть незначне зростання ORL може призвести до зниження запасу надійності та нестабільної роботи приймального обладнання. Це особливо актуально для GPON-ліній з великим коефіцієнтом розгалуження (1:64, 1:128) та значною протяжністю.

У межах дослідження проведено аналіз реальних GPON-ліній різної довжини та конфігурації з використанням оптичного рефлектометра (OTDR). Отримані рефлектограми дозволили ідентифікувати основні джерела відбиттів, оцінити рівень рефлектансу окремих подій та визначити інтегральне значення ORL для кожної лінії. На рисунку 3 подано типову рефлектограму з описом причин зменшення потужності сигналу.

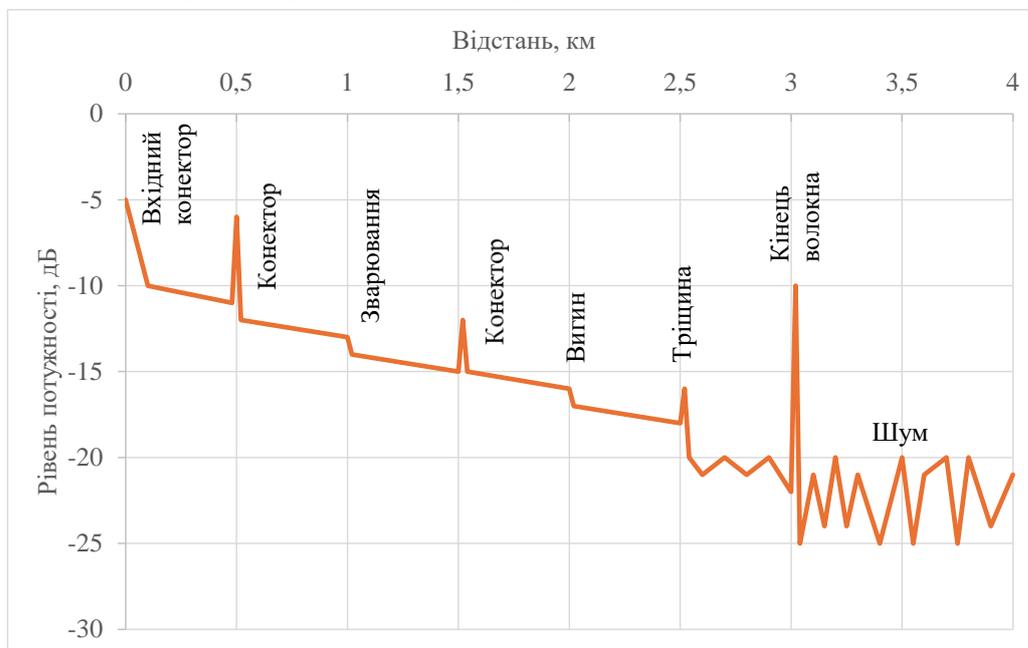


Рисунок 3 – Приклад типової рефлектограми OTDR оптоволоконної лінії

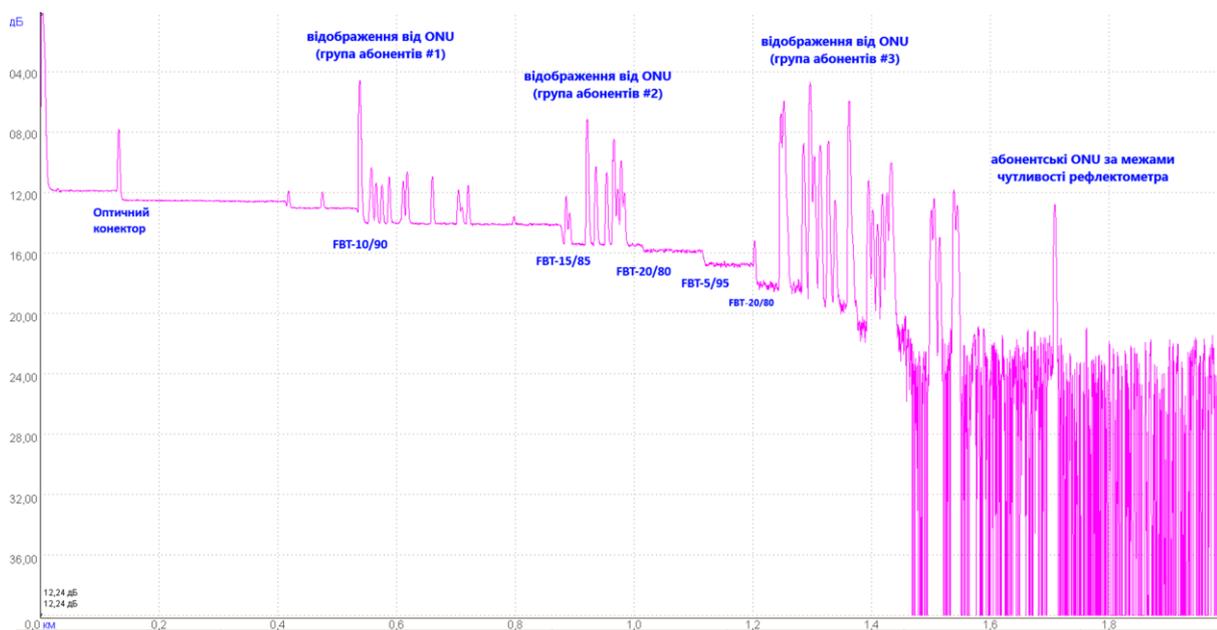


Рисунок 4 – Аналіз рефлектограми у діапазоні 1310 нм

Аналіз результатів показав (рис. 4), що найбільший внесок у погіршення ORL вносять не загасання всередині волокна, а локальні явища з високим рівнем відбиття, зокрема конектори з прямим поліруванням (UPC), забруднені або пошкоджені торці

волокна, а також неякісно виконані механічні з'єднання. Виявлено, що використання конекторів з кутовим поліруванням (APC) суттєво знижує рівень френелівських відбиттів і покращує сумарний показник ORL.

Для оцінки впливу оптичних зворотних втрат на надійність передавання даних було виконано математичне та імітаційне моделювання. Модель враховувала залежність рівня шумів приймача від потужності зворотно відбитого сигналу, а також вплив ORL на ефективність корекції помилок. Отримані результати підтвердили експериментальні спостереження та показали нелінійний характер впливу ORL на показники BER.

Необхідність використовувати метод математичного моделювання виникла через те, що якщо використовувати практичну модель, то в цій моделі можливо зробити вимір лише реального значення параметра ORL і, відповідно, одержати відстань до місць в оптичному кабелі, де наявні проблеми. Але створити процес впливу цих параметрів на сигнал оптичного трансиверу, процес додавання цих сигналів у зв'язку із внесенням їх у тракт приймання, а також аналіз наслідків цього явища є неможливим. Це вимагає наявності спеціального устаткування й додаткових вимірювальних приладів.

Характер моделі системи можна описати у вигляді трьох множин: $y_b(x)$, $ORF(x)$, $S_1(x)$, x , де $y_b(x)$ та $ORF(x)$ – множина досліджуваних елементів (в даному випадку це вхідний сигнал трансиверу, який надходить до оптичної лінії); $S_1(x)$ – множина допустимих зв'язків між елементами (структура моделі); x – множина розглянутих моментів часу.

Для створення математичної моделі було використано середовище Mathcad 15.0. Задано вхідний сигнал у вигляді (1):

$$y_b(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } 0 \leq x \leq 3 \\ 1 & \text{if } 3 < x \leq 6 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

На рис. 5 зображено графік одного періоду такого вхідного сигналу.

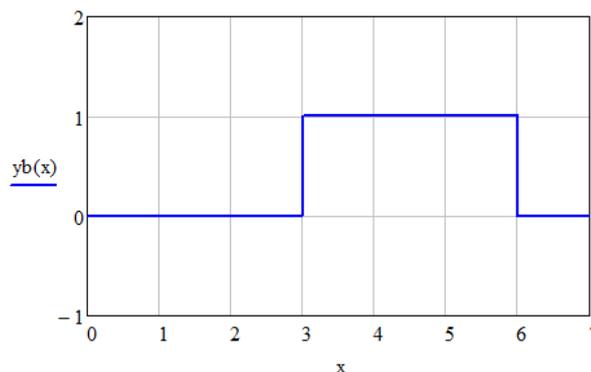


Рисунок 5 – Один період вхідного сигналу

На графіку (рис. 6) представлено вхідний сигнал на певному досліджуваному інтервалі часу, який описується формулою (2).

$$f(x) = \sum_{m=-1}^7 y_b(x - m \cdot T) \quad (2)$$

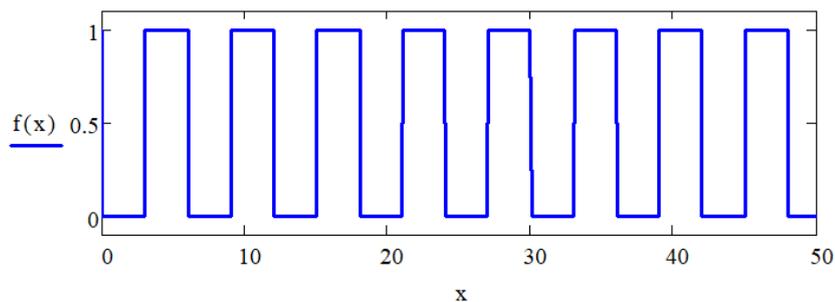


Рисунок 6 – Вхідний сигнал на досліджуваному інтервалі часу

Для того, щоб наблизити математичну модель сигналу до реальної фізичної моделі необхідно знайти неперервну функцію сигналу та ввести до неї фізичні властивості обладнання при формуванні сигналу. Для цього використано перетворення Фур'є (3) такого вигляду:

$$S_1(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n [a_k \cos(k \cdot \Omega \cdot x) + b_k \sin(k \cdot \Omega \cdot x)] \quad (3)$$

де $a(k)$ та $b(k)$ – параметри, наведені у формулах (4) та (5) відповідно:

$$a_k = \frac{2}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} y_b(x) \cdot \cos(k \cdot \Omega \cdot x) dx \quad (4)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} y_b(x) \cdot \sin(k \cdot \Omega \cdot x) dx \quad (5)$$

На рис. 7 зображений вхідний сигнал, наближений до реальної фізичної моделі у вигляді неперервної функції, знайденої за допомогою розкладання в ряд Фур'є.

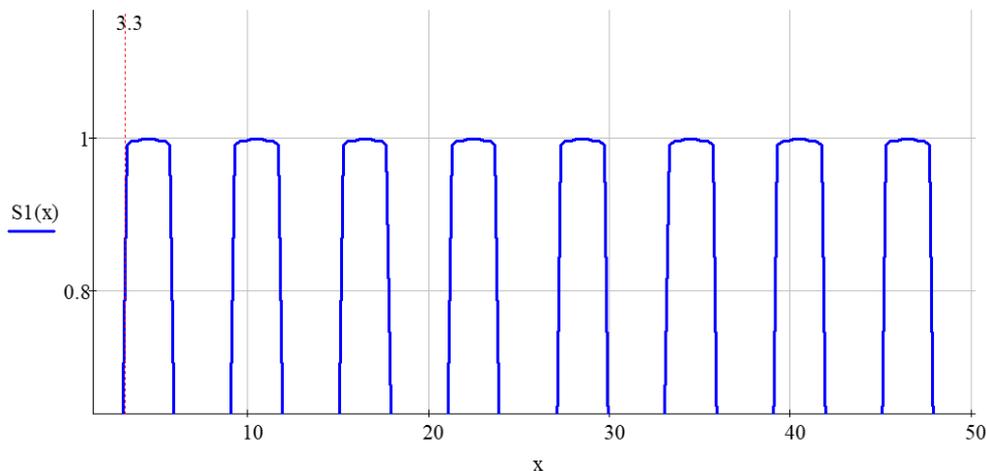


Рисунок 7 – Вхідний сигнал, наближений до реальної фізичної моделі

Для створення моделі впливу ORL на сигнал необхідно змоделювати функцію зворотніх відбиттів (ORF або Optical Return Function). Функція ORF буде пов'язана із зворотніми відображеннями вхідного сигналу, які будуть зумовлені неоднорідностями, що знаходяться на різних відстанях та, відповідно, мають різну величину. Отже, для моделювання необхідно використовувати випадкові значення амплітуд відбиттів та їх затримок у часі.

Для моделювання ORF використано множину випадкових значень коефіцієнтів r для моделювання затримок та загасань.

$$r = \text{rexp}(n, 10) \quad (6)$$

У формулі 6 зображена функція створення випадкової множини значень коефіцієнтів, які будуть використовуватися для моделювання ORF. Нижче у формулі (7) представлено функцію обирання коефіцієнта із створеної множини випадкових значень r в залежності від кроку анімації.

$$T_1(x) = \frac{x+4}{T} (4 + sm) \quad (7)$$

Формула (8) буде використовуватися для створення випадкового часового зсуву функції ORF відносно вхідного сигналу.

$$\text{delta}(x) = x - 3 + 15 \cdot r_{\text{floor}(T_1(x))} \quad (8)$$

$$\text{ORF}_{\text{base}}(x) = \left| \frac{10^{-45 \cdot r_{\text{floor}(T_1(x))}}}{45} S_1(x) \right| \quad (9)$$

Визначимо функцію випадкового коефіцієнту підсилення вхідного сигналу (9), який зумовлений неоднорідностями оптичного волокна.

$$\text{ORF}(x) = \text{ORF}_{\text{base}}(\text{delta}(x - sm)) \quad (10)$$

Функція (10) випадкового коефіцієнту амплітуди ORF з урахуванням випадкового зсуву в часі сигналу, який відбивається від неоднорідностей. У формулі 11 наведена результуюча математична модель вихідного сигналу з урахуванням впливу ORF на вхідний сигнал.

$$\text{SUM}(x) = S_1(x) + \text{ORF}(x) \quad (11)$$

На рис. 8 зображено ORF та вихідний сигнал з підсиленнями вхідного сигналу, які зумовлені ORF, верхньою та нижньою границями сприйнятливості приймача світлового сигналу.

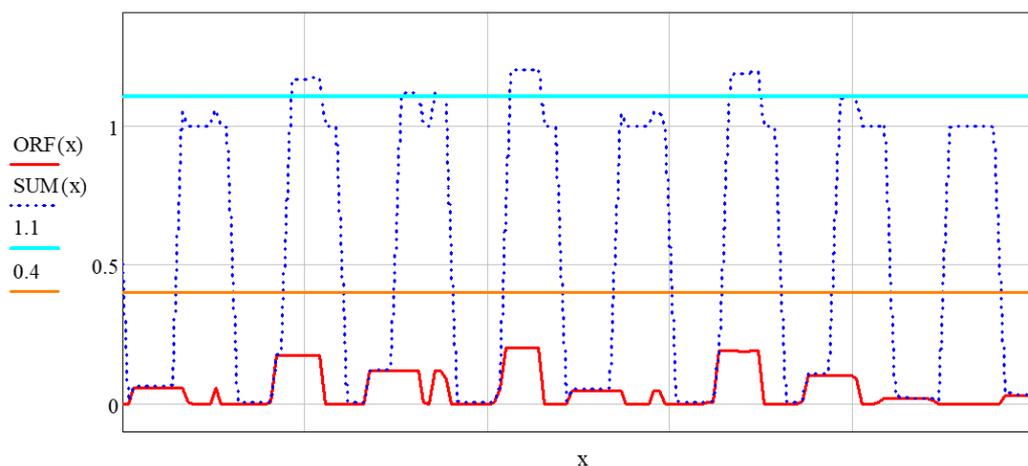


Рисунок 8 – ORF та вихідний сигнал, наближений до реальної фізичної моделі

Синім пунктиром наведено вхідний сигнал, що надходить на приймач. Червоним кольором наведено рівень зворотніх відображень, що в рамках прикладу генерується з використанням випадкової множини значень. Верхня та нижня границі сприйняття визначають, яким має бути сигнал, щоб його розпізнав приймач, та залежить від класу приймача і його технічної характеристики. У більш потужних та чутливих приймачі

класу C++ і вище границі сприйняття є ширшими, а тому ORL можуть бути сприйняті як сигнал і, відповідно, викликатимуть розсинхронізацію.

На графіку (рис. 9) можна спостерігати, що в цьому випадку оптичні зворотні відображення не впливають на приймач, тому що не переходять нижню границю сприйняття. Але якщо змодельовати аналогічну ситуацію з більш чутливим приймачем, то відбиття будуть прийняті як сигнал (рис. 9).

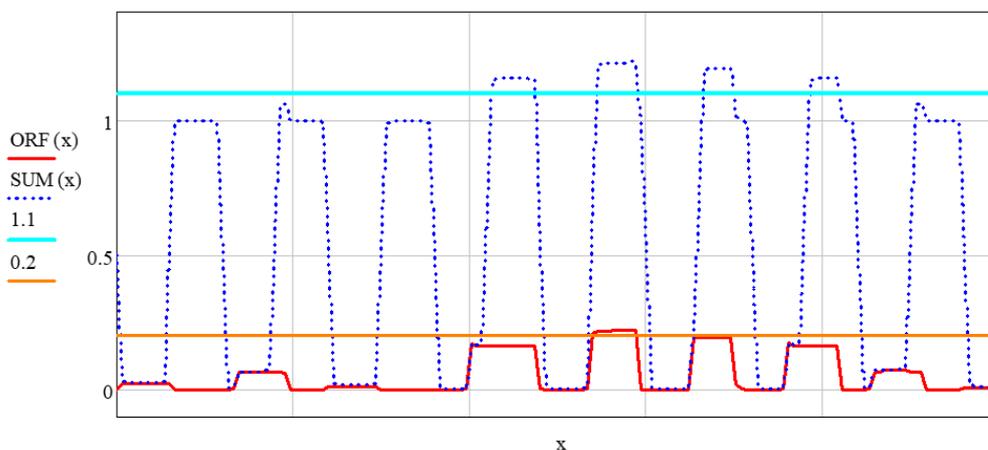


Рисунок 9 – ORF та вихідний сигнал при більш чутливому приймачі

Варто зазначити, що в тому випадку, коли вплив ORL на приймач є незначним, то є можливим програмне коригування його границь сприйняття. В іншому випадку для вирішення проблеми зворотніх відображень необхідно підбирати оптичні модулі залежно від конкретних умов мережі. На коротких відстанях є оптимальним використання менш потужних приймачів (наприклад, класу C+), що зменшить кількість оптичних відображень, а великих відстанях, де відображення поступово стухають разом із сигналом, можливе застосування високопотужних приймачів (наприклад, класу C++ і вище), що підвищить загальну пропускну здатність мережі без негативного впливу оптичних зворотніх відображень.

У результаті математичного моделювання було продемонстровано вплив зворотного відбиття на якість передачі даних в оптичному каналі GPON-мережі при наявності високочутливого приймача, який може помилково сприймати відбиття ORL як реальний сигнал і, відповідно, отримати збій часової синхронізації. Моделювання засвідчило, що при достатньому запасі оптичного бюджету система здатна компенсувати негативний вплив зворотніх відбиттів. Однак у режимах граничного бюджету навіть помірне погіршення ORL призводить до різкого зростання BER і втрати стабільності передавання. Це підтверджує необхідність урахування ORL не лише як допоміжного, а як одного з ключових параметрів проектування GPON-мереж.

На основі проведеного аналізу сформульовано практичні рекомендації щодо підвищення надійності передавання даних у GPON-мережах. До них належать використання APC-конекторів у критичних ділянках мережі, мінімізація кількості з'єднань, регулярний контроль чистоти оптичних поверхонь, а також забезпечення достатнього запасу оптичного бюджету на етапі проектування. Систематичний моніторинг ORL та

аналіз рефлектограм дозволяють своєчасно виявляти деградацію лінії та запобігати аварійним ситуаціям.

Висновки. У статті виконано дослідження впливу оптичних зворотних втрат на надійність передавання даних у мережах типу GPON, що дозволило узагальнити фізичні та експлуатаційні аспекти функціонування волоконно-оптичних ліній зв'язку. Проаналізовано основні механізми формування оптичних зворотних втрат, зокрема френелівські відбиття та релієвське розсіювання, а також визначено роль якості монтажу, типів конекторів і параметрів пасивних компонентів у формуванні сумарного рівня ORL. Показано, що зростання оптичних зворотних втрат призводить до погіршення співвідношення сигнал–шум, підвищення ймовірності бітових помилок та зниження стабільності роботи приймального обладнання GPON, особливо у висхідному напрямку передавання даних. У межах дослідження встановлено залежність між рівнем ORL, запасом оптичного бюджету та надійністю передавання даних у реальних GPON-лініях різної довжини та конфігурації. Результати математичного та імітаційного моделювання підтвердили, що робота мережі в умовах граничного оптичного бюджету значно підвищує чутливість системи до відбиттів і зворотного розсіювання. На основі отриманих результатів сформульовано практичні рекомендації щодо мінімізації оптичних зворотних втрат, зокрема шляхом використання конекторів з кутовим поліруванням, оптимізації структури з'єднань та забезпечення достатнього запасу оптичного бюджету. Таким чином, систематичний контроль оптичних зворотних втрат (ORL) є необхідною умовою підвищення надійності та стабільності функціонування GPON-мереж.

ЛІТЕРАТУРА

1. Lang R., Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties // IEEE Journal on Quantum Electronics. 1980. Vol. QE-16. P. 347–355. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1070479> (дата звернення 02.01.2026)
2. Lietaert G. Optical return loss measurement. White Paper JDSU, 2006. URL: <https://www.jdsu.com> (дата звернення 02.01.2026).
3. The Fiber Optic Association, Inc. Measuring Reflectance or Return Loss. URL: <https://www.thefoa.org/tech/ref/testing/test/reflectance.html> (дата звернення 02.01.2026)
4. Technical Note: Measuring OTDR Reflectance and ORL. URL: https://download1.veexinc.com/RXT-4100/Technical-Notes/10014/Measuring_OTDR_Reflectance_and_ORL_D08-00-088_A00.pdf (дата звернення 02.01.2026).
5. Shastri B. J., Faucher J., Kheder N., Zeng M., Zicha N., Plant D. Performance analysis of burst-mode receivers with clock phase alignment and forward error correction for GPON. Analog Integr Circ Sig Process, 2009. P. 57–70. URL: https://www.queensu.ca/physics/shastrilab/sites/shastwww/files/uploaded_files/publications/journals/4_Shastri_Analog_bmcpa_2009.pdf (дата звернення 02.01.2026).
6. Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Physical Media Dependent (PMD) layer specification. ITU-T G.984.2 Telecommunication Standardization Sector Of ITU, 2019. P. 5. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.984.2-201908-I!!PDF-E&type=items (дата звернення 02.01.2026).

7. Where does optical return loss matter. URL: <https://www.cablinginstall.com/data-center/article/14210663/where-does-optical-return-loss-matter> (дата звернення 02.01.2026).

8. AON vs. PON: Which is Better for FTTH Network.

URL: <https://www.vcelink.com/blogs/focus/aon-vs-pon> (дата звернення 02.01.2026).

REFERENCES

1. Lang, R., & Kobayashi, K. (1980). External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties. *IEEE Journal on Quantum Electronics*, 16(3), 347–355. <https://doi.org/10.1109/JQE.1980.1070479>

2. Lietaert, G. (2006). Optical return loss measurement (White paper). JDSU. <https://www.jdsu.com>

3. The Fiber Optic Association, Inc. (n.d.). Measuring reflectance or return loss. <https://www.thefoa.org/tech/ref/testing/test/reflectance.html>

4. VeeX Inc. (n.d.). Measuring OTDR reflectance and ORL (Technical note). https://download1.veexinc.com/RXT-4100/Technical-Notes/10014/Measuring_OTDR_Reflectance_and_ORL_D08-00-088_A00.pdf

5. Shastri, B. J., Faucher, J., Kheder, N., Zeng, M., Zicha, N., & Plant, D. (2009). Performance analysis of burst-mode receivers with clock phase alignment and forward error correction for GPON. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 57–70. https://www.queensu.ca/physics/shastrilab/sites/shastwww/files/uploaded_files/publications/journals/4_Shastri_Analog_bmcpa_2009.pdf

6. International Telecommunication Union. (2019). Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification (ITU-T Recommendation G.984.2). <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.2>

7. Where does optical return loss matter? (n.d.). Cabling Installation & Maintenance. <https://www.cablinginstall.com/data-center/article/14210663/where-does-optical-return-loss-matter>

8. AON vs. PON: Which is better for FTTH network? (n.d.). VCElink Blog. <https://www.vcelink.com/blogs/focus/aon-vs-pon>

Received 03.03.2026

Accepted 09.03.2026

Published 31.03.2026

The impact of optical reverse losses on the reliability of data transmission in GPON networks

The rapid deployment of Gigabit Passive Optical Networks (GPON) as a core technology for broadband access has significantly increased the requirements for transmission reliability and physical layer stability. In shared optical access networks, such as GPON, the quality of the fiber-optic link plays a crucial role in ensuring stable data transmission, especially under high split ratios and limited optical power budgets. One of the critical physical factors affecting network performance is optical return loss (ORL), which is caused by Fresnel reflections and Rayleigh backscattering in optical fibers, connectors, splices, and other network components.

This paper investigates the impact of optical return loss on data transmission reliability in GPON networks. The study focuses on the influence of back-reflected optical signals on signal quality, synchronization stability, and error performance, particularly in the upstream

direction, where burst-mode receivers are used. The aim of the research is to assess the relationship between ORL levels, optical budget margins, and key quality indicators of GPON systems.

The research methodology combines theoretical analysis of physical processes in fiber-optic links, experimental measurements of real GPON lines using optical time-domain reflectometry, and mathematical as well as simulation modeling. The obtained results demonstrate that increased optical return loss leads to degradation of the signal-to-noise ratio, higher bit error rates, and reduced operational stability, especially when the network operates close to its maximum allowable optical budget.

Based on the analysis, practical recommendations are proposed to minimize optical return loss and improve GPON network reliability, including the use of angled physical contact connectors, optimization of connection topology, reduction of reflective events, and continuous monitoring of ORL parameters. The results confirm that effective control of optical return loss is a necessary condition for ensuring reliable and stable operation of GPON access networks.

Keywords: GPON, passive optical network, fiber-optic communication line, optical return loss, optical budget, data transmission reliability, signal quality, reflectometry.

Кондрашов Дмитро Андрійович – аспірант кафедри комп'ютерних систем та мереж Криворізького національного університету, Кривий Ріг, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6751-925X>

Музика Іван Олегович – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Криворізького національного університету, Кривий Ріг, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9202-2973>

Костенко Владислав Володимирович – провідний інженер ТОВ «Претчер», Кривий Ріг, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0525-9396>

Чубаров Владислав Анатолійович – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Криворізького національного університету, Кривий Ріг, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7369-2859>

Kondrashov Dmytro Andriiovych – postgraduate student, department of computer systems and networks, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6751-925X>

Muzyka Ivan Olehovych – PhD, associate professor, department of computer systems and networks, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9202-2973>

Kostenko Vladyslav Volodymyrovych – Lead Engineer, Pretcher LLC, Kryvyi Rih, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0525-9396>

Chubarov Vladyslav Anatoliiovych – PhD, associate professor, department of computer systems and networks, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7369-2859>