

УДК 535.813; 535.89

В. М. Шапар, С. В. Свєчніков

Інститут фізики напівпровідників Національної академії наук України ім. В. С. Лашкарьова, Київ

**Малогабаритний багатоканальний оптичний
обертовий з'єднувач з волоконно-оптичними
кільцевими перетворювачами**

Запропоновано оригінальну конструкцію малогабаритного оптичного обертового з'єднувача з кільцевими волоконно-оптичними перетворювачами, виконаними в суцільному монолітному волоконно-оптичному блоці, для передачі аналогових та цифрових оптичних сигналів з об'єктів, що обертаються зі швидкістю до декількох тисяч оборотів за хвилину. Розроблено математичну модель та проведено математичне моделювання конструкції залежно від геометрії та оптичних властивостей її конструктивних елементів з урахуванням радіальних та торцевих биттів роторної частини обертового з'єднувача. На основі проведених розрахунків виготовлено макетний зразок оптичного з'єднувача на п'ять оптичних каналів передачі, та експериментально досліджено його характеристики.

ВСТУП

При проведенні ряду космічних експериментів на борту космічного апарата, наприклад при дослідженні впливу мікрогравітації, вакууму і низьких температур на фрикційні властивості матеріалів, необхідно передавати вимірювальні інформаційні сигнали з обертової частини апаратури на стаціонарно установлену [1].

Традиційне використання електричних контактних пристроїв в умовах космосу має значні недоліки, пов'язані з нестабільністю роботи контактів, що труться, їхнім підгорянням і пов'язаними з цим значними електричними шумами. Крім того, у випадку використання перспективних волоконно-оптичних датчиків фізичних величин на рухомих об'єктах має місце проблема механічної розв'язки між рухомими та стаціонарними блоками дослідницької апаратури.

Оптимальне рішення указаної проблеми можливе шляхом створення і використання на об'єктах, що обертаються, замість струмознімальних пристроїв їхніх функціональних аналогів — оптичних обертових з'єднувачів (ООЗ), і передачі інформаційних сигналів з об'єктів, що обертаються, на нерухомі об'єкти в оптичному вигляді. Над створенням ООЗ сьогодні працюють майже в усіх розвинутих країнах світу і вважають цю проблему вкрай актуальною, оскільки на даний час розроблені і промислово

освоєні з задовільними оптичними та експлуатаційними характеристиками тільки одно- та двоканальні ООЗ.

Представлена нижче робота присвячена розробці, теоретичному аналізу та комп'ютерному моделюванню конструкції малогабаритного багатоканального ООЗ на 5-7 оптичних каналів з кільцевими волоконно-оптичними перетворювачами (ВОП), призначеного для передачі аналогової та цифрової телеметричної інформації від датчиків фізичних величин, розташованих на об'єктах, що обертаються навколо загальної осі зі швидкістю до 1000 об/хв.

**ПРИНЦИП ДІЇ ОПТИЧНОГО ОБЕРТОВОГО
З'ЄДНУВАЧА ТА ЙОГО АНАЛІЗ**

Принцип дії конструкцій з волоконно-оптичними кільцевими перетворювачами полягає у формуванні на передавальній частині оптичного каналу ООЗ світлового потоку у вигляді кільця, розташованого співвісно з віссю обертання, та передачі цього світлового потоку на приймальну частину оптичного каналу ООЗ аксіально або радіально до вісі. Оптична зіниця приймальної частини ООЗ теж має вигляд кільця. В деяких конструкціях, відомих з патентних матеріалів, використовують точкові приймачі. Це, з одного боку, спрощує конструкцію,

але з другого — призводить до небажаних значних оптичних втрат.

Для формування кільцевого світлового потоку та приймача кільцевої форми використовують кільцеві волоконно-оптичні перетворювачі форми світлового потоку, виконані у вигляді багатожильного пучка світловодів, одні торці яких розподілені рівномірно по кільцю, а інші зібрані у джгут із поперечним перетином у вигляді круга.

На даний момент відомо декілька конструкцій ООЗ із кільцевими ВОП:

- з однорядним розподіленням світловодів по кільцю ВОП [2];

- з багаторядним розподіленням світловодів по кільцю ВОП і використанням у багатоканальних конструкціях ООЗ відповідної кількості дискретних ВОП, об'єднаних в один кільцевий волоконно-оптичний колектор (ВОК) за допомогою циліндричних втулок, які одночасно відіграють роль кріплень і оптичних ізоляторів між сусідніми каналами [3];

- з багаторядним розподіленням світловодів по кільцю ВОП, але з кільцевими оптичними каналами, виконаними інтегровано всередині монолітного світловолоконного блоку (авторська конструкція).

Конструкції з однорядним розподіленням світловодів по кільцю ВОП мають значний недолік — амплітудна модуляція оптичного сигналу в них становить 30 % і більше. В конструкціях з багаторядним розподіленням світловодів по кільцю, завдяки широким світловодним кільцям, амплітудна модуляція зменшена до 1 %, але при цьому зменшилася пропускна здатність ООЗ до декількох каналів і зросли загальні оптичні втрати, зумовлені неузгодженістю діаметрів приймального волоконно-оптичного кабелю (що становить 0.05—0.2 мм) і багатожильного світловодного джгута ВОП (діаметр якого досягає 2—5 мм).

Це пояснюється тим, що при збільшенні кількості фізичних каналів зростають діаметри периферійних кільцевих каналів ВОП, разом з якими, при сталій ширині кільцевого каналу, зростають площі, зайняті торцями світловодів у цих каналах, і, відповідно, зростають діаметри кругових торців світловодних джгутів ВОП, котрі відіграють роль оптичного інтерфейсу для введення-виведення променів із ООЗ.

Неважко показати, що при однаковій ширині S кільцевих каналів ВОП діаметр d_n джгута n -го оптичного каналу ООЗ є пропорційним до ширини каналу S і кореня квадратного з $(n - 1)$:

$$d_n = 2S\sqrt{2(n - 1)}, \quad (1)$$

де n — номер світловодного кільцевого каналу, відлік якого проводиться починаючи з центрально-

го. У відповідності з виразом (1) для п'ятиканального ООЗ із шириною кільцевих каналів 0.4 мм і такою самою шириною стінок циліндричних втулок між каналами діаметр d_n кругового торця ВОП у п'ятому каналі становить 3.3 мм. При відсутності оптичних узгоджувальних пристроїв оптичні втрати введення-виведення випромінювання з ВОП у волоконно-оптичний кабель у даному випадку становитимуть 24 дБ для кабелю з діаметром сердцевини 0.2 мм і 36.4 дБ для кабелю з діаметром сердцевини 0.05 мм.

Складність проблеми виведення випромінювання із ООЗ посилюється тим, що світловий пучок на виході ВОП ніколи не є ані паралельним, ані гомоцентричним, навіть якщо на вході ВОП використовується ідеальний випромінювач, котрий дає суттєво паралельний або гомоцентричний пучок. Розколімування та порушення гомоцентричності світлового пучка на виході ВОП пояснюється явищем симетризації пучка променів у світловодах і перерозподілом енергії мод нижчого порядку в моді вищого порядку. Зокрема, наші дослідження індикатриси розсіювання випромінювання на виході зігнутого світловодного джгута типу О-ТХ-1 показали, що при опроміненні торця світловода паралельним пучком перпендикулярно до торця основна частина променів на виході джгута зосереджена не в осьовому напрямку (чого можна було очікувати при відсутності перерозподілу енергії між модами), а у світловому конусі променів (кут при вершині конуса складає приблизно 10°). Оскільки згідно із законами геометричної оптики «стиснення» променевих пучків до меншого діаметра призводить до пропорційного збільшення апертури променів, то світловий пучок на виході ООЗ не має сенсу стискати більше, ніж до певного діаметра, при якому апертура променів на виході фокусувального пристрою перевищує апертуру волоконно-оптичного кабелю. Подальше зменшення діаметра світлового пучка на виході ВОП до діаметра кабелю не забезпечує зменшення загальних оптичних втрат введення світлових променів в кабель через пропорційне збільшення складової оптичних втрат, пов'язаних із неузгодженістю апертури світлового пучка та робочої апертури кабелю.

Отже, з точки зору оптичних втрат ширина кільцевого каналу ВОП є одним із найважливіших конструктивних параметрів ООЗ. З цієї точки зору, а також із міркувань технологічності та досягнення максимальної кількості фізичних каналів, найбільший практичний інтерес серед конструкцій світловодного типу з кільцевими перетворювачами становить конструкція з волоконно-оптичними перетворювачами, виконаними інтегровано в суцільному

волоконному блоці. Інтегроване виконання кільцевих каналів в єдиному блоці дозволяє значно підвищити точність виконання кільцевих каналів, чим зменшити їхню ширину до декількох десятків мікрометрів. Крім того, дане технічне рішення дає можливість розташувати кільцеві канали у безпосередній близькості один від одного, тобто дозволяє виготовити багатоканальний кільцевий волоконно-оптичний колектор (ВОК) без центрувальних циліндричних втулок. Це саме по собі дає можливість збільшити кількість оптичних каналів порівняно з відомими аналогами щонайменше удвічі при одночасному зменшенні оптичних втрат і амплітудної модуляції у кілька разів.

Недоліком указаної конструкції є наявність незначної перехресної перешкоди між сусідніми каналами, що зумовлено розсіюванням частини світлових променів на інтерфейсних поверхнях. Проте, якщо ці поверхні виконати полірованими, складова перехресної перешкоди, зумовленої розсіюванням, не перевищуватиме 0.16 %. Звичайно, при неправильному виборі геометрії передавальних і приймальних кільцевих каналів ВОК між сусідніми оптичними каналами можлива значна перехресна перешкода, зумовлена прямим попаданням світлових променів до сусідніх каналів (рис. 1). Аби цього не сталося, в центральному каналі діаметр приймального каналу має бути більшим від діаметра передавального каналу, а в кільцевих каналах зовнішні діаметри приймальних каналів мають бути більшими, а внутрішні діаметри меншими, ніж відповідні діаметри передавальних кільцевих каналів на величину

$$\Delta D \geq 2dtg\alpha, \quad (2)$$

де d — величина зазору між торцями ВОК; α — максимальний кут виходу променів з поверхні торця ВОК відносно нормалі до цієї поверхні.

Аби виключити складову перехресної перешкоди, зумовленої похибками геометрії кільцевих каналів ВОП, а також похибками механізму ООЗ (радіальними та торцевими биттями передавальних кільцевих каналів відносно приймальних), різниця між діаметрами приймальних і передавальних каналів має бути дещо більшою, ніж цього вимагає нерівність (1). Можна показати, що в цьому випадку мають бути виконані такі співвідношення:

$$D_{2out} \geq \frac{D_{1out} + \Delta_{1out} + 2\delta_{rad} + 2dtg(\alpha)\cos(\beta_1) + 2d\sin(\beta_1)}{\cos(|\beta_2| + |\beta_1|) - \sin(|\beta_2| + |\beta_1|)tg(\alpha)} + \Delta_{2out} + 2\delta_{rec}, \quad (3)$$

$$D_{2in} \leq \frac{D_{1in} - \Delta_{1in} - 2\delta_{rad} - 2dtg(\alpha)\cos(\beta_1) + 2d\sin(\beta_1)}{\cos(|\beta_2| + |\beta_1|) + \sin(|\beta_2| + |\beta_1|)tg(\alpha)} - \Delta_{2in} - 2\delta_{rec}, \quad (4)$$

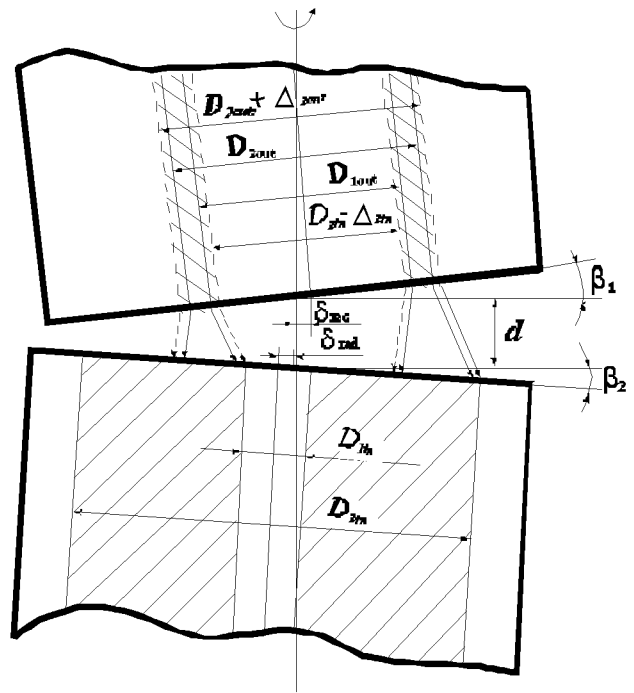


Рис. 1. Схема розташування волоконно-оптичних кільцевих каналів в оптичному з'єднувачі

де D_{1in} та D_{1out} — внутрішній та зовнішній діаметри кільцевого передавального каналу; D_{2in} та D_{2out} — внутрішній і зовнішній діаметри кільцевого приймального каналу; α — апертурний кут випромінювання на виході передавального кільцевого каналу; β_1 та β_2 — кути між площинами, в яких лежать торцеві поверхні випромінювального та приймального ВОК, і площиною, перпендикулярною до осі обертання; Δ_{1out} та Δ_{2out} — допуски на відхилення розмірів зовнішніх діаметрів передавального та приймального кільцевих каналів ВОП; Δ_{1in} та Δ_{2in} — допуски на відхилення розмірів внутрішніх діаметрів передавального та приймального кільцевих каналів ВОП; δ_{rad} та δ_{rec} — радіальні зміщення центрів передавального та приймального кільцевих каналів ВОК відносно загальної осі обертання, зумовлені неконцентричністю кільцевих каналів, зміщенням їхніх центрів відносно осі обертання, а також радіальним биттям підшипників, що використовуються для встановлення ВОК у корпус оптичного обортового з'єднувача.

Співвідношення (3) виведено для випадку, коли торцеві поверхні ВОК відхилені одна від одної у взаємно протилежних напрямках (див. рис. 1). Саме в цьому випадку має місце найбільший вплив

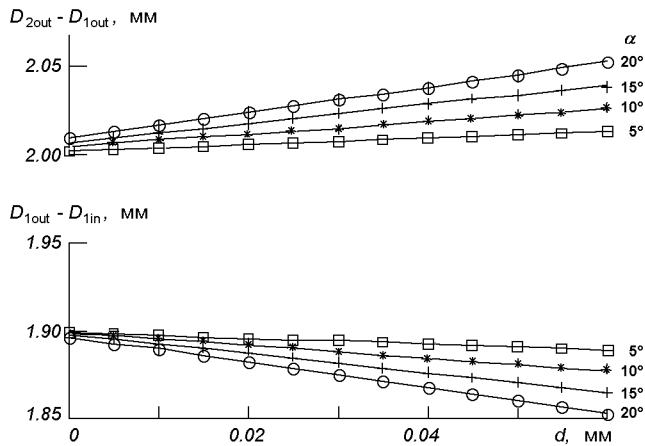


Рис. 2. Сімейство теоретичних залежностей зовнішнього та внутрішнього діаметрів приймального кільцевого каналу ВОП від величини зазору d між торцями волоконно-оптичних колекторів

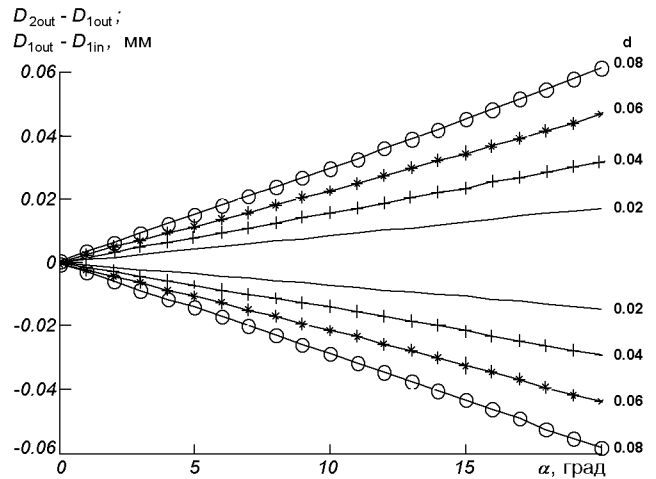


Рис. 3. Сімейство теоретичних залежностей різниці між зовнішніми та внутрішніми діаметрами кільцевих приймального і передавального каналів ВОП від значення апертурного кута α випромінювання передавального каналу

торцевих биттів на зовнішній діаметр приймального каналу.

Для внутрішніх діаметрів кільцевих каналів найбільший вплив торцевих биттів має місце при відхиленні торцевих поверхонь обох ВОК від горизонтальної поверхні в одному напрямку. Тому співвідношення (4), виведене для цього випадку, відрізняється від співвідношення (3). Слід відзначити, що при обертанні роторної частини ООЗ напрямком додатних чи від'ємних кутів значення не має, тому у формулах (3) і (4) кути β_1 та β_2 взяті за модулем.

На рис. 2 приведено сімейство розрахованих з (3), (4) залежностей зовнішнього та внутрішнього діаметрів кільцевого приймального каналу ВОК від ширини d зазору між торцевими поверхнями ВОК.

Таким чином, оскільки ширина кільцевих каналів є одним із найважливіших геометричних параметрів, що впливають на оптичні характеристики ООЗ, важливо визначити, в якій мірі ширина кільцевих каналів залежить від інших конструктивних параметрів ООЗ. По-перше, це дозволить визначити при заданих характеристиках ООЗ допустимі відхилення реальних розмірів елементів конструкції від розрахованих, звести їх до одного поля допусків і, тим самим, оптимізувати конструкцію на технологічність за показником точності. По-друге, це дозволить визначити очікувані оптичні характеристики ООЗ при заданій кількості оптичних каналів.

З цією метою була розроблена методика розрахунків геометрії кільцевих каналів ВОК, що базується на графоаналітичному аналізі залежностей вигляду

$$\Delta D_{out} = D_{2out} - D_{1out} = f(\alpha)|_{\beta,d,D_{2out}}, \quad (5)$$

$$\Delta D_{in} = D_{2in} - D_{1in} = f(\alpha)|_{\beta,d,D_{1out}}. \quad (6)$$

Залежності (5), (6) отримано із співвідношень (3), (4) при умові, що $\beta = \beta_1 = \beta_2$ і допуски на відхилення розмірів кільцевих каналів Δ_{1out} , Δ_{2out} та Δ_{1in} , Δ_{2in} , а також радіальні зміщення δ_{rec} та δ_{rad} центрів кільцевих каналів від осі обертання дорівнюють нулеві. Їхній вплив на діаметри приймальних кільцевих каналів пропонується враховувати після визначення ΔD_{out} та ΔD_{in} з наведених вище залежностей, алгебраїчно підсумовуючи їхні значення з отриманим результатом.

Для математичного моделювання конструкції на ЕОМ була розроблена комп'ютерна програма в системі MATLAB.

Сімейства характеристик ΔD_{out} та ΔD_{in} , розрахованих із (5), (6) для випадку конструктивних параметрів, прийнятих нижче як показові, наведені на рис. 3 та 4. Легко бачити, що найбільший вплив на величину ΔD спричиняють апертурний кут α , під яким світлові промені виходять з торцевої поверхні ВОК, та величина зазору d між торцевими поверхнями ВОК. У той же час від величини торцевих биттів, ΔD залежить набагато слабкіше. Тому при створенні багатоканального ООЗ із кільцевими ВОП слід використовувати світловоди з малим перерозподілом енергії мод нижчого порядку в енергію мод більш високого порядку, а також прецизійну механіку, яка повинна забезпечити надійну роботу ООЗ з шириною зазору між торцевими поверхнями ВОК, що не перевищує 20—40 мкм.

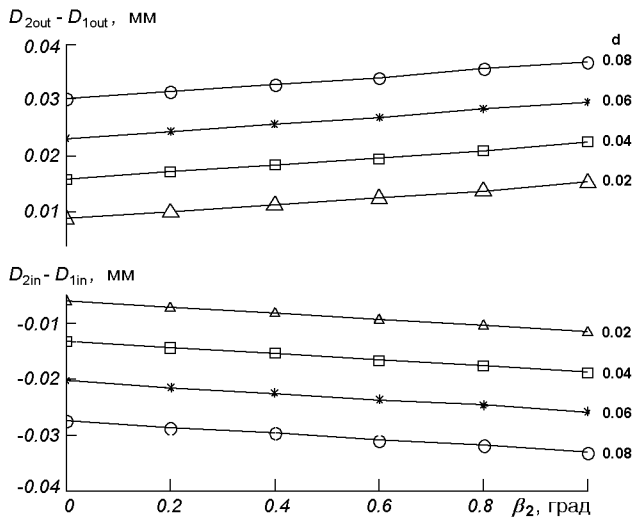


Рис. 4. Сімейство теоретичних залежностей різниці між зовнішніми та внутрішніми діаметрами кільцевих приймального і передавального каналів ВОП від величини кутів биттів β_2 приймального каналу

На основі розрахунків був створений працюючий макет оптичного обертового з'єднувача на п'ять оптичних каналів передачі з шириною приймальних кільцевих каналів ВОК 200 мкм. Маса макета становить 350 г, габаритні розміри не перевищують 10 см по довжині і 5 см по діаметру. У макеті використані підшипники, які дозволяють пристрою працювати в умовах космосу. На оптичних входах і виходах макета ООЗ не були використані оптичні перевірочні пристрої, тому дослідження оптичних характеристик макета були проведені в складі із світлодіодами і фотодіодами в якості відповідно джерела та приймача світла.

Отримано такі оптичні характеристики макета: рівень амплітудної модуляції в кожному з каналів не перевищував 1.5 %, оптичні втрати в центральному каналі діаметром 1 мм становили 7 дБ, оптичні втрати в кільцевих каналах не перевищували 9 дБ.

ВИСНОВКИ

Отримані результати дозволяють створити малогабаритні оптичні обертові з'єднувачі для безконтактної передачі аналогової та цифрової інформації з обертових об'єктів на нерухомі, що обертаються зі швидкістю до декількох тисяч оборотів за хвилину, в тому числі для дослідницької апаратури, призначеної для використання на борту космічних апаратів.

Розроблений макет на п'ять оптичних каналів передачі можна прийняти як прототип для створення і використання в реальних умовах дослідних зразків ООЗ для апаратури космічного призначення.

Робота виконана за підтримки УНТЦ по проекту № 1446.

1. Габуля Г. Д. и др. Разработка научной аппаратуры и антифрикционных материалов нового поколения для проведения космического эксперимента «Материал—Трение» // Космична наука і технологія.—2002.—8, № 5/6.—С. 28—34.
2. Пат. 1587531 Великої Британії, МКИ G 02 В 5/16. — Оpubл. 08.04.81.
3. Пат. 4027945 США, МКИ G 02 В5/16. — Оpubл. 07.06.77.

A SMALL-SIZED MULTICHANNEL OPTICAL ROTARY JOINT WITH RING-LIKE FIBER OPTIC CONVERTERS

V. N. Shapar, S. V. Svechnikov

We advance an original construction of a small-sized optical rotary joint with ring-like fiber optic converters made in a single monolithic fiber optic unit. It is intended for transmission of analog and digital optical signals from rotating objects (a rate of rotation of up to several thousand rpm). We developed a mathematical model and performed computer simulation of the construction, depending on the geometry and optical properties of its elements, with allowance made for radial and end beats of the rotary joint rotor section. On the basis of our calculations, we fabricated a breadboard sample of rotary joint for five optical transmission channels and studied experimentally its characteristics.