

УДК 535.813; 535.89

В. Н. Шапарь, С. В. Свечников, П. Ф. Олексенко

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

Многоканальный оптический вращающийся соединитель для РЛС космического базирования

Запропоновано оригінальне технічне рішення багатоканального оптичного обертового з'єднувача (ООЗ) з волоконно-оптичним компенсатором, виконаним у вигляді пучка волоконно-оптичних світловодів, торці яких розташовані по колу із зворотним порядком чергування на протилежних боках компенсатора. Інформаційна пропускна здатність обладнання складає кілька десятків оптичних каналів при стопроцентній оптичній ізоляції між каналами. Проведено математичне моделювання обладнання з компенсатором на основі багатожильних волоконно-оптичних джгутів квадратного перерізу. Розрахунковим шляхом визначено очікувані основні технічні характеристики ООЗ, в'яяснено ступінь впливу на характеристики різних конструктивних параметрів компенсатора та інших елементів конструкції. Отриманих даних достатньо для інженерного проектування ООЗ.

ВВЕДЕНИЕ

В контрольно-измерительной технике, в том числе технике, используемой на борту космического аппарата, для съема и передачи измерительной информации от вращающейся части аппаратуры к неподвижной до настоящего времени традиционно используются вращающиеся контактные токосъемные устройства (ВКУ).

Использование контактных устройств в условиях космоса имеет существенные недостатки, обусловленные нестабильной работой трущихся контактов, их подгоранием, узкой полосой передачи электрических сигналов, значительными масс-габаритными показателями в многоканальном исполнении.

Использование контактных устройств в условиях космоса имеет существенные недостатки, обусловленные нестабильной работой трущихся контактов, их подгоранием, узкой полосой передачи электрических сигналов, значительными масс-габаритными показателями в многоканальном исполнении. Нечувствительные к электромагнитной помехе бесконтактные оптические вращающиеся соединители (ОВС) имеют значительные преимущества перед электрическими аналогами. Они имеют малые габариты и вес, высокую надежность, значительный срок службы и не требуют регламентных работ на протяжении длительного времени эксплуатации (десять лет), что наилучшим образом отвечает требованиям космической техники [5].

Чрезвычайно важным направлением является использование ОВС на борту космического аппарата в обзорных радиолокационных станциях (РЛС) с большими углами обзора, поскольку тогда масса и габариты тракта передачи сигналов может быть уменьшена в сотни раз. Так, например, если масса типового контактного токосъемного устройства на несколько сотен электрических каналов составляет

200—300 кг, то масса широкополосного ОВС на восемь оптических каналов, что функционально заменяет ВКУ на 800 электрических каналов, не превышает 2 кг.

В настоящее время из научно-технической и патентной литературы известно несколько способов создания многоканальных ОВС. Один из состоит в использовании принципа компенсации вращения световых пучков, заключающегося в зеркальном отображении источников излучения относительно биссектрисы угла поворота источников. В качестве компенсатора вращения световых пучков в известных устройствах, реализующих указанный способ, используются зеркала, оптические линзы и оптические призмы [2—4]. Несмотря на кажущуюся простоту и перспективность этих устройств, последние не получили широкого распространения из-за существенных недостатков: количество физических каналов передачи ограничено пятью-шестью, значительные потери оптической мощности сигнала в каналах связи с ВОЛС, составляющие десятки децибелл, вследствие высокого уровня перекрестной помехи между каналами и высокий уровень амплитудной модуляции сигналов с вращением роторной части ОВС. Наш анализ показал, что эти недостатки обусловлены чрезмерно высокими требованиями к параллельности либо гомоцентричности световых пучков на входе в компенсатор.

Сравнительно недавно в работах [1, 4] разработан более общий принцип компенсации вращения световых пучков, заключающийся в поэтапном преобразовании угловых скоростей вращения свето-

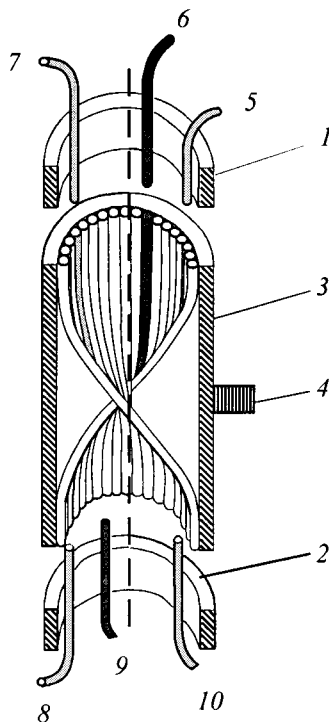


Рис. 1. Схема многоканального оптического вращающегося соединителя с волоконно-оптическим компенсатором. 1 — вращающаяся часть, 2 — стационарная часть, 3 — волоконно-оптический компенсатор, 4 — редукторный механизм; 5—10 — волоконно-оптические световоды

вых пучков при помощи одного или нескольких оптических преобразователей, установленных последовательно на общей оси вращения с источниками и приемниками излучения. Разработка данного принципа компенсации открыла новую перспективную возможность построения целого ряда устройств многоканальных ОВС, позволив использовать для построения компенсаторов волоконную оптику, и тем самым снять жесткие требования к параллельности световых пучков на входе в компенсатор.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УСТРОЙСТВА

Одним из вариантов построения качественного многоканального ОВС, работающего на принципе компенсации, может служить предложенная нами конструкция с волоконно-оптическим компенсатором, показанная на рис. 1. Волоконно-оптический компенсатор выполнен в виде пучка оптических световодов одни и другие торцы которых уложены по соответствующим окружностям с центрами на общей оси вращения, причем порядок чередования по окружности одних торцов световодов выбран

обратным по отношению к порядку чередования по окружности других торцов соответствующих световодов. Компенсатор установлен в устройстве между вращающейся частью 1 и стационарной частью 2 на общей с ним оси вращения и кинематически соединен с вращающейся частью 1 через редукторный механизм 4 с передаточным отношением 1/2.

Кратко принцип действия устройства можно описать следующим образом. При повороте вращающейся части 1 со световодами 5, 6, 7 относительно стационарной части на угол φ , компенсатор 3 поворачивается относительно стационарной части на угол $\varphi/2$. При этом световые лучи, излучаемые торцами световодов 5, 6, 7, расположенных на вращающейся части, поворачиваются относительно компенсатора на входе компенсатора на угол $+\varphi/2$, а на выходе компенсатора — на угол $-\varphi/2$. Относительно же стационарной части 2 световые лучи остаются неподвижными, поскольку компенсатор 3, поворачиваясь относительно стационарной части на угол $+\varphi/2$, переносит на этот же угол световые лучи.

Количество оптических каналов в данном ОВС определяется соотношением размеров компенсатора и источников излучения, и при необходимости может достигать нескольких сотен каналов. Если диаметр световодного кольцевого канала компенсатора равен 50 мм, а диаметры излучающих и принимающих излучение элементов (см. позиции 5—10 на рис. 1) равны 1 мм, то при расположении по кольцу с шагом 1 мм количество возможных оптических каналов составляет 78. Это самое большое количество оптических каналов среди известных на данный момент конструкций и технических решений ОВС.

Что касается оптической развязки между каналами, как нетрудно видеть, она составляет 100 % благодаря стопроцентной оптической изоляции между принадлежащими разным оптическим каналам световодами, разнесенными на достаточные для этого расстояния.

Передаточная оптическая характеристика ОВС зависит от геометрии конструкции компенсатора и качества его исполнения. К сожалению, выбор конструкции компенсатора определяется технологичностью и возможностью ее массового изготовления. На наш взгляд, наиболее простой, с точки зрения современных технологий производства, является конструкция компенсатора в виде связки многожильных регулярных волоконно-оптических жгутов с прямоугольными торцами. Изготовить данный компенсатор из отдельных моносветоводов, типичный диаметр которых составляет 10—30 мкм, крайне трудно. Приняв данную конструкцию компенсатора в качестве базовой, проведем расчет его передаточной характеристики.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВА

С целью наглядности и определения степени влияния каждого из конструктивных параметров компенсатора на характеристики ОВС, вначале рассмотрим вариант идеального по геометрии компенсатора, т. е. компенсатора, у которого волоконные жгуты выполнены с абсолютно точными размерами и имеют сечение в форме идеального квадрата. Кроме того, примем, что квадратные торцы волоконных жгутов расположены на цилиндрической поверхности оси компенсатора симметрично и образуют прилегающими к цилиндрической поверхности оси сторонами правильного равностороннего многогранника (рис. 2). Нетрудно видеть, что коэффициент передачи оптического сигнала компенсатора зависит от азимутального местоположения светового пучка относительно торцов световодных жгутов в компенсаторе, и при вращении светового пучка относительно компенсатора периодически изменяется от максимального значения к минимальному с частотой, кратной количеству световодных жгутов в компенсаторе. Можно показать, что в случае светового пучка круглого сечения зависимость коэффициента передачи от азимутального положения светового пучка относительно торцов двух соседних световодных жгутов для идеального по геометрии компенсатора описывается следующими математическими соотношениями:

$$K = 1 - \frac{c\sqrt{r^2+c^2} + r^2 \arcsin\left(\frac{d}{r}\right) + d\sqrt{r^2-d^2} + r^2 \arcsin\left(\frac{d}{r}\right)}{\pi r^2}, \quad (1)$$

$$c = (R + b)\sin(\theta - \varphi) - a/2, \quad (2)$$

$$d = (R + b)\sin(\theta + \varphi) - a/2, \quad (3)$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{a}{2R}\right), \quad (4)$$

где a — размер стороны торца световода; R — радиус цилиндрической поверхности оси; r — радиус светового пучка на входе в компенсатор; b — расстояние центра светового пучка от цилиндрической поверхности оси компенсатора; φ — азимутальное угловое положение центра светового пучка относительно радиальной линии, проходящей через точку соприкосновения торцов световодов в плоскости рисунка (см. рис. 2).

С помощью выражений (1)—(4) мы провели расчет влияния геометрии компенсатора на его оптические характеристики в относительных еди-

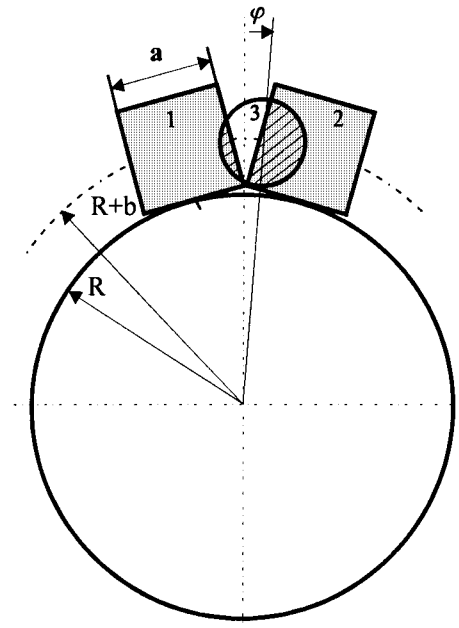


Рис. 2. Схема расположения торцов световодов на цилиндрической поверхности оси компенсатора при идеальной геометрии торцов световодов и идеальной их укладке: 1, 2 — торцы световодов, 3 — световой пучок

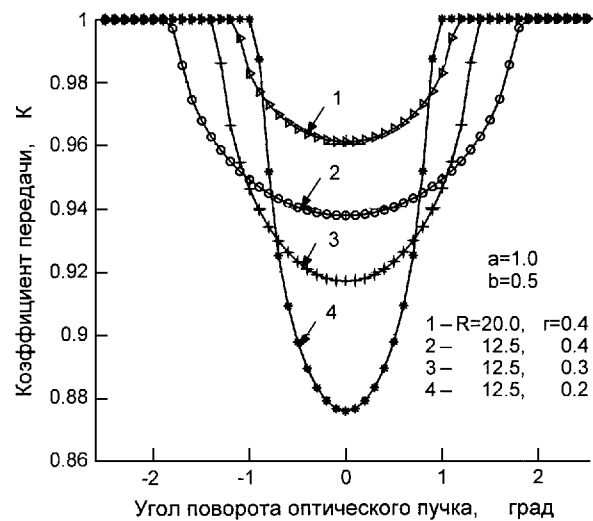


Рис. 3. Значения коэффициента передачи $K = f(\varphi)$, рассчитанные для различных значений R/a и r/a компенсатора

ницах, приведенных к размеру стороны торца световода. Это дает возможность анализировать влияние относительных размеров каждого из конструктивных элементов компенсатора на коэффициент передачи не прибегая к их абсолютным размерам. На рис. 3 приведено семейство зависимостей коэффициента передачи $K = f(\varphi)$ для различных значений R/a и r/a , а на рис. 4 — семейство зависимо-

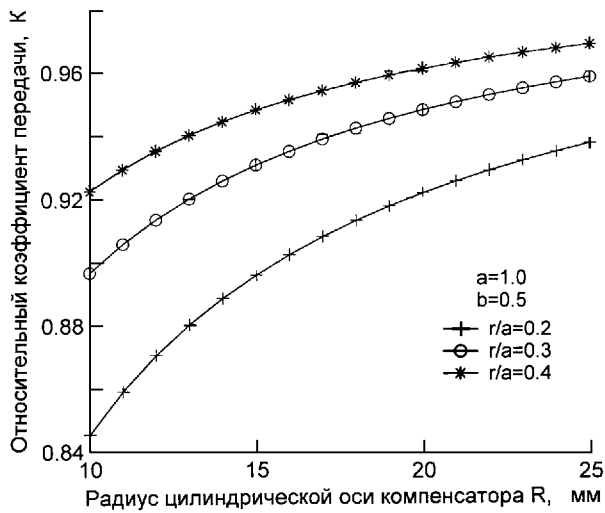


Рис. 4. Значения коэффициента передачи $K = f(R/a)$, рассчитанные для различных значений радиуса r светового пучка при угле $\varphi = 0$

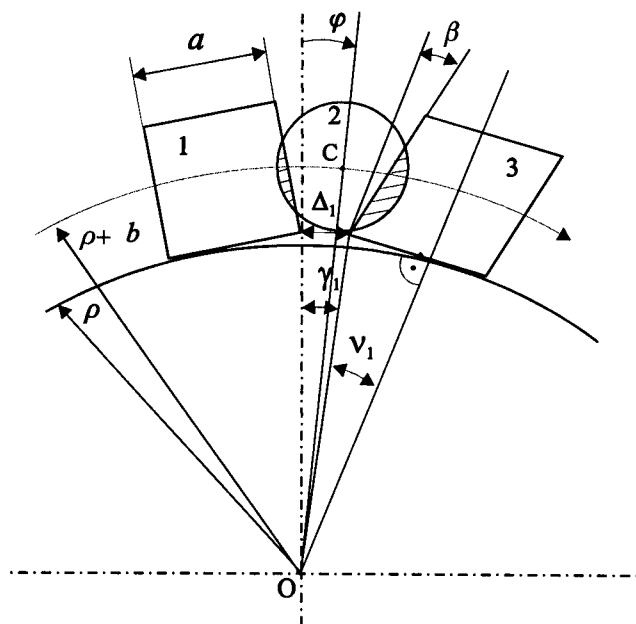


Рис. 5. Схема расположения торцов световодных жгутов на цилиндрической поверхности оси компенсатора при неидеальной геометрии торцов световодных жгутов и их неидеальной укладке: 1, 2 — торцы световодов, 3 — световой пучок

стей коэффициента передачи $K = f(R/a)$, рассчитанных для различных значений радиуса r светового пучка при радиальном отклонении $b = 0.5a$ светового пучка от цилиндрической поверхности оси и угле $\varphi = 0$. Нетрудно видеть, что для уменьшения оптических потерь в компенсаторе и

уменьшения величины амплитудной модуляции необходимо, чтобы поперечные размеры светового пучка были максимально близки к размерам торцов световодных жгутов. В свою очередь, поперечные размеры световодных жгутов в компенсаторе должны быть в 20—30 раз меньше диаметра цилиндрической поверхности оси, на которой они уложены. Так, если при $R/a = 20$ и соотношении параметров $b/a = 0.5$ и $r/a = 0.4$ максимальное значение величины модуляции оптической мощности сигнала составляет 4 %, то при $R/a = 10$ и тех же соотношениях b/a и r/a величина амплитудной модуляции сигнала достигает 8 %. Заметим, что представленные на рис. 3, 4 зависимости получены для идеального по геометрии компенсатора, в котором не учтены погрешности размеров сторон торцов световодных жгутов, погрешности формы торцов световодных жгутов и погрешности их расположения на цилиндрической поверхности оси (см. чертеж на рис. 5). Влияние указанных факторов на коэффициент передачи устройства, а также влияние радиальных биений светового пучка учтены в математических соотношениях:

$$K = 1 - \frac{c\sqrt{r^2 - c^2} + r^2 \arcsin\left(\frac{d}{r}\right) + d\sqrt{r^2 - d^2} + r^2 \arcsin\left(\frac{d}{r}\right)}{\pi r^2}, \quad (5)$$

$$c = (R + b) [\sin(\gamma_1 + \nu_1 - \varphi) + \cos(\gamma_1 + \nu_1 - \varphi) \operatorname{tg} \beta_1] - R \operatorname{tg} \beta_1 - a/2 \mp \delta_1, \quad (6)$$

$$d = (R + b) [\sin(\gamma_2 + \nu_2 + \varphi) + \cos(\gamma_2 + \nu_2 + \varphi) \operatorname{tg} \beta_2] - R \operatorname{tg} \beta_2 - a/2 \mp \delta_2, \quad (7)$$

$$\nu_1 = \operatorname{arctg} \left(\frac{a/2 \pm \delta_1}{R} \right), \quad (8)$$

$$\gamma_1 = \arcsin \left\{ \frac{\Delta_1 \cos \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{a/2 \pm \delta_1}{R} \right) \right]}{R} \right\},$$

$$\nu_2 = \operatorname{arctg} \left(\frac{a/2 \pm \delta_2}{R} \right), \quad (9)$$

$$\gamma_2 = \arcsin \left\{ \frac{\Delta_2 \cos \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{a/2 \pm \delta_2}{R} \right) \right]}{R} \right\},$$

где Δ_1 и Δ_2 — величина смещения торцов первого и второго световодного жгута относительно плоскости, проходящей через ось вращения и точку соприкосновения торцов жгутов между собой при их

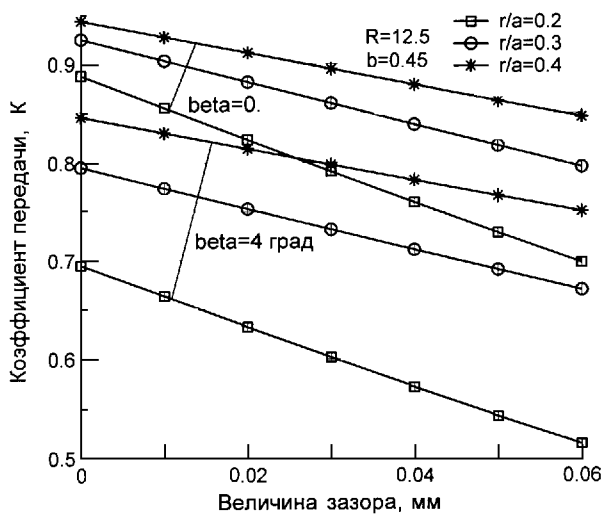


Рис. 6. Зависимость относительного коэффициента передачи K компенсатора от величины зазора Δ между торцами световодных жгутов, рассчитанных для различных значений радиуса r светового пучка и различных расстояний b пучка от цилиндрической поверхности оси

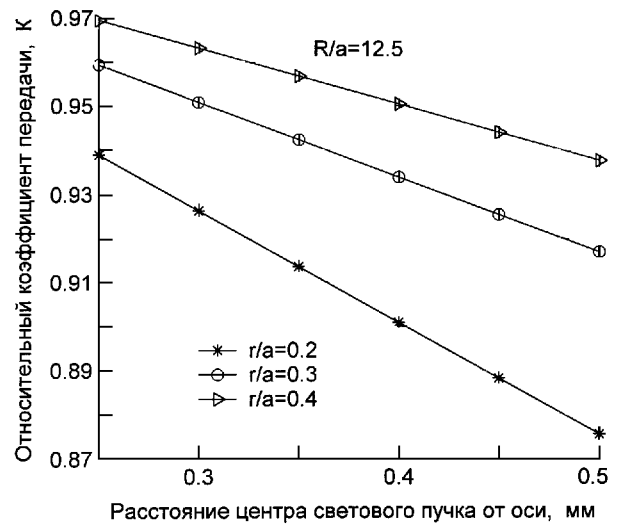


Рис. 7. Зависимость относительного коэффициента передачи K компенсатора от расстояния центра светового пучка до цилиндрической поверхности оси, рассчитанных для различных значений радиуса светового пучка. Форма торцов световодных жгутов принята идеальной ($\beta = 0$)

идеальной укладке; δ_1 и δ_2 — расстояние между точкой соприкосновения стороны торца первого и второго световодного жгута с цилиндрической поверхностью оси и серединой стороны соответствующего торца (при идеальной укладке линия диаметра оси делит прилегающую к поверхности оси сторону торца жгута строго пополам); β_1 и β_2 — угол отклонения от перпендикулярности сторон на торце первого и второго жгута.

На рис. 6 приведено семейство зависимостей относительного коэффициента передачи K компенсатора от величины зазора Δ между торцами световодов, рассчитанных из соотношений (5)–(9) для различных значений радиуса r светового пучка и различных расстояний b пучка от цилиндрической поверхности оси. На рис. 7 показано влияние радиальных смещений центра светового пучка относительно цилиндрической поверхности оси на коэффициент передачи компенсатора. На рис. 8 приведены зависимости коэффициента передачи от значения угла β неперпендикулярности торцов световодов, рассчитанные для различных значений радиуса r светового пучка.

Из рис. 4 видно, что в компенсаторе диаметром 25 мм при соотношении размеров $r/a = 0.4$ и $b/a = 0.45$ укладка идеальных по форме световодов квадратного сечения на цилиндрической оси с зазорами 50 мкм между соседними световодами составляющими приводит к уменьшению коэффициента передачи от значения 0.94 при укладке без зазоров,

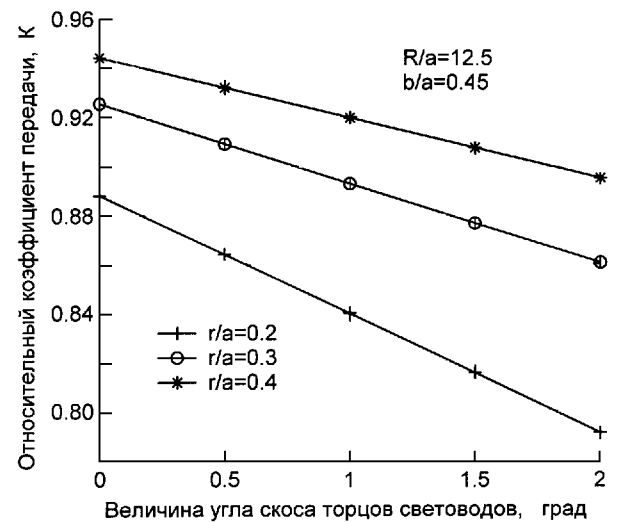


Рис. 8. Зависимость коэффициента передачи компенсатора от величины угла в скоса торцов световодных жгутов для различных значений радиуса r светового пучка

до значения 0.86 при укладке с указанными зазорами. Соответственно величина модуляции оптической мощности сигнала возрастет от 6 % до 14 %. Если же использовать неидеальные по форме световоды с неперпендикулярностью сторон торцов световодов $\beta = 4^\circ$, то в этом случае величина модуляции возрастет до 22 %.

Радиальные биения светового пучка относительно компенсатора сказываются на величине модуляции заметным образом только лишь при малых относительных размерах светового пучка. Так, при $r/a = 0.2$ радиальный уход светового пучка на 0.1 мм от оси компенсатора диаметром 25 мм приводит к дополнительному увеличению модуляции на 2.7 %, а при $r/a = 0.4$ — на 1.3 %.

Таким образом, для создания ОВС с низкими амплитудными искажениями сигнала необходимо, чтобы диаметр компенсатора превышал размеры торцов световодных жгутов в компенсаторе в 20—40 раз, световоды должны быть выполнены с высокой точностью и уложены на цилиндрической поверхности оси с минимально возможными зазорами. В частности, для обеспечения модуляции не более 10 % требуются световодные жгуты с перпендикулярностью сторон торцов не более 2° и отклонениями размеров сторон торцов не более чем на 0.02—0.04 от их номинальных значений. При этом торцы световодов должны быть уложены на цилиндрической поверхности оси компенсатора так, чтобы зазоры между световодами не превышали 50 мкм при их укладке на оси диаметром 50 мм и 25 мкм — при укладке на оси диаметром 25 мм. Добиться уровней модуляции менее 1-3 % в компенсаторе со световодными жгутами прямоугольного сечения практически невозможно.

ВЫВОДЫ

Предложенная конструкция многоканального оптического вращающегося соединителя с волоконно-оптическим компенсатором, выполненным в виде пучка оптических световодов, торцы которых уложены по соответствующим окружностям с центрами на общей оси вращения, позволяет создать ОВС на десятки оптических каналов. По достигаемой информационной пропускной способности и обеспечиваемой при этом стопроцентной оптической изоляции между каналами устройство аналогов не имеет.

Скорость вращения ротора данного устройства из-за наличия в нем редукторного механизма не превышает нескольких сотен об/мин.

Уровень амплитудной модуляции сигнала в каналах передачи ОВС при вращении ротора относительно статора зависит от конструктивного исполнения компенсатора. В устройстве с компенсатором упрощенной конструкции, выполненным на основе многожильных регулярных световодных жгутов

прямоугольного сечения, амплитудная модуляция может достигать 10—15 %. Поскольку при передаче цифровой информации допускается гораздо более высокая нестабильность амплитуды импульсных сигналов, оптические вращающиеся соединители с волоконно-оптическим компенсатором на основе многожильных световодных жгутов прямоугольного сечения полностью удовлетворяют требованиям цифровой связи и могут быть успешно использованы в современных радиолокационных комплексах.

Для уменьшения величины амплитудной модуляции сигнала в компенсаторе до уровня ниже 1 % и обеспечения таким образом возможности его использования в системах аналоговой связи необходимо, чтобы интерфейс волоконно-оптического компенсатора был выполнен в виде сплошного «световодного» кольца, для чего требуется разработка соответствующей технологии производства подобных компенсаторов из отдельных моносветоводов малого диаметра (10—30 мкм).

1. А. с. 1832395 СССР, МКИ Н 04 В 10/00. — Оpubл. 07.08.93, Бюл. № 29.
2. Пат. 3.977.793 США, МКИ G 02 В 23/02. — Оpubл. 18.02.69.
3. Пат. 4109998 США, МКИ G 02 В 23/02. — Оpubл. 29.08.78.
4. Svechnikov G., Shapar V. Optical rotary connector for transfer of data signals from fiber optic sensors placing on rotary objects // Proc. SPIE. Specialty Fiber Optic Systems for Mobile Platforms. OE/FIBERS'91 SPIE International Symp.—1991.—1589.—P. 24—31.
5. Svechnikov S. V., Shapar V. N. Fiber optic rotary joints for non-contact transmission of information to and from rotation equipment // Космічна наука і технологія.—2000.—6, № 4.—С. 40.

MULTICHANNEL OPTICAL ROTARY JOINT WITH HIGH INFORMATION BANDWIDTH

V. N. Shapar, S. V. Svechnikov, P. F. Oleksenko

We advance an original technical solution for a multipass optical rotary joint (ORJ) with a fiber-optic compensator made as a bundle of fiber-optic light-guides whose ends are located alternately (forming rings) at the compensator opposite sides. The information carrying capacity of the device is several tens of optical transmission channels, with complete optical isolation between channels. The computer simulation of the device with a compensator made on the basis of multicore fiber-optic bundles of rectangular cross section was performed. We calculated the expected main ORJ specifications as well as determined the extent to which they are affected by various construction parameters of the compensator and other elements. The results of calculation are sufficient for engineering design of the optimal ORJ construction.