

Lasers sintonizáveis em metrologia absoluta de distâncias para Instrumentação espacial

Alexandre Cabral, José Manuel Rebordão, Manuel Adler Abreu

Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Física, Centro de Astronomia e Astrofísica (CAAUL),
Campo Grande, Edifício C8, 1749-016 Lisboa

Alexandre.Cabral@fc.ul.pt

Resumo

A Interferometria óptica é uma das mais interessantes técnicas para a metrologia absoluta de comprimento. Sem qualquer deslocamento dos espelhos que definem os braços do interferómetro, a medição da diferença de percurso óptico (DPO) entre esses mesmos braços é feita através da utilização de um comprimento de onda sintético resultante de um varrimento na frequência óptica de um laser sintonizável, implementando-se deste modo a técnica de medida absoluta de distâncias designada por Interferometria de Varrimento de Frequência (IVF). Sensores baseados nesta técnica podem desempenhar um papel importante na cadeia metrológica de instrumentos espaciais constituídos por vários satélites independentes a trabalhar cooperativamente, cadeia esta que permite levar a configuração desde o momento em que os diversos satélites são colocados no espaço até ao instante em que estão alinhados e prontos para iniciar a sua tarefa científica.

Introdução

A metrologia de distâncias, baseada em interferometria óptica, é utilizada para um vasto conjunto de aplicações, com diferentes gamas de medição e resoluções. Em 1887, A. Michelson, em conjunto com o físico E. Morley, implementaram uma experiência com o objectivo de determinar se a velocidade da luz seria ou não independente da velocidade do observador. A experiência de Michelson-Morley e o impacto das suas conclusões, foi a semente da nova ciência da interferometria. Michelson rapidamente reconheceu o potencial da sua invenção, o interferómetro, para a instrumentação de elevada exactidão. Desde o seu início, o interferómetro tem sofrido uma série de modificações e especializações resultantes de novos desenvolvimentos, principalmente no que diz respeito à fonte de luz, como é o caso do desenvolvimento de lasers de frequência sintonizável.

A preparação de diversas missões espaciais baseadas em instrumentos constituídos por satélites independentes a trabalhar cooperativamente, nomeadamente os telescópios de abertura múltipla, fez aumentar significativamente a importância da metrologia óptica, por envolver incertezas da ordem das dezenas de micrómetro na medição de distâncias superiores à centena de metros. Nessas missões, a metrologia absoluta de comprimento é fundamental, e a IVF constitui uma das técnicas mais promissoras para desempenhar essa tarefa. A complexidade de um sensor baseado nesta técnica pode ser ajustada às especificações do sistema: quando os requisitos são modestos, a complexidade do sensor pode ser reduzida, aspecto relevante em aplicações espaciais.

A técnica existe, pelo menos, desde os anos 80 [1], mas não foi estudada extensivamente até ao recente desenvolvimento dos laser díodo de cavidade externa (LDCE) que permitem fazer uma variação controlada da frequência óptica da radiação por eles emitida sem alteração de modos.

O laser sintonizável

Os lasers sintonizáveis são dispositivos que podem ser configurados para funcionar em vários comprimentos de onda. Apesar de parecer um contra-senso, uma vez que se associa ao laser a característica de monocromaticidade, a radiação emitida por estes dispositivos não deixa de ter as características da radiação laser, nomeadamente a coerência espacial e temporal, ligadas fortemente ao conceito de pureza espectral. O que os distingue dos outros lasers é o facto de poderem ser configurados de um modo expedito para funcionar noutros comprimentos de onda e, dentro de determinados limites, manter

todas as características que os definem como laser, designadamente em termos de coerência.

A modificação das características espectrais do laser pode ser obtida por diversos processos, em particular, alterando as especificações do bombeamento eléctrico (corrente de polarização), a temperatura e, talvez de um modo mais evidente, o comprimento da cavidade ressonante.

Uma vez que as cavidades de ressonância dos lasers permitem a oscilação de vários modos longitudinais, é possível seleccionar por filtragem dentro da cavidade o modo que deve prevalecer e, desta maneira, condicionar a resposta espectral do dispositivo [2].

Estes lasers podem ser utilizados num vasto leque de aplicações, desde a espectroscopia, comunicações ópticas, a metrologia de frequências ou a metrologia de comprimentos, entre outros.

A técnica de IVF baseia-se precisamente neste tipo de lasers, em que é possível variar contínua e linearmente o comprimento de onda de emissão dentro de um intervalo de frequências ópticas que limita intrinsecamente a exactidão da medida da distância absoluta. Como será explicado mais adiante, quanto maior a gama de variação de frequência, menor será o comprimento de onda sintético que servirá para medir a distância, tendo-se deste modo uma maior resolução.

Os requisitos da técnica utilizada implicam que o laser tenha capacidade de cobrir um espectro de frequências ópticas da ordem das várias dezenas de GHz, e que permita o seu controlo a taxas da ordem das dezenas de Hertz. Para garantir que o sistema de medida não seja limitado pelo comprimento de coerência do laser, é necessário também garantir que a largura espectral seja pequena – basicamente, que a radiação tenha uma pureza espectral elevada.

A circunstância de o sistema metrológico dever ser dedicado a aplicações no espaço acrescenta mais alguns requisitos, uma vez que deverá ser necessário privilegiar configurações de pequenos volume e consumo, a par de grande flexibilidade de aplicação. Este conjunto de requisitos leva a optar por dispositivos como os lasers díodo, configurados em modo de cavidade externa.

Estes lasers de semicondutor são baseados num laser díodo em que apenas uma das faces é espelhada, sendo a cavidade completada com elementos ópticos exteriores ao dispositivo, em particular uma lente de acoplamento e um espelho parcialmente reflector. A sintonia espectral destes lasers é obtida, de um modo geral, através de um elemento dis-

persor variável na cavidade ressonante, utilizando redes de difracção, em configurações conhecidas como de Littrow ou Metcalf-Litmann [2]. É comum neste tipo de dispositivos conseguirem-se linhas espectrais com larguras da ordem do MHz, que correspondem a comprimentos de coerência da ordem de algumas centenas de metros.

Interferência e interferometria óptica – Os interferómetros de Michelson e de Fabry-Perot

Quando dois ou mais feixes de luz se sobrepõem num determinado ponto do espaço, pode ocorrer um fenómeno que dificilmente será descrito por um processo linear [5]. De facto, a composição destes feixes pode conduzir a situações em que, na zona de sobreposição, a luminosidade é superior à dos dois feixes individuais ou, em outros casos, à ausência total de luz. Este fenómeno, designado por interferência, resulta então da soma dos campos electromagnéticos das duas fontes de radiação que, desde que sejam coerentes (em que a fase relativa entre os dois campos se mantém constante ao longo de determinado período de tempo), conduzem a um processo construtivo (se as fontes de radiação estão em fase) ou destrutivo (se estão em oposição de fase).

A diferença de fase entre as duas fontes de radiação produz assim efeitos diversos no processo de interferência, dando origem a diferentes intensidades luminosas na zona de sobreposição. Este é o fenómeno por trás de todas as técnicas baseadas em interferometria. O interferómetro de Michelson é a configuração mais comum em interferometria óptica e foi inventado por Albert Michelson com o objectivo de determinar se a velocidade da luz seria ou não independente da velocidade do observador. Neste caso, um padrão de interferência é produzido pela divisão de um feixe de luz em dois caminhos, nos quais os feixes são reflectidos e enviados de volta para serem recombinados num detector (tipicamente, o mesmo elemento que faz a divisão dos feixes volta a recombiná-los). Caminhos com comprimentos diferentes dão origem a diferentes intensidades no detector e, caso esta diferença varie no tempo, serão observadas franjas de interferência temporais: um ciclo por cada variação de $\lambda/2$ na diferença entre percursos ópticos. A análise das variações desta intensidade permite assim a medida da diferença de fase e, no caso do interferómetro de Michelson, na medida da diferença do percurso óptico entre os dois feixes que estão a interferir. Como já se referiu, o processo de interferência construtiva ocorre quando os feixes que estão a interferir estão em fase. Isto acontece quando a diferença de percurso óptico entre eles seja de múltiplos inteiros do comprimento de onda λ .

No caso de um interferómetro de Fabry-Perot, a radiação oscila numa cavidade ressonante e produz franjas de interferência sempre que o comprimento de onda da radiação obedeça às condições de ressonância. No caso simples de dois espelhos planos separados de d , a condição de ressonância dá-se sempre que a frequência seja um múltiplo da Free Spectral Range que é igual a $FSR=c/(2nd)$.

Em Interferometria de Varrimento de Frequência (IVF) mede-se o valor absoluto da Diferença de Percurso Óptico (DPO) entre os dois braços de um interferómetro de Michelson [3-4]. Essa medição é realizada sem qualquer deslocamento dos espelhos que definem os braços desse interferómetro, através da geração de um comprimento de onda (CDO) sintético (muito maior que o CDO da radiação óptica portadora) resultante da variação da frequência do laser.

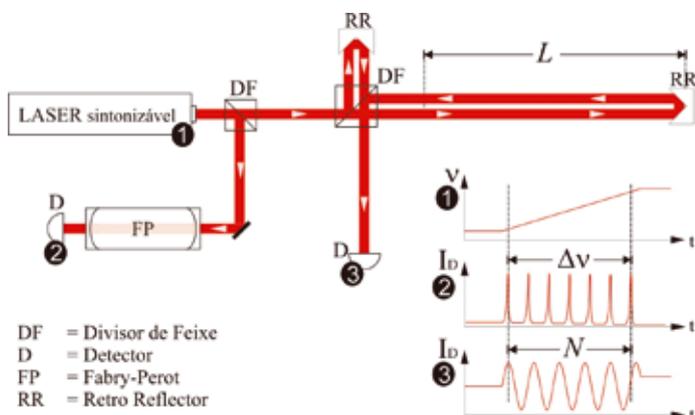


Fig. 1 - Configuração óptica de um sensor baseado em IVF e sequência temporal da frequência do laser e dos dois detectores.

À medida que se faz um varrimento na frequência do laser, um sistema de detecção conta o número de franjas sintéticas (temporais) sem ambiguidade. Ao contrário de outras técnicas, em IVF não é fundamental utilizar lasers estabilizados, sendo apenas necessário utilizar um laser sintonizável e um sistema capaz de medir a amplitude do varrimento de frequência (no nosso caso, baseado num interferómetro Fabry-Perot).

O CDO sintético Λ , obtido através da variação da frequência óptica de uma dada amplitude $\Delta\nu$, é dado por:

$$\Lambda = \frac{c}{\Delta\nu} \quad (1)$$

onde c é a velocidade da luz.

A amplitude da variação de frequência é medida através da contagem do número de ressonâncias num interferómetro de Fabry-Perot (FP). De modo a permitir o cálculo de Λ , o início e o fim da variação são determinados, respectivamente, pela primeira e última ressonância da cavidade do FP, sabendo-se que entre duas ressonâncias consecutivas a frequência variou de um *Free Spectral Range* (FSR – Banda Espectral Livre) do FP. Deste modo, a amplitude da variação é dada por:

$$\Delta\nu = r \cdot FSR \quad (2)$$

onde r é o número de FSR detectados (número de ressonâncias menos 1). A partir de (1) e (2) obtemos:

$$\Lambda = \frac{c}{r \cdot FSR} \quad (3)$$

À medida que a frequência vai variando, o sistema de de-

tecção conta o número total de períodos de franjas sintéticas (N), não necessariamente inteiro, desde o início até ao fim do varrimento. A distância medida, metade da Diferença de Percurso Óptico (DPO) entre os braços do interferómetro, é dada por:

$$L = \frac{N}{2} \cdot \frac{\Lambda}{n} = \frac{N}{2} \cdot \frac{c}{r \cdot FSR \cdot n} \quad (4)$$

onde n é o índice de refração do meio de propagação.

A Fig. 1 mostra a configuração óptica de um sensor baseado em IVF e a evolução temporal da frequência do laser (1), das ressonâncias no detector do FP (2) e das franjas sintéticas no detector do interferómetro de Michelson (3).

Aplicação de IVF à metrologia espacial

Como exemplo de aplicação de IVF à metrologia espacial, iremos descrever dois protótipos, distintos nas suas características, implementados à medida para as missões DARWIN (Fig. 2) e PROBA3 (Fig. 3) da Agência Espacial Europeia (ESA).



Fig. 2 - Concepção artística da missão Darwin na sua primeira configuração. (© ESA)



Fig. 3 - Concepção artística da missão PROBA3. (© ESA)

Metrologia absoluta para a missão DARWIN

A missão DARWIN foi um estudo da ESA (terminado em 2007¹) que tinha como objectivo a concepção de um instrumento baseado numa constelação de satélites para a procura de planetas idênticos à Terra. A configuração inicial (alterado durante o estudo) era constituída por um satélite central no meio de um hexágono cujos vértices continham seis telescópios com cerca de 1,5 m de diâmetro, todos voando em formação, distando do satélite central entre 50 m e 250 m. Deste modo, seria possível obter imagens de elevada resolução à custa da grande abertura sintética.

Um dos maiores desafios tecnológicos deste instrumento era o sistema de metrologia que garantia o controlo da constelação [6]. Os requisitos da metrologia absoluta exigiam um sistema capaz de medir a uma taxa de 10 Hz a diferença de distâncias entre pares de telescópios (diagonalmente opostos) e o satélite central, de forma a torná-la inferior a 10 μm . No âmbito do projecto *High Precision Optical Metrology* (HPOM, Metrologia Óptica de Elevada Exactidão) da ESA, foi desenvolvido um protótipo de IVF como sensor de metrologia absoluta. Sendo o objectivo a equalização das distâncias entre os telescópios e o satélite central, como já foi referido, o importante é medir a diferença de distâncias. A Figura 4 mostra a configuração óptica do sensor para medir a diferença de distâncias entre um par de telescópios. O laser, o FP e todos os elementos ópticos estão localizados no satélite principal, e os espelhos retro-reflectores, que definem os braços do interferómetro, são colocados um em cada telescópio. Desta forma, a DPO deste interferómetro corresponde ao dobro da diferença entre telescópios. Note-se que, embora as distâncias entre telescópios e satélite central possam variar até 250 m, a diferença entre tais distâncias será sempre inferior a 1 m.

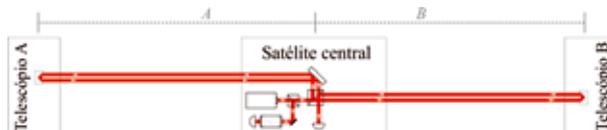


Fig. 4 - Configuração óptica para medição da diferença de distâncias entre os telescópios e o satélite central (A-B).

Neste protótipo (Figura 5) foi utilizado um laser LDCE a radiar nos 633 nm capaz de uma amplitude de variação de frequência de 150 GHz (variação de λ de 0,2 nm), correspondendo a um CDO sintético de aproximadamente 2 mm. A variação de frequência ocorre durante 50 ms, permitindo uma taxa de medição de 20 Hz. A cavidade do FP é estabilizada em temperatura e tem um FSR de 1 GHz. Os diversos sinais são totalmente adquiridos e posteriormente processados (Figura 6).

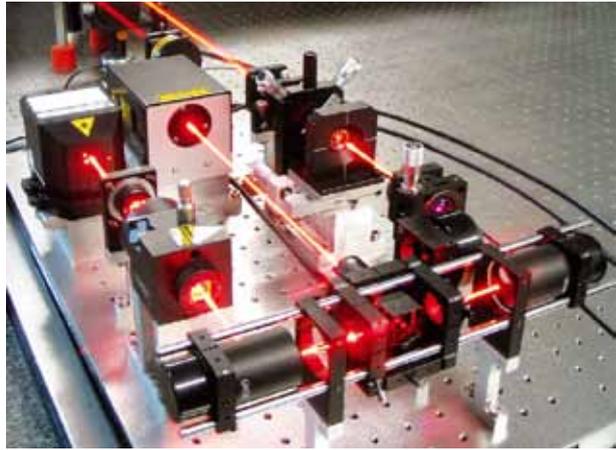


Fig. 5 - Protótipo implementado para a missão DARWIN. O feixe laser no topo esquerdo da imagem dirige-se para o divisor de feixe (não visível) que envia os dois feixes para os espelhos retro-reflectores situados nos telescópios.

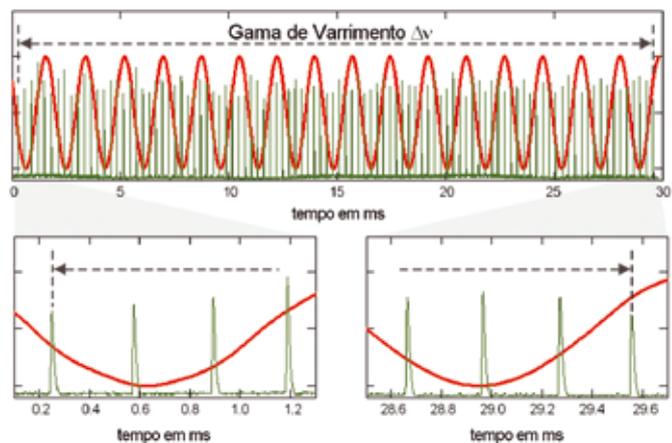


Fig. 6 - Sinais detectados em IVF: a vermelho as franjas sintéticas obtidas no interferómetro de Michelson e a verde as ressonâncias obtidas no interferómetro de FP, que vão surgindo no tempo à medida que a frequência do laser varia.

A Figura 7 mostra os resultados obtidos com este protótipo, verificando-se que para distâncias inferiores a 1 m a incerteza é sempre inferior a 10 μm , sendo mesmo inferior a 3 μm para distâncias inferiores a 100 mm [7].

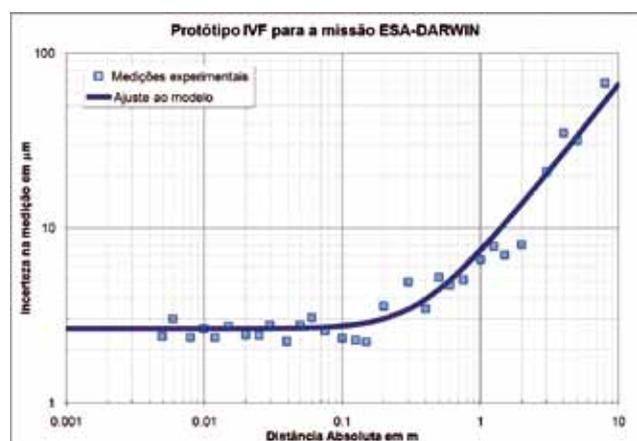


Fig. 7 - Incerteza na medição da diferença de distâncias entre telescópios para o protótipo da missão DARWIN.

¹ Na fase final do estudo, a configuração foi alterada para quatro satélites com telescópios em formação com cerca de 4 m de diâmetro cada. A ESA e a NASA chegaram a considerar uma possível colaboração em torno deste projecto que, no entanto, após a conclusão do estudo em 2007, não foi considerada para as fases seguintes.

Metrologia absoluta para a missão PROBA3

PROBA3 é a terceira de uma série de missões da ESA para a validação de novos desenvolvimentos tecnológicos para o espaço. Planeada para ser lançada em 2016, a missão PROBA3 é constituída por dois satélites e irá demonstrar algumas das tecnologias necessárias para a formação em voo de satélites, nomeadamente a metrologia absoluta de distâncias. Paralelamente, será também incluído um instrumento para observar a corona solar - um satélite vai voar na frente do Sol de forma a eclipsar o outro, revelando desta forma a corona solar.

Os dois satélites (durante a fase de demonstração da metrologia) estarão separados de 150 m, e os requisitos sobre a medida desta distância é ter uma incerteza inferior a $64 \mu\text{m}$ para uma taxa de medição de 10 Hz. Para o protótipo de demonstração definiu-se que a medida deveria ser realizada em torno dos 50 m, extrapolando depois os resultados para a distância final.

Como é facilmente observável nos resultados obtidos com o protótipo desenvolvido para a missão DARWIN, à medida que aumentamos a distância a medir, a incerteza também aumenta, consequência da propagação da incerteza no valor do CDO sintético (quanto maior a distância maior será o número de franjas sintéticas detectadas). Para ultrapassar esta limitação, introduziu-se uma fibra óptica longa no braço de referência do interferómetro de forma a reduzir a DPO medida, usando um interferómetro adicional para calibrar o percurso óptico correspondente à fibra (e que é subtraído na DPO da distância). Neste caso, o sensor passa a medir o equivalente a uma distância pequena ($<10 \text{ m}$) e, simultaneamente, o percurso da fibra que (tendo um comprimento considerado constante), é medido várias vezes, permitindo deste modo reduzir o valor da incerteza do mesmo. Neste caso, a incerteza final é determinada por duas componentes: a incerteza na medição do valor residual da distância (após subtração do comprimento da fibra) e a incerteza resultante da calibração da fibra. Neste protótipo foi utilizado um laser LDCE a radiar nos 1064 nm (para garantir a compatibilidade com outros sensores do satélite) capaz de uma amplitude de variação de frequência de 80GHz (variação de λ de 0,1 nm), correspondendo a um CDO sintético de aproximadamente 3,7 mm.

A Figura 8 mostra a implementação deste sensor em que os dois interferómetros (de medição da distância e do percurso óptico da fibra) usam o mesmo laser e FP.

Na implementação experimental do protótipo, a calibração da fibra é efectuada a cada 120 s, permitindo mais de 1000 medições do seu comprimento. A Figura 9 mostra o resultado obtido com a introdução da fibra e o que seria esperado com a configuração anteriormente implementada. A melhoria é quase de uma ordem de grandeza e a extrapolação para os 150 m permite mostrar que será possível cumprir os requisitos. Note-se que, comparativamente com a implementação anterior, a melhoria foi obtida apenas à custa da

introdução de alguns elementos ópticos adicionais e de uma fibra longa, mantendo-se deste modo a baixa complexidade do sensor [8].

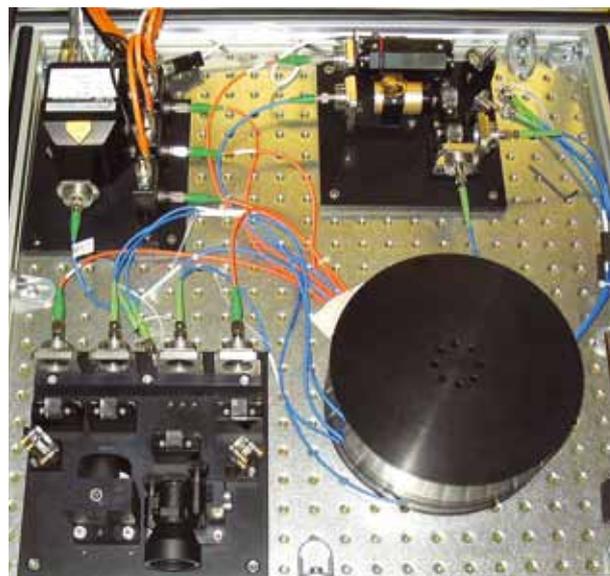


Fig. 8 - Protótipo implementado para a missão PROBA3. O sensor é constituído por 4 sub-unidades: o laser e os detectores (cima-esquerda), o interferómetro de FP (cima-direita), as ópticas que constituem os interferómetros (baixo-esquerda) e a fibra longa de referência (baixo-direita).

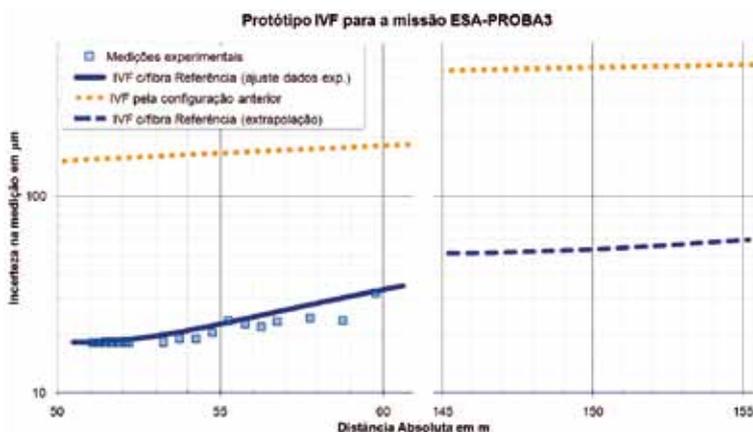


Fig. 9 - Incerteza na medição da distância absoluta entre satélites para o protótipo da missão PROBA3. Do lado esquerdo temos os resultados obtidos experimentalmente a cerca de 50 m e do lado direito e extrapolação para os 150 m.

Como conclusão, podemos constatar que foi possível construir um sensor interferométrico de elevada exactidão para uma aplicação tão exigente como é o caso da instrumentação espacial, em grande medida devido à versatilidade proporcionada pelos lasers sintonizáveis. Após 50 anos de vida, o laser tornou-se uma ferramenta que se generalizou para infinitas aplicações nas áreas científicas mais diversas. O espaço é uma das áreas onde o laser está a ser alvo de grandes desenvolvimentos, nomeadamente na sua qualificação para utilização neste ambiente específico, em vácuo e a temperaturas criogénicas.

1. H. Kikuta, K. Iwata, R. Nagata, "Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light", *Applied Optics*, 25, 2976-2980 (1986).
2. Markus-Christian Amann, Jens Buus, "Tunable Laser Diodes" Artech House (1998).
3. A. Cabral, J. Rebordão, "Absolute distance metrology with frequency sweeping interferometry", *Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements III*; Jennifer E. Decker, Gwo-Sheng Peng; Eds., 195-204, *Proc. SPIE* 5879 (2005).
4. A. Cabral, J.M. Rebordão, "Metrologia Absoluta de Comprimento por Interferometria de Varrimento de Frequência", 2º Encontro Nacional SPMET, *A Metrologia e o Crescimento Sustentado* (2006).
5. Eugene Hecht, "Óptica", (tradução portuguesa de J. M. Rebordão) 2ª edição, Fundação Calouste Gulbenkian (2002).
6. B. Calvel, I. Cabeza, A. Cabral, J. Rebordão, E. Manske, R. Sesselmann, Z. Sodnik, A. Verlaan, "High Precision Optical Metrology for DARWIN: Design and Performances", *Proceedings of the 5th International Conference on Space Optics*, SP-554, ESA (2004).
7. A. Cabral, J. Rebordão, "Accuracy of frequency sweeping interferometry for absolute distance metrology", *Optical Engineering* 46(07), 073602 (2007).
8. A. Cabral, M. Abreu, J. Rebordão, "Dual-frequency sweeping interferometry for absolute metrology of long distances", *Optical Engineering* 49, Issue 8, 085601-085601-14 (2010).

Alexandre Cabral

Nascido em 1968, licenciou-se em Física e obteve os graus de Mestre em Engenharia Física e o Doutoramento em Física respectivamente em 1993, 2000 e 2007, todos pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL).

De 1991 a 2008 foi investigador do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI), trabalhando nas áreas da instrumentação óptica para a astronomia, em metrologia óptica para o espaço e em holografia e óptica difractiva em aplicações de segurança. Em 2009 foi transferido (juntamente com o Laboratório de Óptica Lasers e Sistemas) para a FCUL onde tem dado continuidade às actividades de I&D referidas.

É membro da Sociedade Portuguesa de Física, da Society of Photo Optical Instrumentation Engineers (SPIE), da Sociedade Portuguesa do Laser Médico e da Sociedade Portuguesa de Metrologia.



José M. Rebordão

Nascido em 1956, doutorou-se em 1983 em Estrasburgo e realizou a Agregação em 1992 em Física (Óptica). É Investigador Coordenador da FCUL, coordena o Laboratório de Óptica, Lasers e Sistemas e é, actualmente, sub-director da Faculdade.

Para além da docência, desde 1985, tem realizado investigação e desenvolvimento de tecnologia em óptica e nas aplicações astrofísicas e espaciais, em particular em ópticas difractivas para segurança, navegação óptica, instrumentação óptica para o espaço, telescópios de abertura múltipla, metrologia óptica e processamento de imagens. A actividade de I&D tem sido financiado essencialmente por empresas nacionais e por organizações científicas internacionais, tais como a ESA, ESO, FP7, EUMETSAT e as agências europeias ligadas às tecnologias de defesa. É membro da Sociedade Portuguesa de Física, da Optical Society of America (OSA), da Society of Photo Optical Instrumentation Engineers (SPIE), da Sociedade Portuguesa do Laser Médico e da Sociedade Portuguesa de Metrologia.

Manuel Abreu

Nascido em 1964, é licenciado em Engenharia Física pela Universidade Nova de Lisboa (1989) e é doutorado em Engenharia Física pela Universidade Técnica de Lisboa (1996).

Trabalhou no Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI) desde

1987, como estagiário de investigação e posteriormente como investigador convidado, em áreas como óptica, optoelectrónica, metrologia óptica e lasers. É actualmente Investigador Convidado do Departamento de Física – Laboratório de Óptica Lasers e Sistemas e do Centro de Astronomia da Universidade de Lisboa.

Tem estado envolvido em actividades relacionadas com o desenvolvimento de sistemas de instrumentação óptica e fotónica para aplicações de metrologia, radar e lasers, no contexto de projectos financiados pela ESA, ESO, EDA e indústria.

É actualmente responsável por um projecto financiado pela ESA, relacionado com a utilização de lasers com bloqueamento de modo e pentes de frequência para aplicações de metrologia no espaço.

