

И. К. МЕШКОВСКИЙ, А. А. УНТИЛОВ, С. С. КИСЕЛЕВ, А. В. КУЛИКОВ, Р. Л. НОВИКОВ

## КАЧЕСТВО НАМОТКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Обсуждаются вопросы качества изготовления чувствительных элементов волоконно-оптических гироскопов. Анализируются данные, полученные в процессе намотки чувствительных элементов. Определяются основные дефекты, возникающие при квадрупольной намотке, и природа их возникновения. Рассматривается задача точной установки шага укладки.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический гироскоп, квадрупольная намотка, дефект намотки.

**Введение.** Волоконно-оптический контур представляет собой катушку оптического волокна с квадрупольным способом намотки. Он используется в качестве чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), который получает все большее распространение в инерциальных системах навигации, управления и стабилизации [1—5].

Для снижения влияния температуры на характеристики ВОГ используется специальная квадрупольная намотка оптического волокна на катушку: равноудаленные от середины катушки участки волокна размещаются максимально близко. При таком способе необходимо попеременно наматывать на катушку волокно в разные стороны от середины (правое и левое плечо).

Можно выделить ряд факторов, усложняющих процесс создания контура:

— малый диаметр используемого волокна, что значительно затрудняет визуальный контроль;

— наличие в волокне внутренних напряжений;

— большая длина наматываемого волокна;

— несовершенство технологии намотки волоконного контура,

— специфика квадрупольного метода намотки.

Под параметрами качества намотки понимаются такие свойства чувствительного элемента ВОГ, которые влияют на выходные характеристики самого гироскопа:

— суммарная длина волоконного контура;

— соотношение длины левого и правого плеча контура;

— количество различных дефектов намотки.

Исследованию параметров качества чувствительного элемента ВОГ и факторов, на них влияющих, посвящена эта статья.

**Дефекты намотки.** Волоконно-оптический контур состоит из  $N$  слоев волокна, диаметр каждого из которых больше диаметра предыдущего слоя [6]. Как следствие, и длина волокна последующего слоя должна быть больше длины волокна:

$$L = \sqrt{\pi^2 (D_k + D_b (1 + (N - 1)\sqrt{3}))^2 + D_b^2 n}, \quad (1)$$

где  $D_k$  — диаметр каркаса рабочей катушки,  $D_b$  — диаметр волокна,  $n$  — число витков в одном слое.

Были обработаны данные, полученные в процессе намотки шести волоконно-оптических контуров с использованием фотоэлектрического датчика длины, имеющего погрешность  $\pm 5$  мм. На рис. 1 для сравнения приведены графики теоретических (отрезки, параллельные оси абсцисс) и практических зависимостей приращения длины волокна от номера слоя ( $a$  —

контур № 1, б — 2, в — 3, г — 4, д — 5, е — 6). Как видно, практические зависимости имеют скачкообразный характер. Стоит заметить, что изменение длины происходит как в сторону увеличения, так и уменьшения.

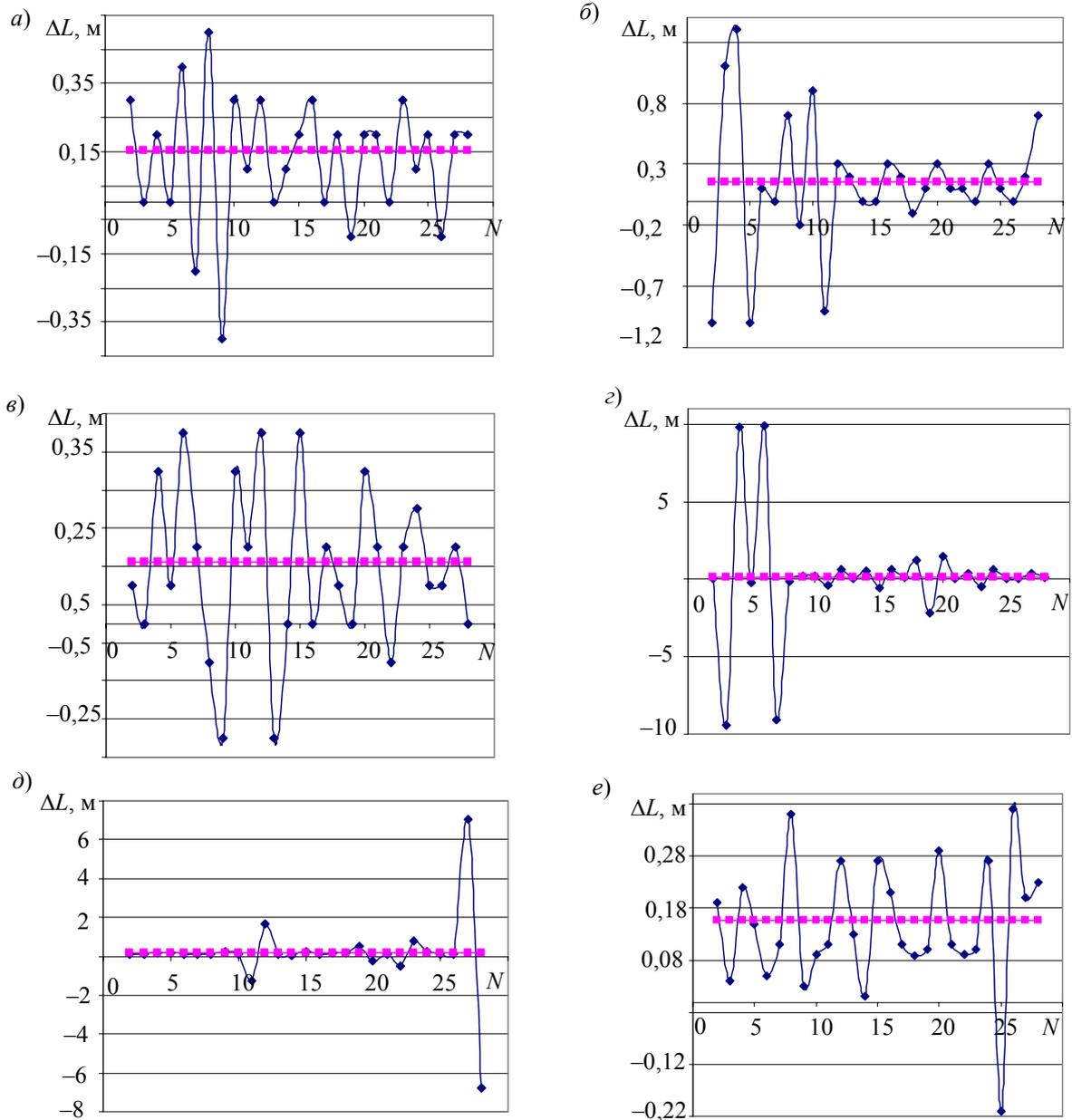


Рис. 1

Данное обстоятельство объясняется, прежде всего, тем, что структура волоконно-оптического контура содержит множество дефектов. Условно их можно разделить на постоянные и переменные, первые обусловлены конструкцией каркаса рабочей катушки, наличием угла между укладываемыми волокнами и бортом каркаса, чередованием намотки левого и правого плеча и т.д. К ним относятся перескок (рис. 2, 1), пристеночный дефект (рис. 2, 2) и дефект „выходящего волокна“ (рис. 2, 3). Перескок характеризуется регулярным смещением волокна через виток и происходит из-за различия между текущим углом намотки и углом намотки витков предыдущего слоя. Пристеночный дефект возникает вследствие того, что борт катушки образует „клин“ с ближайшим к нему витком предыдущего слоя, так что виток, непосредственно прилегающий к борту, проваливается в зоне основания „клина“. „Дефект выходящего волокна“ является следствием чередования правой и левой половины волокна при

намотке контура: последнему витку текущего слоя необходимо огибать „выходящее“ волокно последнего витка предыдущего слоя.

Случайные дефекты, как правило, обусловлены большим значением жесткости волокна, плохим качеством намотки волокна на транспортную катушку, ошибками укладчика и т.д. Среди них различают дефекты 1-го и 2-го рода. Дефект 1-го рода (рис. 2, 4) вызван нерегулярным смещением волокна на один или несколько витков, 2-го рода — нерегулярным смещением волокна поверх одного из предыдущих витков (рис. 2, 5).

На рис. 3 приведен пример дефекта 1-го рода.

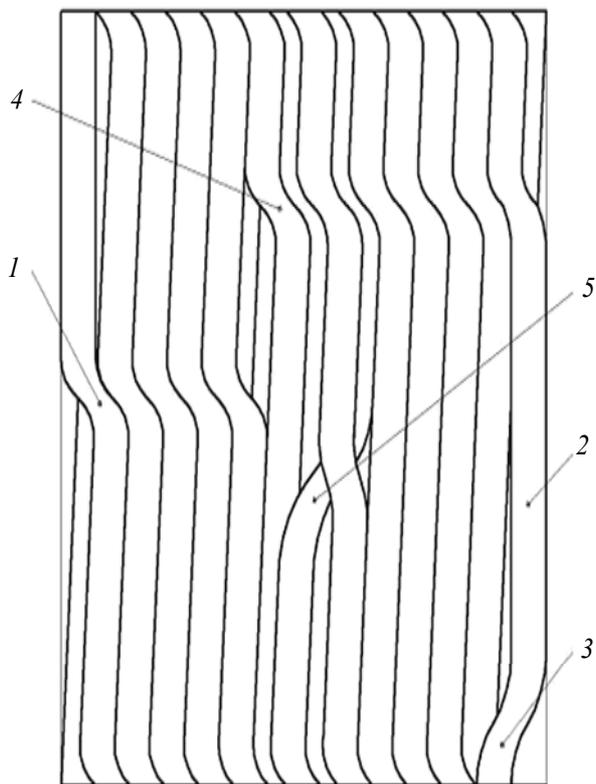


Рис. 2



Рис. 3

Наиболее значимыми причинами случайных дефектов являются жесткость волокна и качество его намотки на катушку — т.е. факторы, которые полностью не зависят от оператора. Было замечено, что при намотке контуров № 1, 3 и 6 данные условия были значительно лучше, нежели при намотке контуров № 2, 4 и 5. Как видно из рис. 1, зависимости приращенения длины слоя от номера слоя контуров второй группы характеризуются значительными скачками, которые, в конечном счете, вносят существенный вклад в неравенство длины левого и правого плеча интерферометра.

Наличие описанных дефектов в структуре квадрупольной намотки приводит, во-первых, к неодинаковому приращению длины волокна в каждом слое, вследствие чего увеличивается неравенство длины плеч ВОГ, во-вторых, к увеличению количества локальных изгибов волокна. Первое обстоятельство увеличивает зависимость контура от градиента температуры, второе — повышает рассеяние света в волноводе.

**Шаг укладки.** Длина волокна, составляющего волоконно-оптический контур, зависит от диаметра катушки и волокна, ширины катушки, шага укладки, дефектов укладки.

При намотке каждого нового слоя происходит приращение суммарного диаметра волоконно-оптического контура. В отсутствие дефектов будем иметь следующее значение диаметра контура:

$$D_{\text{кон}} = D_{\text{к}} + (2 + (N - 1)\sqrt{3})D_{\text{в}}. \quad (2)$$

Как следствие, длина волокна каждого последующего слоя будет прямо зависеть от диаметра катушки и волокна. Значения этих параметров не зависят от оператора, производящего намотку контура, в отличие от шага укладки, точная установка которого является очень важной задачей. При значении шага укладки, меньшем диаметра волокна на величину  $\Delta D$ , через  $n$  витков, где  $n = D_{\text{в}}/\Delta D$ , может произойти дефект второго рода, что существенным образом нарушит регулярность структуры волоконно-оптического контура. Установка величины шага укладки большей, чем диаметр волокна, приведет к значительно меньшим нарушениям структуры, однако в этом случае один слой контура будет вмещать меньшее число витков. Кроме того, диаметр контура будет несколько сокращен, вследствие того что витки каждого последующего слоя будут попадать в промежутки между витками предыдущего слоя. Оба фактора приведут к уменьшению длины волокна в контуре.

Как следствие, необходимо точно измерять диаметры сечений оптического волокна для увеличения длины контура в пределах установленного числа квадруполей.

**Заключение.** В ходе проведенных исследований были обработаны данные, полученные при намотке волоконных контуров, выявлены основные дефекты намотки, а также определено влияние шага укладки на параметры качества. Было установлено, что дефекты намотки приводят, во-первых, к изменению длины контура (однако в силу своего случайного характера данное изменение различается для левого и правого плеча контура), во-вторых, к увеличению количества локальных изгибов волокна и, как следствие, увеличению рассеяния света в волноводе. Кроме того, была определена природа дефектов, которая напрямую связана с особенностями волокна, оборудования и технологии намотки.

Представленные результаты могут быть использованы в дальнейшей работе по исследованию, с целью повышения, качества намотки чувствительных элементов ВОГ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Peshekhonov V. G., Nesenjuk L. P., Staroseltsev L. P. Trends in Development of Miniature Strapdown Inertial Measurement Units in CSRI Elektropribor // Symp. Gyro Technology. Stuttgart, Germany, 2000. P. 13.
2. Paturel Y., Rumoroso V., Chapelon A., Honthaas J. MARINS, the First FOG Navigation System for Submarines // Symp. Gyro Technology. Stuttgart, Germany, 2006. P. 17.
3. Kolevatov A. P., Nikolaev S. G., Andreev A. G., Ermakov V. S., Dunaev D. A., Kel O. L., Malgin N. V. Development of a Dual Mode Attitude and Heading Reference System on Fiber Optic Gyros for Land Vehicles // 13<sup>th</sup> Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems. St. Petersburg, 2006. P. 338—347.
4. Meshkovskiy I. K., Strigalyov V. I., Deineka G. B., Peshekhonov V. G., Nesenjuk L. P. A three-axis fiber-optic gyroscope for marine navigation systems // 16<sup>th</sup> Intern. Conf. on Integrated Navigation Systems. St. Petersburg, 2009. P. 7—12.
5. Шереметьев А. Г. Волоконно-оптический гироскоп. М.: Радио и связь, 1987. 152 с.
6. Мешковский И. К., Киселев С. С., Куликов А. В., Новиков П. Л. Дефекты намотки оптического волокна при изготовлении чувствительного элемента волоконно-оптического интерферометра // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 2. С. 47—51.

#### Сведения об авторах

- Игорь Касьянович Мешковский** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи; заведующий кафедрой; E-mail: igorkm@spb.runnet.ru
- Александр Алексеевич Унтилов** — канд. техн. наук; ОАО Концерн «ЦНИИ „Электроприбор“», Санкт-Петербург; начальник лаборатории; E-mail: untilov\_aa@mail.ru

- Сергей Степанович Киселев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;  
E-mail: kiselev@mail.ifmo.ru
- Андрей Владимирович Куликов** — Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи; инженер; E-mail: a.kulikov86@gmail.com
- Роман Леонидович Новиков** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;  
E-mail: novikov\_r\_l@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
измерительных технологий  
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию  
01.03.11 г.