



Bruno Sapha Olivieri

**Sistema de Interrogação de Sensores a Rede de Bragg
Utilizando Multiplexação no Tempo e Multiplexação no
Comprimento de Onda**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Orientador: Jean Pierre von der Weid

Rio de Janeiro, 01 de dezembro de 2004



Bruno Sapha Olivieri

**Sistema de Interrogação de Sensores a Rede de Bragg
Utilizando Multiplexação no Tempo e Multiplexação no
Comprimento de Onda**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Dr. Jean Pierre von der Weid

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Luis Carlos Guedes Valente

GAVEA SENSORS

Dra. Adriana Lúcia Cerri Triques

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Dr. Luiz Carlos da Silva Nunes

UFF

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 01 de dezembro de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Bruno Sapha Olivieri

Graduou-se Bacharel em Engenharia Elétrica na PUC-Rio (Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro) em 2002. Tem como áreas de interesse a óptica aplicada e a radiopropagação.

Ficha Catalográfica

Olivieri, Bruno Sapha

Sistema de interrogação de sensores a rede de Bragg utilizando multiplexação no tempo e multiplexação no comprimento de onda / Bruno Sapha Olivieri ; orientador: Jean Pierre von der Weid. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

97 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Rede de Bragg em fibras ópticas. 3. Sensores ópticos. 4. Técnica de demodulação. 5. Multiplexação (TDM/WDM). I. Weid, Jean Pierre von der. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

À minha família

Agradecimentos

Aos meus orientadores Jean Pierre von der Weid e Luiz Carlos Guedes Valente pelo apoio, conhecimento transferido, incentivo e amizade.

Ao pessoal do Laboratório de Sensores a Fibra Óptica pelo apoio e amizade.

A todos funcionários e professores que me ajudaram.

A Capes pelo auxílio financeiro através da bolsa de estudos.

A Gavea Sensors, pelo apoio dado ao longo do mestrado.

Aos meus amigos, por estarem sempre comigo.

Ao bom amigo Guppyy, companheiro de todas as horas.

A minha noiva Joyce, por tudo.

A Deus.

Resumo

Olivieri, Bruno Sapha. **Sistema de Interrogação de Sensores a rede de Bragg utilizando Multiplexação no Tempo e Multiplexação no Comprimento de Onda**. Rio de Janeiro, 2004. 97p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um sistema de interrogação de sensores a rede de Bragg utilizando multiplexação no tempo e multiplexação no comprimento de onda é proposto e demonstrado. O sistema apresenta uma solução para a medição de grandezas associadas ao espectro de reflexão de redes de Bragg, possibilitando o aumento do número de sensores a rede de Bragg monitorados através de grandes distâncias em uma mesma fibra óptica, sem um aumento significativo dos custos. O aspecto inovador deste sistema reside na particular associação das seguintes características: o uso de fonte pulsada de banda larga, a disposição, em série, de um grande número de sensores a rede de Bragg de baixa refletividade, a técnica de reutilização dos mesmos comprimentos de onda nominais em grupos contendo vários sensores com comprimentos de onda nominais distintos e um processo de filtragem espectral e análise de sinais pulsados utilizando o filtro DWDM comercial. Aspectos teóricos e experimentais considerando os princípios de trabalho desta técnica são discutidos. Comparações entre resultados simulados e experimentais do sistema implantado mostram boa concordância. Resultados experimentais apontam uma faixa dinâmica de 1,7 nm, podendo encontrar aplicações em medição de temperatura com uma faixa de 150°C. Incertezas com valores médios abaixo de 20 picômetros foram obtidas. Simulações experimentais apontam a possibilidade de utilização de um número de aproximadamente 70 sensores com 0,4% de refletividade, por comprimento de onda. Considerando a largura de banda do dispositivo DWDM (1539-1565 nm) utilizado neste sistema, e um espaçamento de 7 nm por comprimento de onda nominal de sensor, extrapolações mostram que este número pode chegar a 210 sensores em três diferentes comprimentos de onda nominais de sensor. Considerando as bandas C e L este número pode chegar a aproximadamente 1000 sensores em 14 diferentes comprimentos de onda nominais de sensor.

Palavras-chave

Rede de Bragg em fibras ópticas; sensores ópticos; técnica de demodulação; multiplexação (TDM/WDM).

Abstract

Olivieri, Bruno Sapha. **Interrogation System of Fiber Bragg Grating Sensors Using Time Division Multiplexing and Waveleght Division Multiplexing**. Rio de Janeiro, 2004. 97p. Master's Thesis - Department of Electrical Engineering, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

An interrogation system of fiber Bragg grating sensors using time division multiplexing and wavelength division multiplexing is proposed and demonstrated. The system presents a solution to measure the magnitudes associated to the reflection spectrum of the fiber Bragg gratings, making possible to increase the number of the Bragg gratings sensors monitored through large distances at the same fiber optic, without a great increase in the costs. The innovative aspect of this system is the particular association of the following characteristics: the use of a pulsed broad band source, the disposition, in series, of a large number of low reflectivity Bragg gratings sensors, the reusing technique of the same nominal wavelengths in groups containing several numbers of sensors with distinct nominal wavelengths, and a spectral analyzing and filtering process of pulsed signals using a commercial DWDM filter. Theoretical and experimental aspects regarding the working principles of this technique are discussed. Comparisons between experimental and simulated results show a good agreement. Experimental results indicate that a dynamic range of 1,7 nm was obtained. It can be used in temperature measurement systems, with a 150°C range. Uncertainties equivalent to approximately 20 picometers was obtained. Experimental simulations indicate that it would be possible to use a number of approximately 70 sensors with 0,4% reflectivity at each nominal sensor wavelength. Considering the DWDM filter bandwidth (1539-1565 nm) used in this system, and a spectral separation of 7 nm by nominal sensor wavelength, extrapolations indicate that a number of 210 sensors can be obtained, in three different nominal sensor wavelength. Using the C-band and the L-band, a number of 1000 sensors can be obtained, in fourteen different nominal sensor wavelength.

Keywords

Fiber Bragg grating; optical sensors; demodulation technique; multiplexing (TDM/WDM).

Sumário

1 Introdução	15
2 Conceitos preliminares	19
2.1. Refletividade da rede de Bragg uniforme	21
2.2. Sensibilidade da rede de Bragg em função da temperatura e da deformação	22
3 Demodulação de sensores a rede de Bragg	25
3.1. Multiplexação temporal : TDM (Time Division Multiplex)	26
3.1.1. Interferência – (<i>Crosstalk</i>)	31
3.2. Multiplexação no comprimento de onda - WDM	31
3.3. Demodulação utilizando um filtro fixo	33
3.4. Demodulação utilizando dois filtros fixos	36
3.5. Modelo teórico para a demodulação utilizando dois filtros fixos	38
3.5.1. Erro de medição do comprimento de onda de Bragg	41
4 Multiplexação TDM/WDM	44
4.1. Modelo teórico do sistema implantado	48
5 Descrição do sistema implantado	52
5.1. Montagem experimental	52
6 Resultados	61
6.1. Resultados do experimento	61
6.2. Simulação de um grande número de sensores	69
6.3 Erro da curva de calibração	83
7 Conclusões	91
Referências Bibliográficas	93

Lista de figuras

Figura 2.1 - Rede de Bragg	19
Figura 2.2 - Espectro da refletividade de uma rede de Bragg homogênea como uma função do comprimento de onda	20
Figura 2.3 - Deslocamento central do comprimento de onda em uma rede em 1548,2 nm: (a) em função da temperatura; (b) em função da deformação.	24
Figura 3.1 - Perda da intensidade da luz e a deformação espectral referente a seguidas reflexões dos sensores dispostos em série	27
Figura 3.2 - Detecção das seguidas reflexões nos diferentes sensores separadas por um intervalo de tempo τ	29
Figura 3.3 - Intensidade transmitida para quatro diferentes casos, considerando o número de sensores, o percentual de refletividade e a quantidade de sensores como variáveis. (a) 40 sensores com 1% de refletividade e mesma posição espectral; (b) 100 sensores com 1% de refletividade e mesma posição espectral; (c) 100 sensores com 0,5% de refletividade e mesma posição espectral; (d) 100 sensores com refletividade variando entre 0,5 e 1% e com a posição espectral variando entre 1543,5 e 1543,7 nm;	30
Figura 3.4 - Sistema de interrogação de sensores com filtro sintonizável utilizando a técnica de WDM	32
Figura 3.5 - Configuração básica da utilização da rede de Bragg como sensor com a detecção sendo realizada com um filtro fixo, um detector de sinal e um detector de referência	33
Figura 3.6 - Sobreposição dos espectros do sensor e do filtro: será detectado um sinal com intensidade proporcional a integral da sobreposição dos espectros do filtro e do sensor	34
Figura 3.7 - Exemplo de uma curva de calibração para um sensor com a detecção sendo realizada com um filtro fixo e dois detectores: (a) as amplitudes lidas pelos detectores de sinal e referência; (b) a razão	

destas amplitudes em dB	35
Figura 3.8 - Configuração de um sistema de interrogação com dois filtros	36
Figura 3.9 - Espectro do sensor e os dois filtros	36
Figura 3.10 - Exemplo de uma curva de calibração para um sensor, detecção com dois filtros fixos: (a) as amplitudes lidas pelos detectores referentes a cada um dos filtros; (b) a razão destas amplitudes em dB	37
Figura 3.11 - Espectro de transmissão dos filtros (pico em 1540.1 nm e 1542.2 nm) e espectro refletido do sensor (pico em 1541.3)	39
Figura 3.12 - Resultados numéricos e experimentais relativos aos dois fotodetectores, V_1 e V_2 , em função do comprimento de onda do pico espectral do sensor para uma separação entre os filtros de 5nm	40
Figura 3.13 - Resultados numéricos e experimentais para a função f em função do comprimento de onda do pico espectral do sensor obtido a partir dos dados da figura 3.8	41
Figura 3.14 - Desvio para diferentes percentuais de refletividade, com 100 sensores na mesma posição espectral, 1545 nm	42
Figura 3.15 - Máximo desvio para diferentes posições do distúrbio, filtros fixos	43
Figura 4.1 - Sistema de interrogação de sensores de baixa refletividade utilizando o OTDR	45
Figura 4.2 - Espectro do laser Fabry-Perot	46
Figura 4.3 - Sistema de interrogação de grupos de sensores de baixa refletividade dispostos em série	48
Figura 4.4 - Exemplo com os espectros de reflexão de um grupo composto por cinco sensores com comprimentos de onda distintos	49
Figura 4.5 - Espectro do sensor e de dois filtros fixos do DWDM: (a) sensor em estado inicial (b) sensor sendo deformado	50
Figura 4.6 - Pulsos referentes às reflexões de sensores da mesma família de comprimentos de onda sendo detectados utilizando um par de canais de filtros fixos do DWDM: (a) sensores sem deformação; (b) o primeiro sensor da família sendo deformado: o pulso correspondente	

a este sensor diminui no canal 1 e aumenta no canal 2.	50
Figura 5.1 - Diagrama esquemático do experimento utilizado para interrogar os sensores a rede de Bragg	52
Figura 5.2 - Espectro do SLED utilizado no experimento	53
Figura 5.3 - Pulso Óptico detectado por um fotodetector amplificado	54
Figura 5.4 - (a) Espectro do amplificador óptico EDFA; (b) Espectro do SLED amplificado	55
Figura 5.5 - Espectro de reflexão dos cinco grupos de sensores	57
Figura 5.6 - Espectro dos filtros do DWDM	59
Figura 6.1 - Esquemático do sistema de interrogação de sensores de baixa refletividade montado em bancada de laboratório	61
Figura 6.2 - Exemplo da leitura feita pelo osciloscópio de um par de canais do filtro DWDM para uma família de redes.	62
Figura 6.3 - Filtros do DWDM que melhor se adaptaram ao espectro dos sensores	63
Figura 6.4 - Deformação aplicada ao sensor de prova o centrado no comprimento de onda de 1556,2 nm, do grupo 4: (a) as amplitudes lidas pelo detector; (b) a razão das amplitudes de leitura referentes aos filtros 11 e 13 do DWDM	66
Figura 6.5 - Deformação aplicada ao sensor de prova centrado no comprimento de onda de 1556,2 nm, do grupo 3: (a) as amplitudes lidas pelo detector; (b) a razão das amplitudes em dB	67
Figura 6.6 - Deformação aplicada ao sensor centrado em 1541.8 nm, grupo 4 ; a) as amplitudes lidas pelo detector referentes à luz que atravessa os filtros 2 e 4 do DWDM; (b) a razão das amplitudes em dB	68
Figura 6.7 - Repetibilidade da razão das amplitudes referentes às leituras do detector para a deformação aplicada a rede centrada em 1556,2 nm (4 medidas realizadas)	69
Figura 6.8 - Espectro normalizado das 5 redes de 5% de refletividade	70
Figura 6.9 - Espectro de transmissão da fonte normalizado após atravessar as cinco redes de 5% de refletividade localizadas espectralmente sobre o filtro do canal 11 do DWDM e os espectros	

- de transmissão dos filtros dos canais 11 e 13 do DWDM. 71
- Figura 6.10 - Espectro das 5 redes de 5% localizadas espectralmente sobre o canal 11 do DWDM e o espectro dos filtros 11 e 13 do DWDM: (a) Espectros reais; (b) Espectros simulados. 72
- Figura 6.11 - Razão das amplitudes lidas pelo detector, com 5 redes de 5% espectralmente localizadas sobre o canal CH11 – (a) experimental; (b) simulação; (c) zoom da simulação 74
- Figura 6.12 - Espectro de transmissão da fonte normalizado após atravessar as cinco redes de 5% de refletividade espectralmente centradas entre os filtros dos canais 11 e 13 do DWDM e os espectros de transmissão dos filtros dos canais 11 e 13 do DWDM. 75
- Figura 6.13 - Espectro normalizado das 5 redes de 5% centradas espectralmente entre os filtros dos canais 11 e 13 do DWDM e o espectro destes canais: (a) Espectros reais; (b) Espectros simulados. 76
- Figura 6.14 - Razão das amplitudes lidas pelo detector, com 5 redes de 5% centradas espectralmente entre o canal CH11 e o canal CH13 : (a) experimental; (b) simulação; (c) zoom da simulação 78
- Figura 6.15 - O espectro de transmissão da fonte normalizado após atravessar as cinco redes de 5% de refletividade espectralmente distribuídas entre os filtros dos canais 11 e 13 do DWDM e os espectros de transmissão dos filtros dos canais 11 e 13 do DWDM. 79
- Figura 6.16 - Espectro normalizado das 5 redes de 5% distribuídas espectralmente entre os filtros dos canais 11 e 13 do DWDM e o espectro destes canais: (a) Espectros reais; (b) Espectros simulados. 80
- Figura 6.17 - Razão das amplitudes lidas pelo detector, com 5 redes de 5% distribuídas espectralmente entre o canal CH11 e o canal CH13: (a) experimental; (b) simulação; (c) zoom da simulação 82
- Figura 6.18 - Curva de calibração do sensor 1556,2nm com as barras de erro considerando a curva da função razão na situação onde as redes de 5% estão localizadas espectralmente sobre o filtro do canal 11 do DWDM e a curva da função razão na situação onde as redes

de 5% não estão presentes 84

Figura 6.19 - Desvio do comprimento de onda para a situação onde é considerada a curva da função razão na situação onde as redes de 5% estão localizadas espectralmente sobre o filtro do canal 11 do DWDM e a curva da função razão na situação onde as redes de 5% não estão presentes: (a) experimental; (b) simulado 85

Figura 6.20 - Curva de calibração do sensor 1556,2nm com as barras de erro considerando a curva da função razão na situação onde as redes de 5% estão centradas espectralmente entre os filtros dos canais 11 e 13 do DWDM e a curva da função razão na situação onde as redes de 5% não estão presentes 86

Figura 6.21 - Desvio do comprimento de onda para a situação onde é considerada a curva da função razão na situação onde as redes de 5% estão centradas espectralmente entre os filtros dos canais 11 e 13 do DWDM, e a curva da função razão na situação onde as redes de 5% não estão presentes: (a) experimental; (b) simulado. 87

Figura 6.22 - Curva de calibração do sensor 1556,2nm com as barras de erro considerando a curva da função razão na situação onde as redes de 5% estão distribuídas espectralmente entre os filtros dos canais 11 e 13 do DWDM e a curva da função razão na situação onde as redes de 5% não estão presentes 88

Figura 6.23 - Desvio do comprimento de onda para a situação onde é considerada a curva da função razão na situação onde as redes de 5% estão distribuídas espectralmente entre os filtros dos canais 11 e 13 do DWDM, e a curva da função razão na situação onde as redes de 5% não estão presentes: (a) experimental; (b) simulado. 89

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Análise de algumas técnicas de interrogação	26
Tabela 5.1 - Especificações do SLED a uma temperatura de 20°C	53
Tabela 5.2 - Características do circulador óptico	56
Tabela 5.3 - Especificações do DWDM	58
Tabela 5.4 - Características do PINFET	60