

УДК 355.457

Ю.О. Бабій,

к.т.н. (Національна академія Державної прикордонної служби України ім. Богдана Хмельницького)

МОДЕЛЬ СТАТИСТИЧНОЇ ОБРОБКИ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ ПРИ МОНІТОРИНГУ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИМ ЗАСОБОМ ОХОРОНИ КОРДОНУ

У роботі розроблено модель синтезу функціональної структури волоконно-оптичного засобу охорони, що відрізняється встановленням видів методу зворотного розсіяння оптичного сигналу, які здатні забезпечити підвищення живучості і завадостійкості волоконно-оптичних засобів охорони. Це дозволило систематизувати способи мультиплексування сигналів, явища, на основі яких формуються сигнали, а також елементну базу, що в сукупності покладено в основу розробки ієрархічної моделі. Із використанням моделі синтезу функціональної структури волоконно-оптичного засобу охорони підвищеної завадостійкості та живучості розроблено структуру квазілінійного волоконно-оптичного засобу охорони з кільцевим чутливим елементом, у якій використано двобічний метод зворотного розсіяння оптичного сигналу. Підвищення завадостійкості (сигналізаційної надійності) моніторингу волоконно-оптичних засобів охорони досягається за рахунок двобічного прийому оптичного сигналу релеевського розсіяння від макровигину кільцевого чутливого елемента. Підвищення живучості волоконно-оптичних засобів охорони досягається за рахунок застосування кільцевого чутливого елемента, при пошкодженні останній трансформується у два лінійних чутливих елементи, що знижує надійність системи до нормального рівня та дозволяє зберегти працездатність волоконно-оптичних засобів охорони в цілому.

Ключові слова: рухомий об'єкт, волоконно-оптичні засоби охорони, чутливий елемент.

В работе разработана модель синтеза функциональной структуры волоконно-оптического средства охраны, что отличается установлением видов метода обратного рассеяния оптического сигнала, которые способны обеспечить повышение живучести и помехоустойчивости волоконно-оптических средств охраны. Данное позволило систематизировать способы мультиплексирования сигналов, явления, на основе которых формируются сигналы, а также элементную базу, что в совокупности положены в основу разработки иерархической модели. С использованием модели синтеза функциональной структуры волоконно-оптического средства охраны повышенной помехоустойчивости и живучести разработана структура квазилинейного волоконно-оптического средства охраны с кольцевым чувствительным элементом, в которой использован двусторонний метод обратного рассеяния оптического сигнала. Повышения помехоустойчивости (сигнализационной надежности) мониторинга волоконно-оптических средств охраны достигается за счет двустороннего приема оптического сигнала релеевского рассеяния от макроизгиба кольцевого чувствительного элемента. Повышение живучести волоконно-оптических средств охраны достигается за счет применения кольцевого чувствительного элемента, при повреждении последний трансформируется в два линейных чувствительных элемента, что снижает надежность системы до нормального уровня и позволяет сохранить работоспособность волоконно-оптических средств охраны в целом.

© Бабій Ю.О., 2017

Ключевые слова: волоконно-оптические средства охраны, движущийся объект, чувствительный элемент.

In this paper, a model for the synthesis of the functional structure of the fiber-optic protection device is developed, which is distinguished by the establishment of types of the method of inverse scattering of the optical signal, which can provide increased survivability and noise immunity of the fiber-optical means of protection. This allowed to systematize the ways of multiplexing signals, the phenomenon on the basis of which signals are formed, as well as the element base, which collectively is the basis for the development of the hierarchical model. Using the model of the synthesis of the functional structure of the fiber-optical means for the protection of increased noise immunity and durability, a structure of a quasilinear fiber-optical protective device with a ring-sensitive element was developed, in which the two-way method of inverse scattering of the optical signal was used. Increase of noise immunity (signaling reliability) of the control of fiber-optical means of protection is achieved due to the two-way reception of an optical signal of the Relay scatter from the macro ring of a ring-sensitive element. Increasing the durability of fiber-optical means of protection is achieved through the use of a ring-sensitive element, when damaged the latter is transformed into two linear sensitive elements, which reduces the reliability of the system to a normal level and allows you to maintain the performance of fiber-optical means of protection in general.

Keywords: moving object, fiber-optical means of protection, sensitive element.

Вступ

Доцільним методом обробки сигналів квазілінійної системи моніторингу волоконо-оптичних засобів охорони (ВОЗО) рухомого об'єкта (РО) є метод зворотного розсіяння оптичного сигналу. Спільним процесом для різних видів цього методу є процес накопичення множини реалізацій відбитого сигналу і наступне їх статистичне згладжування. Зазначене здійснюється з метою зменшення шумів приймача в середньому на 10–20 дБ, що покращує чутливість волоконно-оптичного датчика та відношення сигналу до шуму, рис. 1 [1].

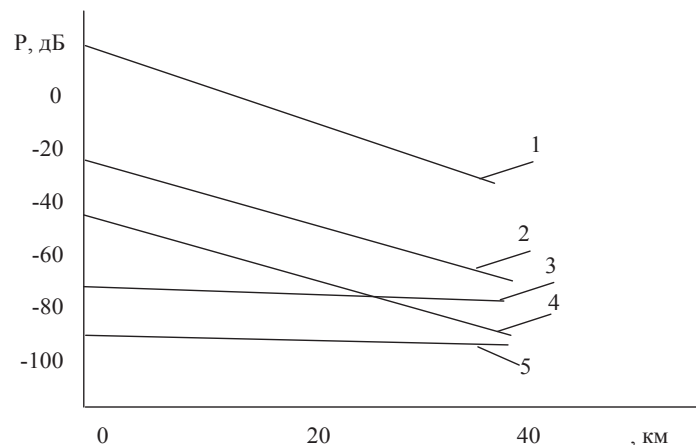


Рис. 1. Графік рівнів потужності імпульсів в методі зворотного розсіяння: 1 – потужність світлової хвилі у світловоді; 2 – потужність зворотного розсіяння при тривалості зондуючого імпульса $\tau = 100$ нс; 3 – рівень шумів приймача; 4 – потужність зворотного розсіяння при тривалості зондуючого імпульса $\tau = 10$ нс; 5 – згладжений рівень шумів приймача

З рис. 1 видно, що різниця між рівнем шуму приймача і згладженим рівнем шуму приймача складає 10–20 % від динамічного діапазону рівня сигналу, що

робить операцію згладжування актуальною у процесі рефлектометрії світловодів. Відмінністю у функціонуванні вимірювальної і охоронної рефлектометричних систем є те, що час накопичення сигналів у вимірювальній системі досить великий і може досягати декількох годин. В охоронній системі він обмежується часом впливу правопорушника (ПП) на чутливий елемент (ЧЕ), що робить актуальним дослідження процесу накопичення оптичних сигналів.

Просте збільшення частоти зонduючого сигналу приведе до неоднозначності вимірювання відбитого сигналу, а також до збільшення мінімальної дальності дії системи через збільшення сумарної тривалості процесу випромінювання множини оптичних імпульсів. Це вимагає пошуку розв'язку завдання щодо обґрунтування параметрів пакетів зонduючих імпульсів із урахуванням особливостей впливу ПП на ЧЕ, а також способу обробки відбитого сигналу при зменшенні мінімальної дальності дії системи, що в сукупності становить потребу в розробці моделі статистичної обробки оптичних сигналів при моніторингу рухомих об'єктів волоконно-оптичним засобом охорони.

Основна частина

Для вирішення завдання необхідно:

1. Розробити математичну модель накопичення оптичних сигналів при обмеженому часі рефлектометрії волоконного світловоду;
2. Розробити функціональну структуру системи контролю волоконно-оптичного типу із забезпеченням накопичення оптичного сигналу при обмеженому часі рефлектометрії.

Для забезпечення статистичної обробки оптичних сигналів потрібно накопичити мінімальну кількість N_{min} реалізацій сигналу. Кількість імпульсів, при якій досягається необхідна сигналізаційна надійність виявлення, визначається за формулою [2]:

$$N_{min} = \frac{q_{min}^2}{q_o^2}, \quad (1)$$

де q_{min} – мінімальне значення відношення сигналу до шуму, при якому досягається достатня завадостійкість виявлення (задані значення ймовірностей хибної тривоги P_{xm} , і пропуску сигналу P_{nc} , q_o – відношення сигналу до шуму при прийомі одиночного імпульсу;

N_{min} – мінімальна кількість імпульсів, при якій досягається необхідна сигналізаційна надійність виявлення.

З виразу (1) видно, що відношення сигналу до шуму, залежно від кількості імпульсів, збільшується в $\sqrt{N_{min}}$ раз. Мінімальне значення відношення сигналу до шуму визначається за формулою [2]:

$$q_{min} = \Phi^{-1}(1 - P_{xm}) + \Phi^{-1}(1 - P_{nc}), \quad (2)$$

де $\Phi^{-1}(1 - P_{xm})$, $\Phi^{-1}(1 - P_{nc})$ – функції, які зворотні інтегралу ймовірності типу

$$\Phi(x) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-0,5t^2) dt \right) \quad [3].$$

При розрахунках використовують критерій Неймана-Пірсона, згідно з яким мінімізують P_{nc} при фіксованому значенні P_{xm} за табличними даними інтеграла ймовірності $\Phi(x)$. Згідно з даними [2] для забезпечення високого рівня сигналізаційної надійності (ймовірність правильного виявлення $P_{ns} = (1 - P_{xm})(1 - P_{nc}) = 0,9$) необхідно, щоб мінімальне значення відношення сигналу до шуму становило $q_{min} = 4-8$. Нехай тривалість зондуючого імпульса $\tau = 100$ нс, тобто довжина становитиме 10 м, протяжність флангу охорони 10 км. Тоді довжина пакета зондуючих імпульсів становитиме четвертину від протяжності фланга 2,5 км, а кількість імпульсів у пакеті, як відношення довжини пакета до тривалості імпульса, становитиме 250. Відношення сигналу до шуму при збільшенні кількості зондуючих імпульсів з 1 до 250 збільшиться в $\sqrt{250} = 15$ раз.

Значення відношення сигналу до шуму під час прийому одиночного імпульсу залежить від віддаленості ділянки, на якій виникло розсіяння оптичного сигналу, і визначається за даними рефлектограми (рис. 1) відповідно до виразу [4; 5]:

$$5 \lg q_o = P_{3\sigma} - P_{ш} , \quad (3)$$

де $P_{ш}$ – рівень потужності шуму приймача, дБ; $P_{3\sigma}$ – рівень потужності зворотного розсіяння, дБ.

Підставимо (3) в (1), тоді:

$$N_{min} = \frac{q_{min}^2}{10^{0,2(P_{3\sigma} - P_{ш})}} . \quad (4)$$

Забезпечення N_{min} в рефлектометрії оптичних кабелів зв'язку здійснюється за рахунок збільшення часу накопичення сигналів зворотного розсіяння T_p . Співвідношення між N_{min} і T_p , залежно від дальності рефлектометрії, представлено в табл. 1 [5].

Таблиця 1

Характеристики рефлектометрії світловодів

Мінімальне локальне затухання	0,001 дБ			0,01 дБ		
Просторова роздільна здатність	5 м			50 м		
Мінімальна кількість імпульсів, N_{min}	Динамічний діапазон	Довжина кабеля, L_m	Час накопичення сигналів зворотного розсіяння, T_p	Динамічний діапазон	Довжина кабеля, L_m	Час накопичення сигналів зворотного розсіяння, T_p
10^3	–	–	–	8 дБ	37 км	0,37 с
10^4	2 дБ	10 км	1 с	10 дБ	50 км	5 с
10^5	4 дБ	20 км	20 с	12 дБ	62 км	62 с
10^6	7 дБ	35 км	350 с	15 дБ	75 км	750 с

При визначенні часу T_p необхідно враховувати особливості функціонування ВОЗО при застосуванні двобічного методу зворотного розсіяння:

1) при пошкодженні ЧЕ час накопичення сигналів буде залежати від відстані між місцем пошкодження і прийомопередавачем;

2) час накопичення сигналів обмежується тривалістю 2–4-х імпульсів впливу ПП на ґрунт, в якому прокладено волоконно-оптичний датчик.

Оцінимо статистичну обробку даних за часом накопичення сигналів зворотного розсіяння. Для отримання N_{min} необхідне виконання умови:

$$T_p \leq \tau_g, \quad (5)$$

де T_p – час накопичення сигналів зворотного розсіяння,

τ_g – тривалість впливу ПП на ґрунт.

Тривалість впливу ПП визначається емпіричною формулою [1]:

$$\tau_g = \frac{0,4}{\sqrt{V_n}}, \quad (6)$$

де V_n – швидкість пересування ПП.

Із формули (6) випливає, що загальна тривалість дії ПП на волоконний світловод складає 0,2–1,0 с. Відповідно, протягом цього часу має здійснюватися накопичення сигналів. Нехай протяжність ЧЕ становить 20 км, тоді згідно з даними табл. 1 умова (5) не виконується. Вона може бути виконана за рахунок зменшення L_m , що обмежує топологію. Технічним рішенням такого завдання є забезпечення випромінювання зондуючих імпульсів до моменту їх прийому, тобто випромінювання пакета імпульсів, загальна кількість яких є постійною. Нехай випромінювання пакетів імпульсів здійснюється протягом часу $T_p \leq \tau_g$ з періодом T_n , рис. 2. Згідно з даними рис. 2 мінімальна кількість імпульсів N_{min} буде визначатися:

$$N_{min} = NN_i, \quad (7)$$

де N_i – кількість імпульсів у пакеті, N – кількість пакетів імпульсів.

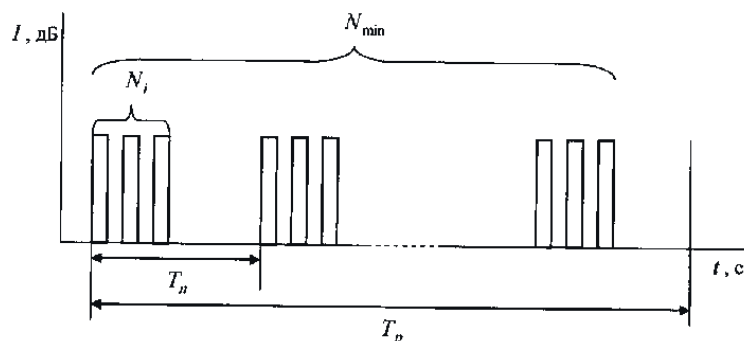


Рис. 2. Часова діаграма випромінювання пакетів імпульсів: T_p – час накопичення сигналів зворотного розсіяння; T_n – період випромінювання пакетів імпульсів; N_{min} – мінімальна кількість імпульсів, при якій досягається необхідна сигналізаційна надійність виявлення; N_i – кількість імпульсів у пакеті; t – поточний час; I – інтенсивність оптичного сигнала

Тоді із урахуванням умови (7), кількість імпульсів у пакеті визначатиметься за виразом:

$$N_i = \frac{N_{min}}{N}, \quad \begin{cases} N_i = 1, & N_{min} \leq N; \\ N_i = \left\lceil \frac{N_{min}}{N} \right\rceil, & N_{min} > N, \end{cases} \quad (8)$$

де $\lceil \cdot \rceil$ – знак округлення до більшого значення.

Допустимо, що пакет імпульсів випромінюється лише після прийому відбитого пакета від кінця світловоду, тоді:

$$N = \frac{T_p}{T_n}, \quad (9)$$

де T_n – період випромінювання пакетів імпульсів.

Період випромінювання пакетів імпульсів визначається аналогічно до періоду випромінювання одиночних імпульсів [6]:

$$T_n = L_m \frac{n_1}{c}, \quad (10)$$

де n_1 – показник заломлення серцевини світловоду, c – швидкість розповсюдження світла у вакуумі, L_m – максимальна довжина волоконного світловоду.

Підставимо (10) в (9), отримаємо:

$$N = \frac{T_p c}{L_m n_1}. \quad (11)$$

Із урахуванням (5), (6) кількість пакетів імпульсів буде визначатися:

$$N = \frac{0,4 \cdot c}{n_1 L_m \sqrt{V_n}}, \quad (12)$$

тоді підставимо (12) в (8) і отримаємо:

$$N_i = \frac{N_{min}}{\frac{0,4 \cdot c}{n_1 L_m \sqrt{V_n}}}, \quad (13)$$

із урахуванням (4) остаточно отримаємо:

$$N_i = \frac{q_{min}^2}{10^{0,2(P_{3в} - P_{ш})}} \cdot \frac{n_1 L_m \sqrt{V_n}}{0,4c}, \quad (14)$$

де n_1 – показник заломлення серцевини волоконного світловоду,

c – швидкість розповсюдження світла у вакуумі,

L_m – максимальна довжина волоконного світловоду,

N_i – кількість імпульсів у пакеті,

V_n – швидкість пересування ПП,

$P_{ш}$ – рівень потужності шуму приймача, дБ,

$P_{3в}$ – рівень потужності зворотного розсіяння, дБ,

q_{min} – мінімальне значення відношення сигналу до шуму, при якому досягається необхідна сигналізаційна надійність виявлення.

Формули (12), (14) становлять сутність розробленої моделі статистичної обробки оптичних сигналів при моніторингу рухомих об'єктів ВОЗО, яка кількісно характеризує режим випромінювання пакетів імпульсів, що забезпечує накопичення оптичних сигналів зворотного розсіяння у ВОЗО, функціонування якого характеризується обмеженням у часі процесу накопичення сигналів.

За формулою (14) визначають функціональну вимогу щодо необхідної кількості імпульсів у пакеті, який формується передавачам оптичного сигналу в квазілінійному ВОЗО.

На основі отриманої математичної моделі розроблено функціональну структуру квазілінійного ВОЗО підвищеної сигналізаційної надійності та живучості із забезпеченням накопичення оптичного сигналу при обмеженому часі рефлектометрії.

Використання пакету імпульсів збільшує час визначення сигналу пропорційно кількості імпульсів у пакеті, що породжує нове завдання, пов'язане зі значним збільшенням мінімальної дальності дії рефлектометра:

$$L_{min} = N_i T_i \frac{c}{n_1}, \quad (15)$$

де L_{min} – мінімальна дальність дії рефлектометра,

T_i – період випромінювання імпульсів.

Відомим технічним рішенням такого завдання при проведенні вимірювань у волоконному кабелі є забезпечення додаткової затримки оптичного сигналу у відрізку світловода, який вставляють між рефлектометром і волоконним кабелем. При чому довжина додаткового відрізка світловода відповідає довжині оптичного імпульсу. Тоді для ВОЗО довжина відрізка повинна відповідати довжині пакета імпульсів L_{min} , що при значній дальності дії збільшить її вартість, а також принципово не прийнятне при двобічній рефлектометрії через потребу встановлення з двох сторін світловоду додаткових відрізків, отже, таке рішення є не ефективним. Вирішенням завдання є використання двох приймачів і лінії затримки для одного боку світловоду довжиною, яка відповідає довжині оптичного імпульсу, рис. 3.

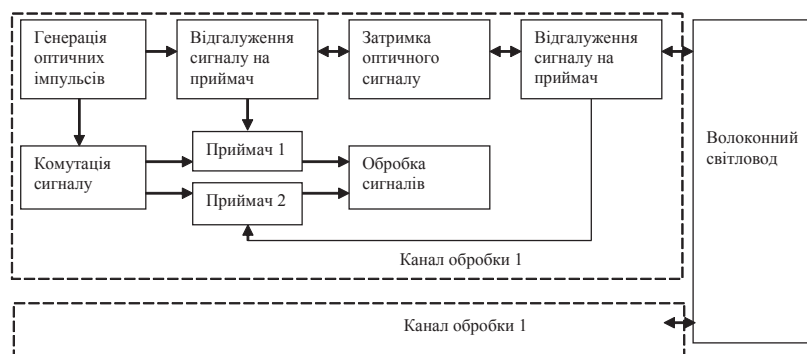


Рис. 3. Функціональна структура квазілінійного ВОЗО підвищеної завадостійкості та живучості із забезпеченням накопичення оптичного сигналу при обмеженому часі рефлектометрії

Новизною структури є те, що вона забезпечує рефлектометрію з нульовою мінімальною дальністю дії за рахунок почергової комутації приймачів, які розділені лінією затримки на основі світловоду довжиною, що відповідає довжині одного зондуєчого імпульса.

Період випромінювання зондуєчих імпульсів у пакеті повинен бути змінним, що унеможливить взаємну кореляцію відбитих імпульсів від неоднорідностей світловоду, тривалість розповсюдження світлового імпульсу між якими випадково співпадає з періодом слідування зондуєчих імпульсів.

Прийняття рішення на подальше накопичення відбитих імпульсів для формування рефлектограми здійснюється після їх кореляційної обробки, аналогічно до обробки сигналів у радіолокації.

Висновки

Отже, в роботі розроблено модель статистичної обробки оптичних сигналів при моніторингу рухомих об'єктів волоконно-оптичним засобом охорони, а також функціональну структуру квазілінійного волоконно-оптичного засобу охорони при обмеженому часі рефлектометрії волоконного світловоду, згідно з якою забезпечується накопичення необхідної кількості реалізації відбитих оптичних імпульсів протягом обмеженого часу впливу ПП, який пересувається по поверхні ґрунту, на ЧЕ, що дозволяє мінімізувати шуми приймача на рівні шумів, які отримують при необмеженому часі рефлектометрії світловоду;

використання у структурі одного каналу обробки сигналів ВОЗО двох приймачів і волоконно-оптичної лінії затримки довжиною, що відповідає довжині одиночного імпульсу, забезпечує нульове значення мінімальної дальності дії засобу і дозволяє здійснювати моніторинг впливу ПП на розподілений ЧЕ по всій його протяжності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Звездинский С. С., Иванов В. А. Средства обнаружения и системы охранной сигнализации: учеб. пособ. для студ. высш. учеб. зав. Москва: МТУСИ, 2008. 260 с.
2. Гришин Ю. П., Ипатов В. П., Казаринов Ю. М. Радиотехнические системы: учеб. для вузов по спец. «Радитехника». Москва: Высш. шк., 1990. 496 с.
3. Фильчаков П. Ф. Справочник по высшей математике. Киев: Наукова думка, 1974. 743 с.
4. Иванов А. Б., Соколов И. В. Современные технологии OTDR. URL: <http://www.Syrus.ru> (дата звернення 19.12.2008).

5. *Савин Е. З.* Волоконно-оптическая линия связи на участке железной дороги. Хабаровск: ДГУПС, 2001. 53 с.

6. *Кауфман М., Сидман А.* Практическое руководство по расчетам схем в электронике: справочник в двух томах: Т. 2. Москва : Энергоатомиздат, 1993. 288 с.

Отримано 04.09.2017

Рецензент Корченко О.Г., д.т.н., проф.