

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-17>

УДК 621.396, 004.056.5

БАЛАНЮК Юрій

Національний авіаційний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3036-5804>

e-mail: [y.balanyuk@nqa.gov.ua](mailto:y.balanyuk@nqa.gov.ua)

## АНАЛІЗ КОЛА ВИТОКУ ОПТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З ПЛАНАРНОГО ОПТОВОЛОКНА

У статті розглядається проблема захисту інформації оптоволоконних систем зв'язку від несанкціонованого доступу. Показано, що наявність фотоприймача поблизу оптоволоконної істотно впливає на процеси в хвилеводі та навколишньому просторі між волокном і апертурою приймача. В статті запропоновано підхід до створення колових моделей планарних оптичних хвилеводів, при чому оптичний хвилевід подається у вигляді відрізка нерегулярної лінії передачі у поперечному напрямку для ТЕ та ТМ мод. Отримані еквівалентні схеми дозволяють аналізувати плоскі оптичні хвилеводи методами теорії електричних кіл, що значно спрощує процес розробки пристроїв інтегральної оптики. На основі рівнянь Максвелла отримано колову схему заміщення планарного оптоволоконної з урахуванням реакції фотоприймача. Показано, що наявність фотоприймача впливає як на розподіл функцій джерела, так і на характер дисперсійних залежностей оптоволоконної. Наведено розрахункові співвідношення визначення поля поблизу апертури приймача при довільному розподілі поля в серцевині оптичного хвилеводу. За допомогою одержаних результатів можна визначати зони виявлення сигналів магістральних оптичних ліній зв'язку.

Ключові слова: оптичний хвилевід, моніторинг безпеки, рівняння Максвелла, схема заміщення

BALANYUK Yuriy

National Aviation University

## PROJECTION OF MICROSTRIP SELECTIVE DEVICES BASED ON IRREGULAR STRUCTURES TO PREVENT INFORMATION LEAKAGE IN HIGH POWER LINES

Protection of speech information is an urgent problem of modern society, which is related to the importance of information that functions in commercial and government institutions during confidential negotiations. With the advent of new information transmission technologies, such as fiber optic technologies, new threats to information security appear. Modern fiber-optic communication channels are widely used in various information transmission systems, from main and regional communication lines to local networks, structured cable systems, video transmission in video surveillance systems, cable television systems.

The article deals with the problem of protecting information of optical fiber communication systems from unauthorized access. It is shown that the presence of a photoreceiver near an optical fiber significantly affects the processes in the waveguide and the surrounding space between the fiber and the aperture of the receiver. The article proposes an approach to creating circular models of planar optical waveguides, in which the optical waveguide is presented in the form of a segment of an irregular transmission line in the transverse direction for TE and TM modes. The obtained equivalent circuits allow the analysis of planar optical waveguides by the methods of the theory of electric circuits, which greatly simplifies the process of developing integrated optics devices. On the basis of Maxwell's equations, a circular planar optical fiber replacement scheme was obtained, taking into account the response of the photoreceiver. It is shown that the presence of a photodetector affects both the distribution of the source functions and the nature of the dispersion dependence of the optical fiber. Calculated ratios for determining the field near the receiver aperture with arbitrary distribution of the field in the core of the optical waveguide are presented. With the help of the obtained results, it is possible to determine the signal detection zones of main optical communication lines.

Key words: optical waveguide, security monitoring, Maxwell's equations, substitution scheme

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Захист мовленнєвої інформації є актуальною проблемою сучасного суспільства, яка пов'язана з важливістю інформації, яка функціонує в комерційних та державних установах під час конфіденційних переговорів. З появою нових технологій передачі інформації, таких як волоконно-оптичні технології, з'являються нові загрози інформаційній безпеці. Сучасні волоконно-оптичні канали зв'язку широко використовуються в різноманітних системах передачі інформації від магістральних і регіональних ліній зв'язку до локальних мереж, структурованих кабельних систем, передачі відео в системах відеоспостереження, системах кабельного телебачення і т.д. У зв'язку з цим виникають небезпеки формування нових каналів витоку інформації, яким раніше не приділялося належної уваги.

На даний час існує багато методів і технічних рішень захисту голосової інформації від витоку побічних електромагнітних випромінювань і перешкод, віброакустичних і акустичних каналів. Крім того, дослідження нового типу каналу інформації – акустооптичного волокна – може створити серйозні проблеми для систем захисту, що пов'язано з широким розповсюдженням нових технологій передачі інформації на основі волоконно-оптичних кабелів. Акустичний (вербальний) канал витоку інформації визначається шляхом моніторингу оптичних випромінювань у звичайному волоконно-оптичному зв'язку. Для служб безпеки поява будь-якого аномального світлового випромінювання або поява модуляції на акустичних

частотах звичайних світлових потоків є індикатором потенційної загрози вербального витоку інформації та необхідності застосування дій для його нейтралізації. Всі методи нейтралізації нового каналу витоку можна розділити на пасивні (наприклад, звукоізоляція оптоволоконного каналу зв'язку) і активні методи (різні способи фільтрації, шуму). Ефективність будь-якого захисту залежить від виявлення загроз інформаційній безпеці.

### Аналіз досліджень та публікацій

В даний час у зв'язку з інтенсивним розвитком волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) істотно зросла цікавість до питань захисту інформації, що передається оптоволоконно. Сьогодні для аналізу каналів витоку інформації використовується класична модель діелектричного хвилеводу [1-3]. Аналіз робіт з волоконної оптики та методів захисту інформації [4-5] свідчить про те, що основними причинами витоку інформації в оптичному діапазоні є місця введення світла у хвилевід (стики), внаслідок чого в оптоволокну виникають моди випромінювання. Випромінювання світла в місцях стику викликане розбіжністю геометричних (профіль поперечного перерізу) і розподілених параметрів (діелектрична та магнітна проникність) волокон, що з'єднуються. Моди випромінювання є незатухаючими в поперечному перерізі або слабозатухаючими коливаннями, які існують поза волокном. Моди випромінювання, як і направлені моди є рішеннями рівнянь Максвелла, що мають неперервний спектр власних частот [6].

За наявності фотоприймача поблизу оптоволоконна процеси в хвилеводі та навколишньому просторі між волокном і апертурою приймача можуть істотно відрізнитися від процесів у хвилеводі без приймача. Тобто розподіл поля між кордоном оптоволоконна та екраном може сильно відрізнитися від розподілу поля діелектричного хвилеводу. Більше того, за наявності фотоприймача хвилевідна мода (направлена мода) може перейти в моду випромінювання. Така ситуація виникне у разі, коли поверхневий опір буде дійсною або комплексною величиною [7]. Виникає завдання визначення напруги на навантаженні  $U_{sf}$  при заданому збудженні  $U_0(x_l)$ . Знаючи її та чутливість фотоприймача, можна визначити необхідну відстань, з якої можливе знімання оптичного випромінювання.

Метою статті є отримання колової моделі оптоволоконна з урахуванням наявності фотоприймача, що здійснює несанкціоноване знімання оптичного випромінювання. Маючи коло витоку оптичного коливання, можна виявити можливі шляхи несанкціонованого доступу до інформації.

### Основний матеріал

Насьогодні у зв'язку з бурхливим розвитком оптичних систем передачі багато уваги приділяється протидії її несанкціонованому доступу [5, 8-9]. Фізична модель передачі та отримання інформації, закладеної в оптичному коливанні планарного оптоволоконна, зображена на рис. 1. На сьогоднішній день отримані загальні теоретичні результати поширення хвиль у шаруватих середовищах [10], які не дають можливість проаналізувати волоконно-оптичну систему рис. 1 з погляду несанкціонованого отримання інформації, що не дозволяє обґрунтовано підійти до розробки комплексу протидіючих заходів.

Процеси в оптоволокну рис. 1, діелектрична та магнітна проникність  $(\epsilon(x), \mu(x))$  якого в загальному випадку залежать від поперечної координати  $x$  описуються рівняннями Максвелла в комплексній формі:

$$\text{rot}\vec{H} = j\omega\epsilon\vec{E}, \text{rot}\vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (1)$$

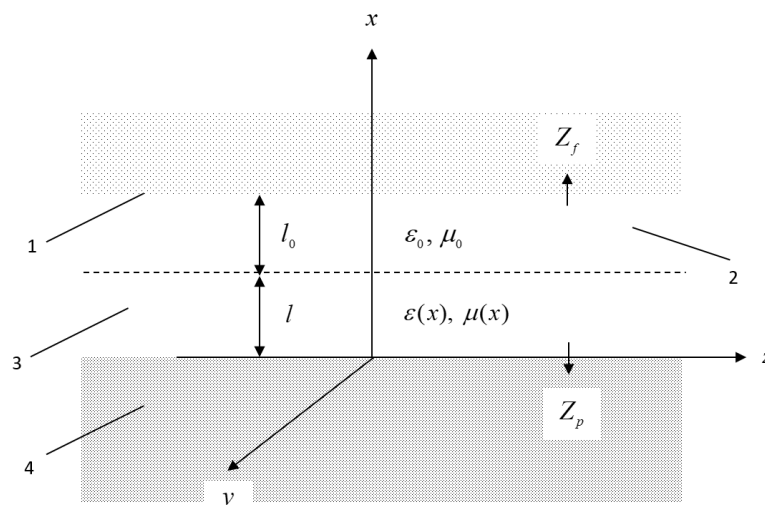


Рис. 1. Фізична модель знімання енергії з оптоволоконна: 1 – апертура приймача оптичного випромінювання; 2 – вільний простір; 3 – планарне оптоволоконно; 4 – підкладка оптоволоконна

Вважаємо, що по осі  $y$  хвилевід простягається до нескінченності та його параметри у цьому напрямку не змінюються, тобто,  $\partial/\partial y = 0$ . Ґрунтуючись на рівняннях (1), можна показати [6], що в цьому випадку рішення рівнянь Максвелла можна представити у вигляді двох типів хвиль: ТЕ хвиль (мод) та ТМ хвиль. Для ТЕ хвиль існують лише складові поля  $E_y, H_z, H_x$ , а для ТМ хвиль – складові  $E_z, E_x, H_y$ . Аналіз рівнянь (1) показав, що при цьому для ТЕ і ТМ хвиль вздовж поперечного напрямку оптоволокна (вісь  $x$ ) справедливі схеми заміщення (рис. 2, 3) у вигляді відрізків довгих ліній з хвильовими опорами  $Z_{wTE}, Z_{wTM}$  ( $\beta$  – стала поширення):

$$Z_{wTE} = \frac{\omega\mu(x)}{\sqrt{k^2(x)-\beta^2}}, \quad k(x) = \omega\sqrt{\varepsilon(x)\mu(x)}, \quad Z_{wTM} = \frac{\sqrt{k^2(x)-\beta^2}}{\omega\varepsilon(x)} \quad (2)$$

З виразу (2) випливає, що для ТЕ мод хвильовий опір носить індуктивний характер, а для ТМ мод – емнісний характер. Поточний час затримки для обох типів хвиль однаковий:

$$\tau_\beta = \frac{1}{\omega} \int_0^x \sqrt{k^2(x) - \beta^2} dx. \quad (3)$$

Припустимо, що електромагнітні коливання у діелектричній структурі рис. 1 відсутні, тобто структура є пасивною. Тоді відповідно до рис. 2, 3 отримаємо схему заміщення структури рис. 1 (рис. 4), де  $Z_{w3}(x), Z_{w2}$  – хвильові опори оптоволокна та вільного простору відповідно. Хвильові опори розраховуються за формулами (2) залежно від випадку, який розглядається (ТЕ або ТМ моди). Імпеданси  $Z_f, Z_p$  є поверхневими опорами (залежно від випадку ТЕ або ТМ мод) підкладки оптоволокна і апертури фотоприймача відповідно (рис.1).

Тепер припустимо, що в перерізі  $x = x_1, 0 < x_1 < l$  підключене джерело струму  $I_0(x_1)$ . При ТЕ модах  $I_0(x_1) = H_z(x_1)$ . При ТМ модах  $I_0(x_1) = H_y(x_1)$ . Тоді колова модель структури рис. 1 матиме вигляд як на рис. 4 із включеним джерелом  $I_0(x_1)$ . При підключенні джерела напруги  $U_0(x_1)$  коло збудження матиме вигляд рис. 5.

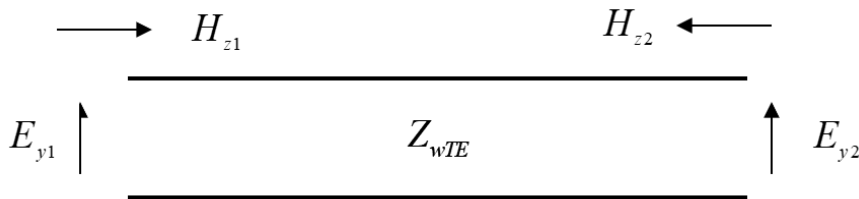


Рис. 2. Схема заміщення планарного оптичного хвилеводу вздовж осі  $x$  для ТЕ мод

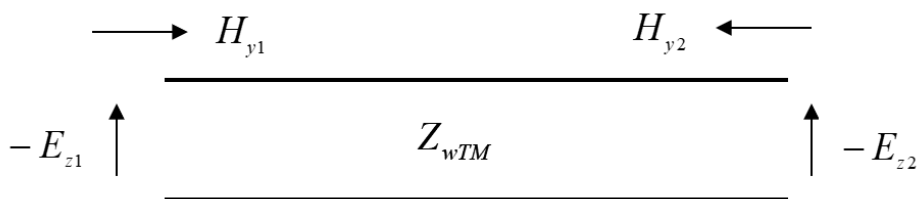


Рис. 3. Схема заміщення планарного оптичного хвилеводу вздовж осі  $x$  для ТМ мод

Із колових схем рис. 4, 5 завжди можна знайти напругу на вході апертури фотоприймача (на навантаженні  $Z_f$ ). Позначимо цю напругу через  $U_f$ . Очевидно, що кожному значенню  $x_1$  буде відповідати своє значення  $U_f = U_f(x_1)$ . Звідси випливає, що при відомому полі в оптоволокні  $I_0(x_1)$  або  $U_0(x_1)$  при  $0 < x_1 < l$ , відповідно до принципу суперпозиції, напруженість поля біля апертури фотоприймача дорівнюватиме:

$$U_{sf} = \int_0^l U_f(x_1) dx_1. \quad (4)$$

З формули (4), знаючи чутливість фотоприймача, можна визначити, чи існує витік інформації з оптоволокна чи ні. Зі схем рис. 4, 5 випливає, що напруженість поля  $U_{sf}$  залежить від відстані до

фотоприймача  $l_0$  та імпедансу  $Z_f$ . Отже, якщо вибором імпедансу  $Z_f$  забезпечити узгодження фотоприймача з оптоволоконном, то знімання енергії можна здійснити з більшої відстані  $l_0$ .

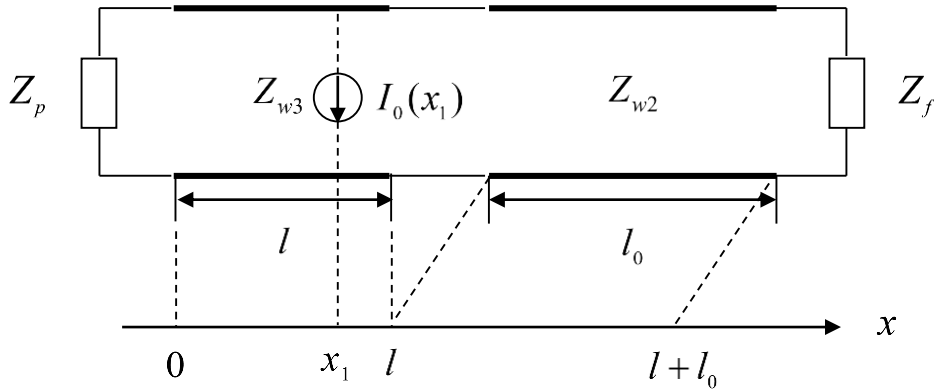


Рис. 4. Коло збудження із включеним джерелом струму  $I_0(x_1)$

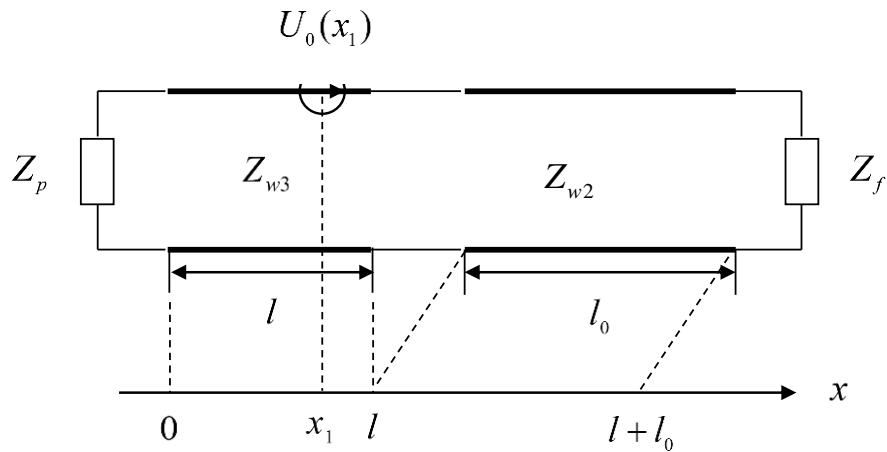


Рис. 5. Коло збудження джерелом напруги  $U_0(x_1)$

Як приклад здійснимо розрахунок параметрів кола знімання енергії з симетричного оптоволоконна з постійними розподіленими параметрами  $\epsilon_2, \mu_0$  (рис. 6). Для визначеності як коло заміщення візьмемо коло рис. 5.

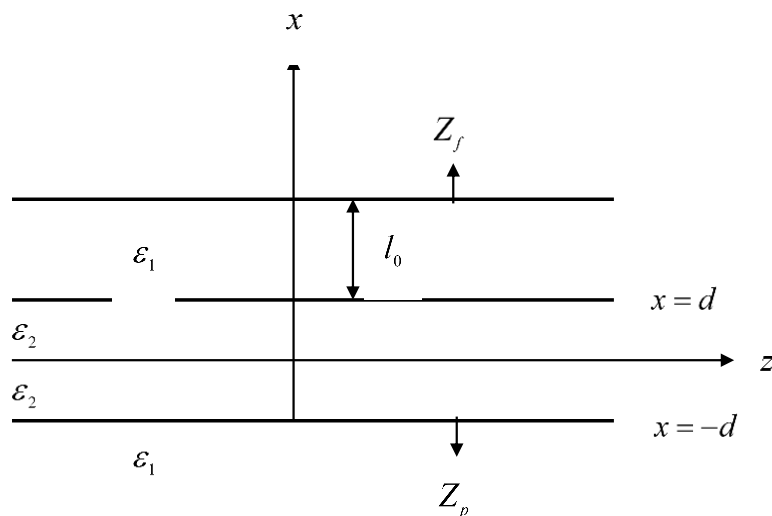


Рис. 6. Симетричний плоский хвилевід

Тоді для ТЕ мод отримаємо:

$$Z_{w3} = \frac{\omega\mu_0}{\sqrt{k_2^2 - \beta^2}}, \quad k_2 = \omega\sqrt{\varepsilon_2\mu_0} \quad (5)$$

$$Z_{w2} = \frac{\omega\mu_0}{\sqrt{k_1^2 - \beta^2}}, \quad k_1 = \omega\sqrt{\varepsilon_1\mu_0} \quad (6)$$

Довжина лінії  $l = 2d$ . Імпеданс  $Z_p = Z_{w2}$ . Час затримки лінії довжиною  $l = 2d$  визначається формулою (3):

$$t_{\beta 3} = \frac{1}{\omega} \int_0^l \sqrt{k_2^2 - \beta^2} dx = \frac{l}{\omega} \sqrt{k_2^2 - \beta^2} \quad (7)$$

Аналогічно визначається час затримки лінії довжиною  $x_1$ : треба у формулі (7) замінити  $l$  на  $x_1$ . Під час розгляду лінії з хвильовим опором  $Z_{w2}$  (рис.5) час затримки:

$$t_{\beta 2} = \frac{1}{\omega} \int_0^{l_0} \sqrt{k_1^2 - \beta^2} dx = \frac{l_0}{\omega} \sqrt{k_1^2 - \beta^2} \quad (8)$$

При поширенні ТМ мод вирази для часу затримки залишаються попередніми, а хвильові опори відповідно рівні:

$$Z_{w3} = \frac{\sqrt{k_2^2 - \beta^2}}{\omega\varepsilon_2}, \quad Z_{w2} = \frac{\sqrt{k_1^2 - \beta^2}}{\omega\varepsilon_1} \quad (9)$$

Аналіз виразу (4) показує, що для визначення функції  $U_{sf}$  планарного оптоволокна необхідно знати функцію розподілу джерел  $U_0(x_1)$  та сталу розповсюдження  $\beta$ . Для визначеності розглянемо нижчу ТЕ моду (частота відсікання дорівнює нулю) за умови її поширення далеко від режиму відсікання. Крім того, вважаємо, що апертура фотоприймача слабо впливає на розподіл поля в оптоволокну (у разі сильного впливу розподіл поля буде сильно порушено і факт несанкціонованого знімання інформації буде виявлено). Стала поширення  $\beta$  визначається відповідно до [6]. Як джерело напруги може бути використаний розподіл електричного поля в оптоволокну [6]. Наприклад, для парних мод стала поширення:

$$\beta = \sqrt{k_0^2 n_2^2 - h^2} = \sqrt{k_0^2 n_1^2 + p^2}, \quad (10)$$

де  $k_0 = \omega\sqrt{\mu\varepsilon_0}$ ;  $n_i = \sqrt{\varepsilon_i/\varepsilon_0}$ , ( $i = 1, 2$ ) – показник заломлення. Постійні додатні числа  $p, h$  повинні задовольняти систему рівнянь:

$$pd = hdtg(hd), \quad (pd)^2 + (hd)^2 = (n_2^2 - n_1^2)k_0^2 d^2. \quad (11)$$

При цьому розподіл поля  $U_0(x_1) = B\cos(hx_1)$ ,  $|x_1| \leq d$ . Величина  $B$  є деякою константою. Слід мати на увазі, що оскільки електромагнітне поле однозначно визначається дотичною складовою електричного або магнітного поля, при розрахунку полів оптоволокна слід користуватися однією зі схем рис. 4, 5.

#### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В статті запропоновано підхід до створення колових моделей планарних оптичних хвильоводів. Встановлено, що для ТЕ та ТМ мод у поперечному напрямку оптичний хвильовід можна подати у вигляді відрізка нерегулярної лінії передачі. Отримані еквівалентні схеми дозволяють аналізувати плоскі оптичні хвильоводи методами теорії електричних кіл, що значно спрощує процес розробки пристроїв інтегральної оптики.

Отримано колову схему заміщення планарного оптоволокна з урахуванням реакції фотоприймача. Показано, що наявність фотоприймача впливає як на розподіл функцій джерела, так і на характер дисперсійних залежностей оптоволокна. Наведено розрахункові співвідношення визначення поля поблизу апертури приймача при довільному розподілі поля в серцевині оптичного хвильоводу. За допомогою одержаних результатів можна визначати зони виявлення сигналів магістральних оптичних ліній зв'язку. Подальші дослідження в цьому напрямку відкриють можливості за заданою чутливістю фотоприймача і

перенесеній по волокну потужності визначити місце розташування приймача для реєстрації оптичного випромінювання.

### Література

1. Lyubchenko D., Tretyakov S., Dudorov S. Dielectric waveguides: classical methods for propagation constant calculations. *Millimeter-Wave Waveguides*. Springer, Boston, MA. 2004. pp.79-101. [https://doi.org/10.1007/0-306-48724-1\\_6](https://doi.org/10.1007/0-306-48724-1_6)
2. Pérez-Ocón, Francisco & Peña-García, Antonio & Jiménez, J & Díaz, José. A simple model for fibre optics: Planar dielectric waveguides in rotation. *European Journal of Physics*. 27(3): 657. 2006. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/27/3/018>
3. Taylor, JR. Theory of dielectric optical waveguides. 2nd edition. *Journal of Modern Optics*, 39 (4), 901. 1992.
4. Filippov, M.V. Chychvarin, N.V. Method of information security monitoring of fiber optic link. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2014. 10.18698/2308-6033-2014-8-1327.
5. Fok M.P, Wang Z., Deng Y., Prucnal P.R. Optical Layer Security in Fiber-Optic Networks. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* , vol. 6, № 3, pp. 725-736, 2011. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2011.2141990>
6. Kirsch A., Hettlich F. The Mathematical Theory of Maxwell's Equations. Department of Mathematics Karlsruhe Institute of Technology (KIT) Karlsruhe, Germany May 24, 2014. 297p.
7. Dariescu C., Dariescu M-A. The Axially Symmetric -Modes of Maxwell Radiation in Milne Spacetime. *Astroparticle Physics*, 2009, 31 (1), 46. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2008.11.006hal-00580089>
8. Yurchenko A., Mekhtiyev A. Shaigarayeva T., Alkina A., Neshina, Y. Comparing methods of controlling unauthorized access to fiber-optic transmission lines. *Journal of Physics: Conference Series*. 1327. 012026. 2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1327/1/012026>.
9. Bernard B., Narimanov E. A method for secure communications over a public fiber-optical network. *Opt. Express* 14, 3738-3751 (2006) <https://doi.org/10.1364/OE.14.003738>
10. Thompson R.C. Optical Waves in Layered Media, *Journal of Modern Optics*, 37:1, 147-148, 1990. <https://doi.org/10.1080/09500349014550171>

### References

1. Lyubchenko D., Tretyakov S., Dudorov S. Dielectric waveguides: classical methods for propagation constant calculations. *Millimeter-Wave Waveguides*. Springer, Boston, MA. 2004. pp.79-101. [https://doi.org/10.1007/0-306-48724-1\\_6](https://doi.org/10.1007/0-306-48724-1_6)
2. Pérez-Ocón, Francisco & Peña-García, Antonio & Jiménez, J & Díaz, José. A simple model for fibre optics: Planar dielectric waveguides in rotation. *European Journal of Physics*. 27(3): 657. 2006. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/27/3/018>
3. Taylor, JR. Theory of dielectric optical waveguides. 2nd edition. *Journal of Modern Optics*, 39 (4), 901. 1992.
4. Filippov, M.V. Chychvarin, N.V. Method of information security monitoring of fiber optic link. *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2014. 10.18698/2308-6033-2014-8-1327.
5. Fok M.P, Wang Z., Deng Y., Prucnal P.R. Optical Layer Security in Fiber-Optic Networks. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security* , vol. 6, № 3, pp. 725-736, 2011. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2011.2141990>
6. Kirsch A., Hettlich F. The Mathematical Theory of Maxwell's Equations. Department of Mathematics Karlsruhe Institute of Technology (KIT) Karlsruhe, Germany May 24, 2014. 297p.
7. Dariescu C., Dariescu M-A. The Axially Symmetric -Modes of Maxwell Radiation in Milne Spacetime. *Astroparticle Physics*, 2009, 31 (1), 46. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2008.11.006hal-00580089>
8. Yurchenko A., Mekhtiyev A. Shaigarayeva T., Alkina A., Neshina, Y. Comparing methods of controlling unauthorized access to fiber-optic transmission lines. *Journal of Physics: Conference Series*. 1327. 012026. 2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1327/1/012026>.
9. Bernard B., Narimanov E. A method for secure communications over a public fiber-optical network. *Opt. Express* 14, 3738-3751 (2006) <https://doi.org/10.1364/OE.14.003738>
10. Thompson R.C. Optical Waves in Layered Media, *Journal of Modern Optics*, 37:1, 147-148, 1990. <https://doi.org/10.1080/09500349014550171>