

УДК 62

Математическое моделирование волоконно-оптических брэгговских решеток для мониторинга деформаций авиационных конструкций

Коробкова Анна Вадимовна

an200438555@gmail.com

Московский авиационный институт, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена задача повышения безопасности эксплуатации летательных аппаратов путем разработки системы мониторинга деформаций планера в реальном времени. Представлены результаты математического моделирования волоконно-оптических брэгговских решеток (ВБР) как перспективных чувствительных элементов. Показано, что применение матричного метода позволяет с высокой точностью рассчитывать спектральные характеристики как однородных, так и неоднородных ВБР. Установлены аналитические зависимости коэффициента отражения от амплитуды модуляции показателя преломления и геометрических параметров решетки. Приведены выводы о перспективности использования разработанных моделей для создания высокоточных систем диагностики состояния авиационных конструкций.

Ключевые слова: волоконно-оптические брэгговские решетки, математическое моделирование, мониторинг деформаций, матричный метод, коэффициент отражения

Введение. Обеспечение безопасности полетов является приоритетной задачей современной авиации. Одним из ключевых аспектов является контроль деформаций конструкции планера, возникающих под воздействием аэродинамических сил, температурных изменений, статических и динамических нагрузок [1]. Существующие методы расчета эксплуатационного ресурса основаны на применении завышенных коэффициентов надежности, что приводит к увеличению массы конструкции и стоимости обслуживания. Переход к мониторингу фактического состояния в реальном времени требует разработки новых высокоточных и надежных средств измерений. В качестве перспективных чувствительных элементов применяются волоконно-оптические брэгговские решетки (ВБР), обладающие малыми массой и габаритами, высокой устойчивостью к электромагнитным помехам, возможностью работы в агрессивных и пожароопасных средах, широком температурном диапазоне, пассивностью и возможностью мультиплексирования измерительной информации [2]. Целью данной работы является разработка и исследование математических моделей ВБР для точного прогнозирования их рабочих характеристик в системах мониторинга деформаций.

Методы и материалы; результаты. В работе проведен сравнительный анализ математических моделей, описывающих процессы в ВБР. Показано, что теория связанных мод [3], широко используемая для моделирования, накладывает ограничения на расчет неоднородных решеток. В связи с этим,

в качестве основного инструмента исследования был выбран матричный метод для многослойных оптических структур [4], показавший высокую точность и согласованность результатов. В основе метода лежит представление ВБР в виде последовательности N бинарных слоев с показателями преломления $n_{eff} + n_{mod}$ и n_{eff} , где n_{eff} — эффективный показатель преломления сердцевины световода; n_{mod} — амплитуда модуляции оптического излучения. Характеристическая матрица для m -го слоя имеет вид

$$M_m = \begin{pmatrix} \cos(\phi_m) & -\frac{i}{\eta_m} \sin(\phi_m) \\ -i\eta_m \sin(\phi_m) & \cos(\phi_m) \end{pmatrix},$$

где $\phi_m = \frac{2\pi}{\lambda} n_m d_m$ — фазовая толщина слоя; η_m — оптическое сопротивление. Для анализа влияния геометрии решетки введен параметр x ($0 < x < 1$), определяющий отношение ширины слоя с повышенным показателем преломления к периоду решетки Λ . Уравнение для брэгговской длины волны при этом записывается как $\Lambda_{br} = 2 \cdot ((n_{eff} + n_{mod}) \cdot \Lambda \cdot x + n_{eff} \cdot (\Lambda - \Lambda \cdot x))$.

Комплексный коэффициент отражения $r(\lambda)$ рассчитывается через элементы результирующей матрицы системы M_{Σ} . Моделирование показало, что с увеличением амплитуды модуляции n_{mod} с $2,924 \cdot 10^{-5}$ до $1,0 \cdot 10^{-4}$ коэффициент отражения на центральной длине волны 1522,485 нм возрастает с 30,9 до 95 %, а ширина спектра на уровне половинной амплитуды увеличивается с 0,165 до 0,8 нм. Установлено, что максимальный коэффициент отражения достигается при значении параметра $x \approx 0,5$, что соответствует четвертьволновой структуре. Для неоднородных ВБР, состоящих из трех последовательных решеток с периодами $\Lambda_1 = 5,189 \cdot 10^{-7}$ м, $\Lambda_2 = 5,193 \cdot 10^{-7}$ м, $\Lambda_3 = 5,197 \cdot 10^{-7}$ м. Исследована возможность подавления боковых полос в спектре отражения. Показано, что введение гауссовой огибающей профиля показателя преломления позволяет снизить уровень боковых полос с 20 до 2 % от интенсивности основных пиков. Проведено моделирование отклика ВБР на деформацию и температуру. Установлено, что сдвиг брэгговской длины волны при деформации описывается зависимостью $\Delta\lambda_{br}^{def} = \lambda_{br}(1 - p_e)\varepsilon$, где $p_e \approx 0,22$ — эффективная упругооптическая постоянная для кварцевого волокна; ε — относительная деформация. Температурная чувствительность определяется выражением $\Delta\lambda_{br}^T = \lambda_{br}(\alpha_{\Lambda} + \alpha_n)\Delta T$, где $\alpha_{\Lambda} \approx 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ — коэффициент теплового расширения; $\alpha_n \approx 6,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ — термооптический коэффициент, что подтверждает преобладание термооптического эффекта.

Заключение. В результате проведенного исследования разработан и апробирован математический аппарат на основе матричного метода, позволяющий с высокой точностью рассчитывать спектральные характеристики волоконно-оптических брэгговских решеток. Установлены количественные зависимости ключевых параметров ВБР (коэффициента отражения, ширины спектра) от ам-

плитуды модуляции показателя преломления и геометрических параметров решетки. Разработана методика синтеза неоднородных ВБР с подавленными боковыми полосами, что важно для создания многоканальных измерительных систем. Полученные аналитические зависимости для тензометрической и температурной чувствительности позволяют проводить проектирование датчиков с требуемыми точностными характеристиками. Разработанные модели и методики представляют ценность для создания новых систем мониторинга состояния авиационных и космических конструкций, основанных на принципах активной диагностики и прогнозирования остаточного ресурса.

Список источников

- [1] Коробкова А.В. *Разработка системы считывания деформации на планере во время полета. Выпускная квалификационная работа бакалавра*. Москва, МАИ, 2025, 107 с.
- [2] Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г. и др. Волоконные решетки показателя преломления и их применение. *Квантовая электроника*, 2005, т. 35, № 12, с. 1085–1103.
- [3] Erdogan T. Fiber Grating Spectra. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, vol. 15, no. 8, pp. 1277–1294. <https://doi.org/10.1109/50.618322>
- [4] Бреховских Л.М. *Волны в слоистых средах*. Москва, Наука, 1973, 343 с.