

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ЕКОНОМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТУ

Кафедра телекомунікаційних технологій та автоматики

О.А. Герцій, Н.І. Кокряцька

Пристрої та елементи волоконно-оптичних систем передачі

Методичні рекомендації
щодо виконання практичних занять
та організації самостійної роботи

Для студентів безвідривної форми навчання
спеціальності 6.050202 «Автоматика та автоматизація на транспорті»

Київ – 2013

УДК 681.322

Герцій О. А., Кокряцька Н. І.

Пристрої та елементи волоконно-оптичних систем передачі:
Методичні рекомендації щодо виконання практичних занять та організації самостійної роботи для студентів спеціальності 6.050202 «Автоматика та автоматизація на транспорті» заочної форми навчання. – К.: Редакційно-видавничий центр ДЕТУТ, 2013. – 22 с.

Методичні вказівки містять завдання до практичних занять та рекомендації щодо їх виконання. Також даються загальні рекомендації щодо організації самостійної роботи з дисципліни, у тому числі щодо виконання теоретичних і практичних завдань самостійної роботи. Наводиться система поточного та підсумкового контролю знань студентів; список рекомендованої літератури.

Призначені для студентів спеціальності 6.050202 «Автоматика та автоматизація на транспорті» безвідривної форми навчання і відповідають програмі курсу “Пристрої та елементи волоконно-оптичних систем передачі”.

Методичні рекомендації розглянуті та затверджені на засіданні кафедри (протокол № 5 від 10 січня 2011 р.) та на засіданні методичної ради факультету (протокол № 7 від 23 лютого 2011 р.).

Укладач *О.А. Герцій*, канд. техн. наук, доцент каф. ТТА
Н.І. Кокряцька, канд. техн. наук, доцент каф. ТТА

Рецензенти: *Л.П. Пасічник*, канд. техн. наук, доцент каф. ТТА, ДЕТУТ;
Р.В. Селезньова, канд. техн. наук, доцент каф. медичної фізики, апаратури та інформатики Вінницького національного медичного університету

ЗМІСТ

<i>Вступ</i>	4
<i>Частина I. Завдання до практичного заняття</i>	5
Спекл-інтерферометрія у волоконно-оптичних датчиках	5
<i>Частина II. Завдання на самостійну роботу</i>	12
Тема 1. Розрахунок параметрів оптичних волокон	12
Тема2: Розрахунок багатомодового волокна	15
Тема 3: Дисперсія та смуга пропускання оптичного волокна	18
<i>Список літератури</i>	21

Вступ

Методичні рекомендації щодо виконання практичної роботи та організації самостійної роботи студентів з дисципліни «Пристрої та елементи волоконно-оптичних систем передачі» розроблені відповідно до навчальної та робочої програми дисципліни і призначені для студентів спеціальності 7.050202 «Автоматика та автоматизація на транспорті» безвідривної форми навчання.

Вивчення дисципліни «Пристрої та елементи волоконно-оптичних систем передачі» передбачає засвоєння навчального матеріалу під час аудиторних занять, а також у формі самостійної та індивідуальної навчально-дослідної роботи (контрольної роботи), призначеної формувати практичні навички роботи студентів із спеціальною літературою, орієнтувати їх на інтенсивну роботу, критичне осмислення набутих знань та глибоке вивчення теоретичних і практичних проблем, з якими пов'язана діяльність інженера з автоматики та автоматизації на залізничному транспорті.

Самостійна робота над засвоєнням навчального матеріалу з дисципліни може виконуватися у бібліотеці, навчальних кабінетах та лабораторіях, у домашніх умовах. Згідно з навчальним планом дисципліни «Пристрої та елементи волоконно-оптичних систем передачі» на самостійну роботу студентів заочної форми навчання відведено 96 години, з них 48 – на виконання завдання контрольної роботи. Раціональна організація самостійної роботи вимагає від студента вміння розподілу свого часу між аудиторною та позааудиторною роботою. Виконання завдань із самостійної та індивідуальної роботи є обов'язковим для кожного студента.

Методичні рекомендації щодо виконання практичної роботи та організації самостійної роботи студентів містять: завдання на практичну роботу та рекомендації щодо їх виконання. Також даються загальні рекомендації щодо організації самостійної роботи з дисципліни, у тому числі щодо виконання теоретичних завдань контрольної роботи. Наводиться система поточного та підсумкового контролю знань студентів; список рекомендованої літератури.

Частина I. Завдання на практичне заняття

Спекл-інтерферометрія у волоконно-оптичних датчиках

Мета: Ознайомитись з принципами волоконної спекл-інтерферометрії

Загальні теоретичні відомості та розрахункові співвідношення

Якщо будь який предмет освітити лазером, то спостерігач буде уявляти, що поверхня предмета покрита частими дрібними плямами. Потрібно тільки, щоб поверхня була дифузною, як наприклад, поверхня аркуша паперу, бетонної стіни або не зовсім добре відполірованої металевої пластинки. Усі точки такої поверхні, яка освітлюється лазером, відбивають на сітчатку ока спостерігача когерентні хвилі, здатні інтерферувати. Зображення кожної точки поверхні на сітчатці являє собою дифракційну картину, яка визначається оптичною системою ока. Через інтерференцію цих дифракційних картин освітлена поверхня предмета, уявляється спостерічу плямистою або, як прийнято називати, покритою «спеклами» (англ. speckles). У подальшому ми будемо застосовувати термін «спекли» («спекл-структура»).

Явище залишається тим самим, якщо ми замінимо око фотоапаратом: після проявлення на фотографічному зображенні будуть спостерігатися спекли, які визначаються апертурою об'єктива. Чим більша апертура, тим тонкіша структура спеклів, оскільки діаметр дифракційної картини, яку створює об'єктив, зменшується зі збільшенням його апертури. Але для того, щоб отримати спекли, зовсім не обов'язково мати зображення об'єкта. Дифузний об'єкт, що освітлюється лазером, створює спекл-структуру у всьому просторі, який його оточує. Достатньо помістити фотопластинку на якій-небудь відстані від об'єкта, і на ній будуть зареєстровані спекли. По аналогії з явищем дифракції можна сказати, що у першому випадку ці спекли Фраунгофера, а у іншому – Френеля.

Якщо зняти голограму об'єкта, то спекли будуть спостерігатися і у відновленому зображенні, що в значному ступені знижує його якість. Тому спеціалісти працювали над тим, як видалити спекли. Але незабаром було помічено, що спекли можна використовувати в нових перспективних методах досліджень. Ці методи досягли такого рівня розвитку, що можна з впевненістю стверджувати про цілком новий спосіб з принципово новими можливостями.

Дослідження змін рельєфу поверхні дифузного об'єкта

Розглянемо відбиваючу поліровану поверхню, яка має відхилення від плоскої. Відомо, що в класичній інтерферометрії відхилення поверхні від плоскої можна спостерігати методом зсуву. При такому методі хвиля, яка відбивається досліджуваною поверхнею, розщиплюється в інтерферометрі на дві когерентні хвилі, які зміщуються в поперечному напрямку одна відносно

іншої. Завдяки інтерференції цих хвиль і спостерігається відхилення поверхні відбиваючого об'єкта від площини. Такий метод непридатний у випадку дифузних об'єктів через відсутність кореляції між двома довільними ділянками однієї і тієї самої спекл-структури. Але його можна використовувати, якщо обмежуватися виявленням змін в орієнтації площини дифузного об'єкта, який підлягає деформаціям.

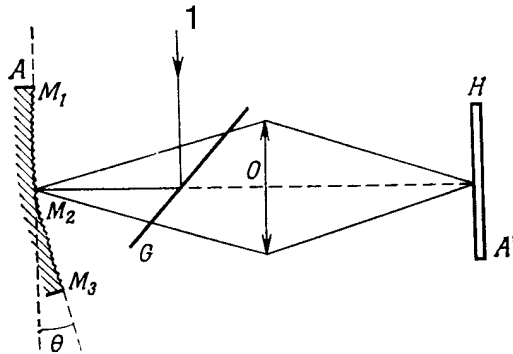


Рис. 1. Визначення змін нахилу поверхні дифузного об'єкта;
I – від лазера

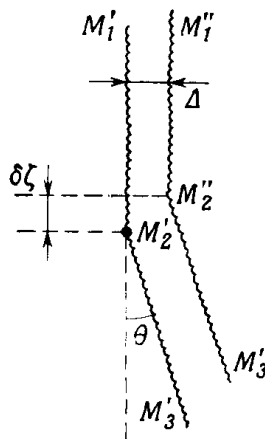


Рис. 2. Вимір різниці ходу в результаті розчеплення зображення в інтерферометрі

Розглянемо дифузний об'єкт А (рис.1). Усреднюючи по мікрорельєфу поверхня даного об'єкту – це дві площини M_1M_2 і M_2M_3 , які утворюють кут θ . Припустимо, що викликана під деякою дією деформація об'єкта – просто зміна кута θ . Об'єкти O створює на фотоплівці H зображення A' об'єкта A . Припустимо, що у схемі інтерферометра, не показаний на рис. 1, отримують два зміщених зображення об'єкта A в площині H . Ці два зображення представлені на рис. 2, де зміщення та відстань між двома хвилями (різниця ходу, яку створює інтерферометр) дуже перебільшені. На ділянці $M'_1M'_2$ різниця ходу між середніми площинами $M'_2M'_3$ та $M''_2M''_3$ дорівнює Δ . Ця різниця ходу флюктує внаслідок шершавості поверхні. На ділянці $M'_2M'_3$ різниця ходу між середніми площинами $M'_2M'_3$ та $M''_2M''_3$ дорівнює $\Delta \pm \theta \delta z$, де δz – величина розщеплення (у випадку, зображеному на рис. 2, потрібно взяти додатний знак). На ділянці зображення $M'_1M'_2$ спостерігається спекл-

структура обумовлена інтерференцією між двома зображеннями $M'1M'2$ та $M''1M''2$ при флуктаційній різниці ходу Δ . На ділянці з нахилом θ , тобто на ділянці $M'2M'3$, спекл-структура, яка спостерігається, виникає як результат інтерференції двох зображень $M'2M'3$ та $M''2M''3$ при флуктуаційній різниці ходу $\Delta + \theta\delta\zeta$.

Зареєструємо на фотоплівці зображення дифузного об'єкта. Припустимо, що перед другою експозицією кут θ з будь-якої причини набув іншого значення θ' , так що його зміна дорівнює $\theta - \theta'$. Зробимо тепер другу експозицію, змістивши попередньо фотоплівку на невелику величину ζ_0 . На ділянці зображення, який відповідає $M'2M'3$, ми отримаємо дві ідентичних спекл-структури, зміщені одна відносно одної на величину ζ_0 . На ділянці зображення, який відповідає $M'2M'3$, внаслідок змін різниці ходу на величину $(\theta - \theta')\delta\zeta$ сумарна спекл-структура не буде більше мати кореляції зі спекл-структурою, зареєстрованою на тій самій ділянці при першій експозиції. Як правило, після проявлення отриманий негатив спостерігаємо у схемі зображень на рис. 3. Щілина, поміщена у фокальній площині об'єктива L , дозволяє видалити інтерференційні смуги, утворені ділянкою $M'1M'2$, який не переміщувався. Але світло від ділянки $M'2M'3$, яка не дає інтерференційних смуг внаслідок декореляції спекл-структур, зареєстрованих за дві експозиції, не екранується. Завдяки цьому у зображенні негатива видно лише ділянки, у яких нахил змінився. Темні області відображають ділянки з постійним нахилом.

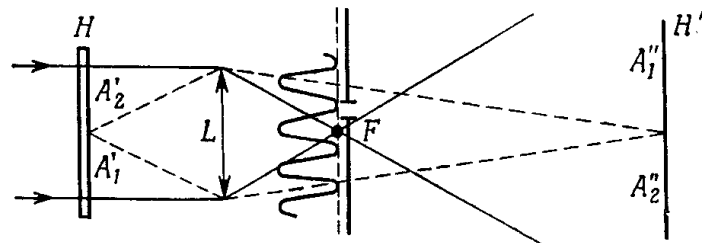


Рис. 3. Просторова схема фільтрації негатива

Для розщеплення зображень на величину $\delta\zeta$, можна використовувати інтерферометр Майкельсона, у якому змінено нахил одного із дзеркал. На схемі, наведеній на рис. 4, дзеркало $M2$, було нахилено на кут α , завдяки чому розщеплення зображення A' та A'' дорівнює $2\alpha d$, де d – відстань від об'єктива O до площини зображення A' .

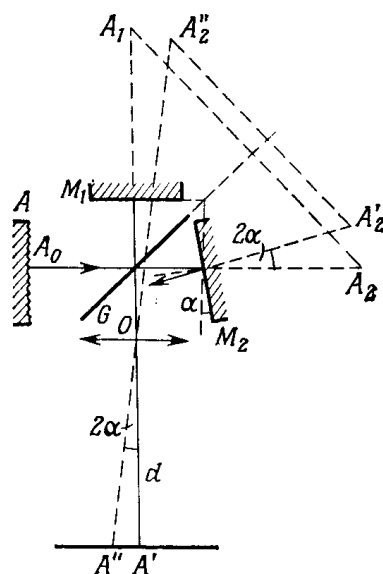


Рис. 4. Схема інтерферометра Майкельсона для розщеплення зображення

Диференційний інтерферометр для прозорих об'єктів, оснований на фотореєстрації спекл-структури за дві експозиції

Схема диференційного інтерферометра показана на рис. 5. Перед прозорим об'єктом А, який досліджується, поміщається матове скло Г, яке освітлюється лазером. Об'єкт О формує зображення А' об'єкта А на фотопластинці Н. У зображенні А' об'єкта А буде спостерігатися спекл-структура, що являє собою зображення спекл-структури, яка створюється розсіювачем Г в площині розташування об'єкта А. Зробимо дві експозиції, трохи змістивши об'єкт в проміжку між експозиціями в напрямку, перпендикулярному його площині. В тій частині об'єкта А, де нахил поверхні об'єкта дорівнює нулю, це зміщення не призведе ні до яких змін ні в структурі, ні у положенні спекл-структури у площині Н. На тих самих ділянках об'єкта, де є нахил α (рис. 6), спекл-структура у площині Н зміститься в поперечному напрямку. Наприклад, на рис. 6 початкове фокусування проводиться на спекл-структуру, що знаходиться в площині, яка проходить через точку М1. Коли прозорий об'єкт зміщується на величину ζ , точка М1 переходить в положення М2, завдяки чому і виникає поперечне зміщення М1М2 спекл-структури. В площині зображення йому відповідає зміщення М'1М'2. Якщо n - показник заломлення матеріалу об'єкта, який досліджується, а α кут нахилу поверхні об'єкта, то поперечне зміщення М1М2 буде дорівнювати $(n-1)\alpha\zeta$. Надавши пластинці Н невелике зміщення між експозиціями в її власній площині, можна спостерігати області з ненульовим нахилом α , якщо помістити для цього отриманий негатив у схему (рис. 3). Просторова фільтрація за допомогою щілини дозволяє видалити у вихідному зображенні об'єкта ділянки, які мають нульовий нахил.

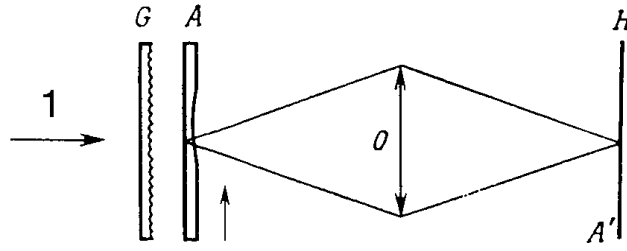


Рис. 5. 1- лазерний промінь

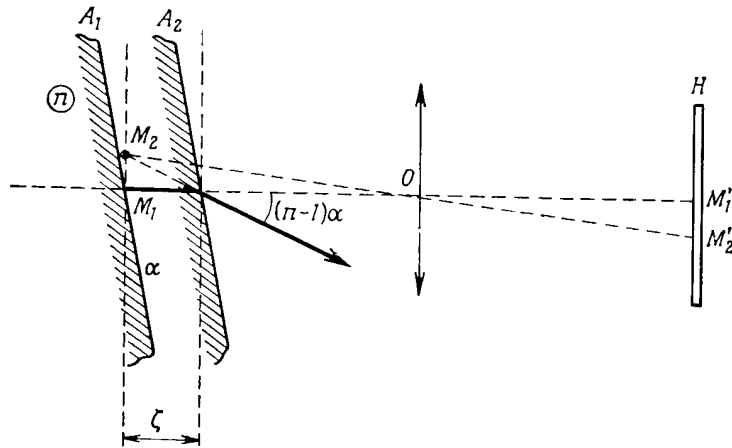


Рис. 6.

Дослідження рельєфу дифузної поверхні методом двох довжин хвиль

Методи, викладені вище, дають можливість спостерігати тільки зміни рельєфу поверхні, але не сам рельєф. Рельєф поверхні можна виявляти, реєструючи спекл-структури в інтерферометрі з лазерним освітленням двох довжин хвиль. Розглянемо інтерферометр, зображений на рис. 7. Нехай на поверхні дифузного об'єкта знаходиться сходинка висотою ε , утворена двома площинами A_1 та A_2 . Об'єкт A освітлюється лазерним випромінюванням з довжиною хвилі λ_1 , а потім з довжиною хвилі λ_2 . Розглянемо зображення об'єкта A , яке створюється об'єктивом O в площині H . Нехай висота сходинки ε мала і зображення $A'1$ та $A'2$ частин об'єкта $A_1 A_2$ досить чіткі. Нехай Δ_1 – різниця ходу між світловою хвилею, розсіяною об'єктом, який досліджується, та когерентним фоном, який створюється тим самим лазером у точці зображення $A'1$. Припустимо, що різниця ходу Δ_1 дорівнює цілій кількості m довжин хвиль λ_1 , тобто $\Delta_1 = m\lambda_1$. Якщо ця різниця ходу Δ_1 дорівнює цілій кількості n довжин хвиль λ_2 ($\Delta_1 = n\lambda_2$), то когерентний фон буде у фазі з спекл-структурою, яка створюється A_1 в площині H , як для довжини хвилі λ_1 , так і для довжини хвилі λ_2 . Дві спекл-структури, які виникають в площині H , будуть практично однакові, якщо різниця довжин хвиль невелика. Тоді, $\Delta_1 = m\lambda_1 = n\lambda_2$. Нехай $p = m - n$, тоді отримаємо:

$$\Delta_1/\lambda_1 = \Delta_1/\lambda_2 + p. \quad (1)$$

Для іншої ділянки об'єкта А, наприклад, А₂, відповідна умова приймає вигляд:

$$\Delta_2/\lambda_1 = \Delta_2/\lambda_2 + p + 1. \quad (2)$$

При цій умові дві спекл-структури, що спостерігаються в площині Н на довжинах хвиль λ_1 та λ_2 , будуть теж ідентичні. Враховуючи, що $\Delta_2 - \Delta_1 = 2\varepsilon$, у відповідності з рівняннями отримуємо:

$$2\varepsilon = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}. \quad (3)$$

Відповідно, кожного разу, коли висота сходинки на поверхні об'єкта А (виміряна від площини А₁) буде дорівнювати цілому кратному значенню ε , за формулою (3), ми будемо отримувати в площині Н дві практично ідентичні спекл-структури.

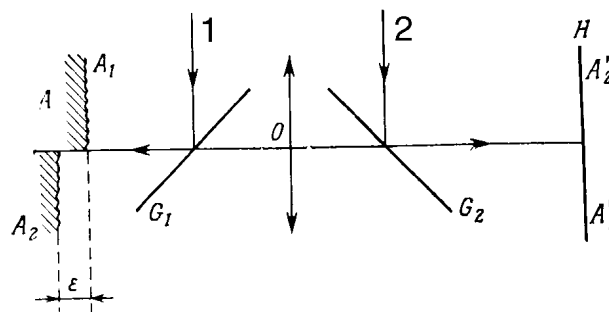


Рис 7. 1 – від лазера; 2 – когерентний фон

Виконаємо на фотопластинці Н дві експозиції: одну в світлі з довжиною хвилі λ_1 , а іншу – в світлі з довжиною хвилі λ_2 , причому в проміжку між експозиціями змістимо фотопластинку на невелику відстань. Виконавши просторову фільтрацію отриманого негатива, ми зможемо видалити в зображенні об'єкта ті його ділянки, глибина яких по відношенню до А₁ задовольняють відношенню (3). На поверхні об'єкта А ми побачимо темні інтерференційні смуги, які обрисують контури цих ділянок.

Виконання роботи

1. Зібрати схему, зображену на рис. 7.
2. За допомогою першого лазера освітити досліджувану поверхню та отримане зображення занести за допомогою матриці ПЗС до ЕОМ.
3. За допомогою 2-го, з довжиною хвилі відмінною від першої, отримати зображення, занести його до ЕОМ.
4. Виконати графічне накладення першого зображення на друге зі зміщенням на невелику відстань одне від одного.

5. За допомогою просторової фільтрації видалити з зображення ділянки, які відповідають співвідношенню (3) по глибині рельєфу.

6. Графічно визначити контури цих ділянок.

Контрольні запитання

1. Що таке когерентність?

2. Які типи когерентності ви знаєте?

3. Що таке інтерференція?

4. Просторова фільтрація.

5. Що таке спекл-структура?

6. Яким чином можна отримати спекл-структуру?

7. Опишіть методику дослідження змін рельєфу поверхні дифузного об'єкта.

8. Опишіть дослідження рельєфу поверхні об'єкта методом двох довжин хвиль.

Список літератури

1. Прикладна оптика. / Под общ. ред. Н.П. Заказнова. – М.: Машиностроение, 1988. – 312с.

2. М. Франсон. Оптика спеклов. – М.: Мир, 1980. – 171 с.

3. Оптика и связь / А. Козанне, Ж. Флере, Г. Мэтр, М. Руссо / Под ред. В.К.Соколова. – М.: Мир, 1984. – 504 с.

4. Иванов А. Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи и измерения. – М.: Сайрус-системз, 1999. – 671 с.

Частина II

ЗАВДАННЯ НА САМОСТІЙНУ РОБОТУ

З кожної теми дисципліни студенти заочної форми навчання готують звіт з виконання завдань самостійної роботи. У звіті наводять стислі відповіді на контрольні запитання відповідної теми та аналітичні розрахунки розв'язання задач. Кожен студент вибирає варіант відповідно до шифру студента.

Тема 1. Розрахунок параметрів оптичних волокон

За вхідними даними оптичного волокна знайти основні характеристики:

- критичної довжини хвилі;
- загальних втрат;
- пропускної спроможності.

Варіанти завдань

<i>№ варіанта</i>	<i>Діаметр сердцевини, мкм</i>	<i>Діаметр оболонки, мкм</i>	<i>Показник заломлення сердцевини</i>	<i>Показник заломлення оболонки</i>	<i>Робоча довжина хвилі, нм</i>	<i>Ширина спектральної лінії лазера, нм</i>	<i>Довжина лінії, км</i>
1	2	3	4	5	6	7	8
1	8	50	1,51	1,5	1500	1	50
2	8,1	60	1,52	1,5	1510	2	60
3	8,2	70	1,53	1,5	1520	3	70
4	8,3	80	1,54	1,5	1530	4	80
5	8,4	90	1,55	1,5	1540	5	90
6	8,5	100	1,56	1,5	1550	6	100
7	8,6	150	1,51	1,5	1560	7	110
8	8,7	200	1,52	1,5	1570	8	120
9	8,8	180	1,53	1,5	1580	1	130
10	8,9	250	1,54	1,5	1590	2	140
11	8,10	400	1,55	1,5	1510	3	150
12	8,11	500	1,56	1,5	1520	4	160

Розрахунок одномодового волокна передбачає набір стандартних обчислень. Наведемо зразок розрахунку одномодового волокна.

Вихідні дані: сердцевина $2a=10$ мкм; оболонка $2b=125$ мкм; показники заломлення: $n_1=1,51$; $n_2=1,5$; довжина хвилі $\lambda=1,55$ мкм; довжина лінії $l=30$ км; ширина спектральної лінії лазера 2 нм.

Розрахунок здійснюється таким способом:

1) відносне значення показників заломлення: $\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1,51 - 1,5}{1,51} \approx 0,007$;

2) числова апертура: $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1,51^2 - 1,5^2} = 0,263$;

3) нормована частота: $\nu = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{1,56 \cdot 10^{-6}} \sqrt{1,51^2 - 1,5^2} = 0,5$;

4) критична частота (для одномодової передачі коефіцієнт $P_{nm}=2,405$):

$$f_0 = \frac{P_{nm}c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{2,405 \cdot 3 \cdot 10^8}{3,14 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \sqrt{1,51^2 - 1,5^2}} = 9,2 \cdot 10^{14} \text{ Гц};$$

5) критична довжина хвилі:

$$\lambda_0 = \frac{\pi d}{P_{nm} n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{3,14 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{2,405 \cdot 1,51} \sqrt{1,51^2 - 1,5^2} = 2,27 \text{ мкм};$$

6) втрати енергії на поглинання:

$$\alpha_{II} = \frac{\pi n_1 \text{tg} \delta}{\lambda} 8,69 \cdot 10^3 = \frac{3,14 \cdot 1,51 \cdot 2 \cdot 10^{-10}}{1,55 \cdot 10^{-6}} 8,69 \cdot 10^3 = 0,53 \text{ дБ/км};$$

7) втрати на розсіяння: $\alpha_p = K_p / \lambda^4 = 1,3 / 1,554 = 0,224 \text{ д/км}$;

8) загальні втрати: $\alpha = \alpha_{II} + \alpha_p = 0,53 + 0,224 = 0,754 \text{ д/км}$;

9) втрати в інфрачервоному діапазоні (при $\lambda=2 \text{ мкм}$):

$$\alpha_{пк} = C_{пк} e^{-k/\lambda} = 0,9 \exp(-(0,8 \cdot 10^{-6}) / (2 \cdot 10^{-6})) = 0,6 \text{ д/км};$$

10) хвилеводна дисперсія: $\tau_{вв} = \Delta \lambda \cdot l \cdot M_{вв}(\lambda) = 2 \cdot 30 \cdot 3 \cdot 10^{-12} = 180 \text{ пс/(км}\cdot\text{нм)}$;

11) матеріальна дисперсія: $\tau_{мат} = \Delta \lambda \cdot l \cdot M_{мат}(\lambda) = 2 \cdot 30 \cdot (-20 \cdot 10^{-12}) = -1200 \text{ пс/(км}\cdot\text{нм)}$;

12) результуюча дисперсія: $\tau_{рез} = \tau_{вв} + \tau_{мат} = 180 - 1200 = -1020 \text{ пс/(км}\cdot\text{нм)}$;

13) пропускна спроможність: $\Delta F = 1/\tau = 1/1020 \cdot 10^{-12} = 980 \text{ МГц}$;

14) межі зміни фазової швидкості: $c/n_1 = 3 \cdot 10^8 / 1,51 = 198 \cdot 10^6 \text{ км/с}$;

$$c/n_2 = 3 \cdot 10^8 / 1,5 = 2 \cdot 10^8 \text{ км/с};$$

15) межі зміни хвильового опору: $Z_0/n_1 = 376,7 / 1,51 = 249,47 \text{ Ом}$;

$$Z_0/n_2 = 376,7 / 1,5 = 251,13 \text{ Ом}.$$

Контрольні запитання

1. Як визначається числова апертура?
2. Як визначається нормована частота?
3. Як визначається критична довжина хвилі?
4. Як визначається хвилеводна дисперсія?
5. Як визначається матеріальна дисперсія?
6. Як визначається пропускна спроможність?

Список літератури

1. Лисенко Г. Л. Волоконна та інтегральна оптика. Ч.1: Навчальний посібник. – Вінниця.: ВДТУ, 1998. – 127 с.
2. Оптика и связь / А. Козанне, Ж. Флере, Г. Мэтр, М. Руссо / Под ред. В.К. Соколова. – М.: Мир, 1984. – 504 с.
3. Иванов А. Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи и измерения. – М.: Сайрус-системз, 1999. – 671 с.
4. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз, 1998. – 267 с.
5. Семенов А.Б. Волоконная оптика в локальных и корпоративных сетях связи. – М.: КомпьютерПресс, 1998. – 302 с.

Тема2. Розрахунок багатомодового волокна

За вхідними даними оптичного волокна знайти основні характеристики:

- критичної довжини хвилі;
- загальних втрат;
- пропускної спроможності.

Варіанти завдань

№ варіанта	Тип функції показника заломлення	Діаметр сердцевини, мкм	Діаметр оболонки, мкм	Показник заломлення сердцевини	Показник заломлення оболонки	Робоча довжина хвилі, нм	Ширина спектральної лінії лазера, нм	Довжина лінії, км
1	східчаста	50	150	1,51	1,5	500	1	50
2	градієнт	50	160	1,52	1,5	1010	2	60
3	східчаста	50	170	1,53	1,5	720	3	70
4	градієнт	50	180	1,54	1,5	1530	4	80
5	градієнт	62,5	190	1,55	1,5	840	5	90
6	східчаста	62,5	100	1,56	1,5	450	6	100
7	градієнт	62,5	150	1,51	1,5	960	7	110
8	східчаста	62,5	200	1,52	1,5	1570	8	120
9	градієнт	100	180	1,53	1,5	1380	1	130
10	східчаста	100	250	1,54	1,5	1090	2	140
11	градієнт	100	400	1,55	1,5	910	3	150
12	східчаста	150	500	1,56	1,5	820	4	160

Розрахунок багатомодового волокна передбачає набір стандартних обчислень. Наведемо зразок розрахунку багатомодового волокна.

Вихідні дані: сердечник $2a=50$ мкм; оболонка $2b=125$ мкм; показник заломлення $n_1=1,53$; $n_2=1,5$; довжина хвилі $\lambda=1,3$ мкм; довжина лінії $l=10$ км, функція показника заломлення – східчаста.

Розрахунок виконують у такому порядку:

1) відносне значення показників заломлення:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1,53 - 1,5}{1,53} \approx 0,02;$$

2) числова апертура:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{1,53^2 - 1,5^2} = 0,3;$$

3) нормована частота:

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{1,3 \cdot 10^{-6}} \sqrt{1,53^2 - 1,5^2} = 36;$$

4) число хвиль (мод):

$$N = v_2/2 = 362/2 = 648;$$

5) критична частота ($P_{mn} = 3,832$):

$$f_0 = \frac{P_{mn} c}{\pi d \sqrt{n_1^2 - n_2^2}} = \frac{3,83 \cdot 3 \cdot 10^8}{3,14 \cdot 50 \cdot 10^{-6} \sqrt{1,53^2 - 1,5^2}} = 2,5 \cdot 10^{12} \text{ Гц};$$

6) критична довжина хвилі:

$$\lambda_0 = \frac{\pi d}{P_{mn} n_1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{3,14 \cdot 50 \cdot 10^{-6}}{3,832 \cdot 1,53} \sqrt{1,53^2 - 1,5^2} = 8 \text{ мкм};$$

7) втрати енергії на поглинання:

$$\alpha_{II} = \frac{\pi n_1 t g \delta}{\lambda} 8,69 \cdot 10^3 = \frac{3,14 \cdot 1,53 \cdot 0,5 \cdot 10^{-10}}{1,3 \cdot 10^{-6}} 8,69 \cdot 10^3 = 1,6 \text{ дБ/км};$$

8) втрати на розсіювання:

$$\alpha_p = K_p / \lambda^4 = 1,5 / 1,34 = 0,52 \text{ д/км};$$

9) загальні втрати:

$$\alpha = \alpha_{II} + \alpha_p = 1,5 + 0,52 = 2,02 \text{ д/км};$$

10) втрати в ІЧ-діапазоні (при $\lambda = 2 \text{ мкм}$):

$$\alpha_{IIK} = C_{IIK} e^{-k/\lambda} = 0,3 \exp \{ -(0,5 \cdot 10^{-6}) / (2 \cdot 10^{-6}) \} = 0,234 \text{ д/км};$$

11) дисперсія :

$$\tau^2 = \tau_{\text{mod}}^2 + (\tau_{\text{mat}} + \tau_w)^2,$$

де τ_{mod} – міжмодова дисперсія;

τ_{mat} – матеріальна дисперсія;

τ_w – хвильова дисперсія.

для східчастого волокна:

$$\tau_{\text{mod step}}(L) \cdot L = \begin{cases} \frac{n_1 \Delta}{c} L, & L < L_c \\ \frac{n_1 \Delta}{c} \sqrt{L \cdot L_c}, & L > L_c \end{cases}$$

для градієнтного волокна:

$$\tau_{\text{mod grad}}(L) \cdot L = \begin{cases} \frac{n_1 \Delta^2}{2c} L, & L < L_c \\ \frac{n_1 \Delta^2}{2c} \sqrt{L \cdot L_c}, & L > L_c \end{cases},$$

де L_c – довжина міжмодового зв'язку, для градієнтного волокна $L_c = 10^4 \text{ м}$, для східчастого волокна $L_c = 5 \text{ км}$.

$$\tau_{\text{mat}}(\Delta\lambda, L) = \Delta\lambda LM(\lambda),$$

де $\Delta\lambda$ – ширина спектра, $M(\lambda)$ – питома матеріальна дисперсія [1].

$$\tau_w = \Delta\lambda LN(\lambda),$$

де $N(\lambda)$ – питома хвильова дисперсія.

$$N(\lambda) = M(\lambda) = 0,5 D.$$

Для повної картини у формулу додаємо значення і поляризаційної дисперсії $(\tau_{\text{pmd}})^2$, але у даному випадку цього робити немає необхідності, через те, що волокно використовується багатомодове.

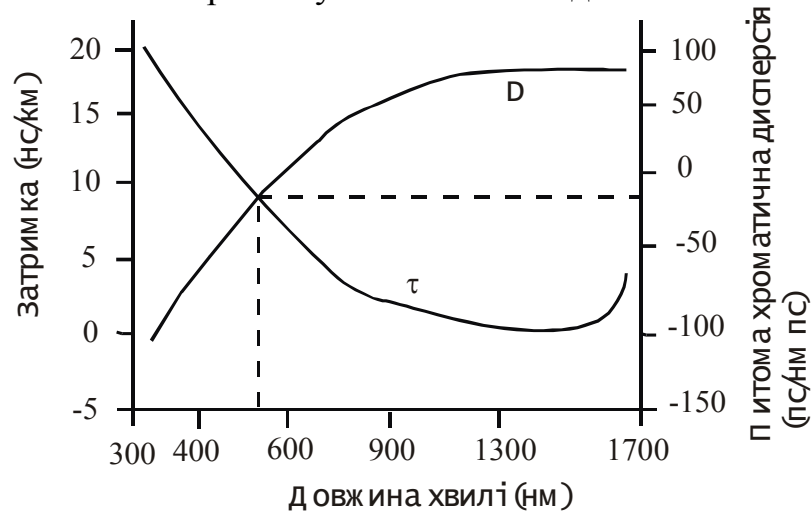


Рис. 8. Криві часової затримки та питомої хроматичної дисперсії

12) смуга пропускання:

$$W = 0,44/\tau.$$

Контрольні запитання

1. Як визначається числова апертура?
2. Як визначається нормована частота?
3. Як визначається критична довжина хвилі?
4. Як визначається хвильоводна дисперсія?
5. Як визначається матеріальна дисперсія?
6. Як визначається пропускна спроможність?

Список літератури

1. Оптика и связь / А. Козанне, Ж. Флере, Г. Мэтр, М. Руссо / Под ред. В.К. Соколова. – М.: Мир, 1984. – 504 с.
2. Иванов А. Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи и измерения. – М.: Сайрус-системз, 1999. – 671 с.
3. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз, 1998. – 267 с.

Тема 3. Дослідження дисперсії та смуги пропускання оптичного волокна

Поширення (дисперсія) імпульсу в ОВ

Звичайно лінії зв'язку працюють у імпульсному режимі, що забезпечує передачу максимального обсягу інформації з мінімальним рівнем шумів.

Поширення імпульсів у світловодах призводить до того, що після проходження деякої відстані сигналом сусідні імпульси починають перекривати один одного – виникає явище дисперсії.

Поширення імпульсу при його розповсюдженні у ОВ є найважливішою характеристикою з точки зору його використання у оптичних системах зв'язку. Чим менша дисперсія імпульсу, тим вище інформаційна пропускна здатність ОВ.

За деяких причин ОВ обмежує смугу пропускання за частотою, тобто швидкість передачі імпульсної інформації. При проходженні короткого імпульсу квазімонохроматичного світла через ОВ він змінюється і у першу чергу поширюється за рахунок таких основних факторів (1-3):

Дисперсії матеріалу ОВ, тобто змінення показника заломлення залежно від довжини хвилі світла, що призводить до різної швидкості розповсюдження монохроматичних складових імпульсу.

Хвильової затримки, тобто залежності швидкості розповсюдження від довжини хвилі світла для кожної напрямної моди (дисперсія моди, внутрішньомодова або модова дисперсія).

Групової затримки, тобто різної швидкості розповсюдження різних напрямних типів коливання однієї частоти (мод) – міжмодова дисперсія.

Дисперсійна залежність матеріалу $n(\lambda)$ визначається поліномом :

$$n = \frac{A}{\lambda^6} + \frac{B}{\lambda^4} + \frac{C}{\lambda^2} + D, \quad (\lambda - \text{у мкм}).$$

де A, B, C – деякі постійні коефіцієнти (для кожного типу матеріалу хвильовода свої).

Поширення імпульсу за рахунок дисперсії матеріалу визначається за формулою:

$$t_{\text{мат}} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \left(\frac{d^2 n_1}{d\lambda^2} \right) L.$$

Поширення імпульсу за рахунок внутрішньомодової дисперсії визначається за допомогою такого виразу:

$$t_B = \frac{n_1 \lambda \Delta\lambda}{c} \left(\frac{\alpha}{\alpha + 1} \right) \left(\frac{\alpha - 2}{\alpha + 2} \right) L,$$

для $\alpha > 2$.

Вищерозглянуті значення для поширення імпульсу у волокні характерні для одномодового оптоволокна. Для багатомодових волокон основною причиною поширення імпульсів у світловоді (для ступеневого ОВ) є міжмодова дисперсія:

$$t_M = \frac{\Delta n}{c} \left(\frac{\alpha - 2}{\alpha + 2} \right) AL,$$

де A – коефіцієнт зменшення міжмодової дисперсії, $A_{\max}=1$.
Для ОВ з ступеневим показником заломлення:

$$t_{MC} = n_1 (\Delta n) \frac{L}{c} \text{ (нс/км)}.$$

Розрахунок матеріальної дисперсії у світловоді

Питома матеріальна дисперсія для ОВ знаходиться за формулою:

$$M = -\frac{1}{c} \frac{dN_1}{d\lambda} = \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_1}{d\lambda^2}.$$

За літературою експериментальну залежність показника заломлення від довжини хвилі (у мкм) можна представити у вигляді дисперсійного рівняння Селмейра:

$$n = \sqrt{1 + \frac{1,69617\lambda^2}{\lambda^2 - 0,0684^2} + \frac{0,4079425\lambda^2}{\lambda^2 - 0,11624^2} + \frac{1,89748\lambda^2}{\lambda^2 - 9,8962^2}},$$

або див. рис. 9.

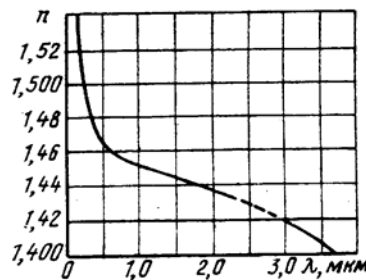


Рис. 9. Залежність показника заломлення матеріалу від довжини хвилі

На рис. 10 зображені залежності дисперсійного параметру та матеріальної дисперсії від довжини хвилі:

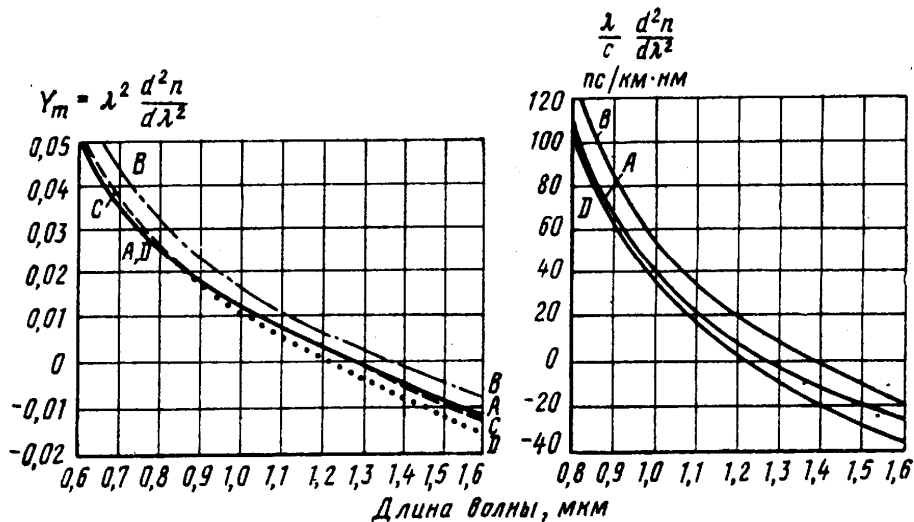


Рис. 10. Залежність дисперсійного параметру та матеріальних дисперсії від довжини хвилі

Розрахунок міжмодової дисперсії

Маємо:

$$\sigma_{\text{між}}^2 = \frac{LN_1\Delta}{2c} \left(\frac{g}{g+1} \right) \left(\frac{g+2}{3g+2} \right)^{1/2} \left[C_1^2 + \frac{4C_1C_2\Delta(g+1)}{2g+1} + \frac{4\Delta^2C_2^2(2g+2)^2}{(5g+2)(3g+2)} \right]^{1/2},$$

для ВС з ступеневим профілем діелектричної проникності з умовою розповсюдження мод з однаковими фазовими та груповими швидкостями, де

$$C_1 = \frac{g-2+q}{g+2}; C_2 = \frac{3g-2-q}{2(g+2)}.$$

Мінімальне значення дисперсії досягається при оптимальному значенні показника ступеня профіля:

$$g_o = 2 + q - \Delta \frac{(4+q)(3+q)}{5+2q}.$$

При оптимальному g_o маємо:

$$\sigma_{\text{між}}(g_o) = N_1 \frac{L}{c} \frac{\Delta^2}{20\sqrt{3}} \approx 0,14\Delta^2 L, \left(\frac{\text{нс}}{\text{км} \cdot \text{нм}} \right).$$

Часова дисперсія

Є відомим вираз для багатомодового ОВ:

$$\frac{c\tau}{l\Delta\omega} = \frac{dN_2}{dw} \left[1 + \Delta \frac{d(Vb)}{dV} \right] + \frac{\Delta N_2^2}{wn_2} \frac{Vd^2(Vb)}{dV^2} + N_2 \frac{d\Delta}{d\omega} \frac{d^2(Vb)}{dV^2}.$$

Контрольні запитання

1. Види дисперсії.
2. Причини виникнення часової дисперсії.
3. Причини виникнення матеріальної дисперсії.
4. Причини виникнення міжмодової дисперсії.
5. Чому внаслідок дисперсії погіршується пропускна здатність оптичної лінії?
6. Які існують ВОЛЗ з компенсацією дисперсії і до чого це призводить?

Список літератури

1. Корнейчук В, И., Лесовой И.П. Волоконно-оптические измерения. – К.: Наукова думка, 1999. – 323 с.
2. Моршнеv С.К., Франценсон А.В. Системы когерентной оптической связи // Квантовая электроника. – 1985. – № 9. – С. 1786–1806.
3. Ярив А. Введение в оптическую электронику. – М.: Высшая школа, 1983. – 398 с.
4. Шереметьев А.Г. Когерентная волоконно-оптическая связь. – М.: Радио и связь, 1991. – 192 с.
5. Іщенко С.В. Оптичні підсилювачі на основі легованих ербієм оптичних волокон // Зв'язок. – 1997. – № 3 – С. 24-27; № 4 – С. 30–32.
6. Маркевич Е.А., Павлов НМ, Склярв О.К., Установ С.А. Параметры системы связи со спектральным уплотнением и оптическими усилителями в документах МСЗ-Т // Электросвязь. – 2000. – № 6. – С. 12–14.
7. Прикладная оптика / Под общ. ред. Н.П. Заказна. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
8. Франсон М. Оптика спеклов. – М.: Мир, 1980. – 171 с.
9. Убайдуллаев Р. Р. Волоконо-оптические сети. – ЭКО-ТРЕНДЗ: Москва, 1998. – 267 с.
10. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999. – 671 с.
11. Оптика и связь / А. Козанне, Ж. Флере, Г. Мэтр, М. Руссо / Под ред. В.К.Соколова. – М.: Мир, 1984. – 504 с.
12. Семенов А.Б. Волоконная оптика в локальных и корпоративных сетях связи. – М.: КомпьютерПресс, 1998. – 302 с.
13. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. – М.: Эко-Трендз, 2000.
14. Корнійчук В.І., Мосорін П.Д. Волоконно-оптичні компоненти, системи передачі та мережі. – Одеса: Друк, 2001. – 364 с.

Навчально-методичне видання

Герцій Олександр Анатолійович
Кокряцька Наталія Іванівна

**ПРИСТРОЇ ТА ЕЛЕМЕНТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ
СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ**

Методичні рекомендації
щодо виконання практичних занять та організації самостійної роботи
для студентів безвідривної форми навчання
спеціальності 6.050202 «Автоматика та автоматизація на транспорті»

Директор РВ ДЕГУТ Л. В. Пономаренко
Редактор Н. В. Щербак
Макет і верстка В. О. Андрієнка

Підписано до друку 24.03.2011. Формат 60 x 84/16.
Папір офсетний. Друк – ризографія.
Зам. № 27-2/11. Наклад 40 прим.

Надруковано в Редакційно-видавничому центрі ДЕГУТ
Свідоцтво про реєстрацію Серія ДК № 3079 від 27.12.2007 р.
03049, м. Київ - 049, вул. Миколи Лукашевича, 19.