

# METROLOGIA ABSOLUTA DE COMPRIMENTO POR INTERFEROMETRIA DE VARRIMENTO DE FREQUÊNCIA

Cabral, Alexandre; Rebordão, José Manuel

INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação  
Estrada do Paço do Lumiar, 1649 – 038 Lisboa, PORTUGAL  
Laboratório de Apoio às Actividades Aeroespaciais – LAER

Palavras-chave: Interferometria de Varrimento de Frequência, Metrologia de Comprimento, Metrologia Óptica, Lasers Sintonizáveis.

## RESUMO

*A interferometria óptica coerente é uma das mais interessantes técnicas para a metrologia absoluta de comprimento. Sem qualquer deslocamento dos espelhos que definem os braços do interferómetro, as medições são feitas sem ambiguidade, através da utilização de um comprimento de onda sintético resultante de um varrimento na frequência óptica.*

*Sensores baseados em Interferometria de Varrimento de Frequência podem desempenhar um papel importante em metrologia dimensional. Refira-se, como exemplo, a sua utilização na monitorização de distâncias em topografia, calibração de máquinas ferramenta e outras requerendo elevada exactidão e na cadeia metrológica de instrumentos espaciais constituídos por vários satélites independentes a trabalhar cooperativamente (em que este trabalho incidiu).*

*Apresentam-se princípios, arquitectura, implementação e testes de um sistema de metrologia absoluta baseado em Interferometria de Varrimento de Frequência, que permite medições absolutas de poucos milímetro até dezenas de metro com incertezas de alguns micrometro até à centena de micrometro.*

## 1 - INTRODUÇÃO

O aparecimento de diversas missões espaciais baseadas em instrumentos constituídos por satélites independentes a trabalhar cooperativamente, fez aumentar significativamente a importância da metrologia óptica, por envolver incertezas entre os 10  $\mu\text{m}$  e os 10 nm<sup>[1-2]</sup>. Nessas missões, a metrologia absoluta de comprimento é fundamental, e a Interferometria de Varrimento de Frequência (IVF) apresenta-se como uma das técnicas mais promissoras para desempenhar essa tarefa.

Em IVF, de modo a medir a distância sem qualquer deslocamento dos espelhos que definem os braços do interferómetro, gera-se um comprimento de onda sintético muito maior que o comprimento de onda da radiação óptica portadora.

Em IVF mede-se o valor absoluto da diferença de percurso óptico (DPO) entre os dois braços de um interferómetro de Michelson (Figura 1). A técnica existe, pelo menos, desde os anos 80<sup>[3]</sup>, mas não foi estudada extensivamente até ao recente desenvolvimento dos laser díodo de cavidade externa (LDCE)<sup>[4-6]</sup>.

A medição é baseada na geração de um comprimento de onda (CDO) sintético através da variação da frequência óptica de uma dada amplitude. À medida que se faz um varrimento na frequência do laser, um sistema de detecção conta o número de franjas sintéticas (temporais) sem ambiguidade, característica bastante importante para medições de distâncias elevadas. 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 (normalmente baseado num interferómetro Fabry-Perot).

A complexidade de um sensor baseado em IVF pode ser ajustada às especificações do sistema: quando os requisitos são modestos, a complexidade do sensor pode ser reduzida, aspecto bastante importante em aplicações espaciais.

## 2. - INTERFEROMETRIA DE VARRIMENTO DE FREQUÊNCIA

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

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

onde  $c$  é a velocidade da luz.

A amplitude da variação é medida, normalmente através da contagem de ressonâncias num interferómetro de Fabry-Perot (FP). De modo a permitir o cálculo de  $\Lambda$ , 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 o "Free Spectral Range" (FSR) do FP. Deste modo, a amplitude da variação é dada por:

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

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 detecção conta sem ambiguidade

o número total de períodos de franjas sintéticas ( $N$ ), não necessariamente inteiro, desde o início até ao fim do varrimento. A distância medida (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.

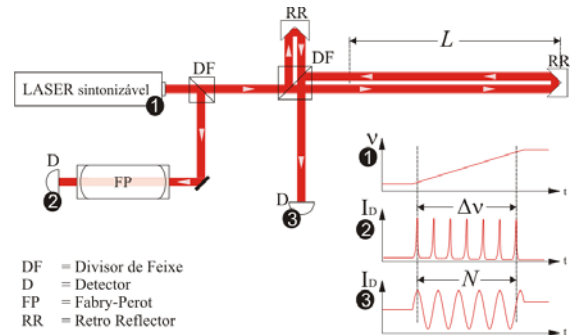


Figura 1 – Configuração óptica de sensor baseado em IVF.

## 3. - IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL DE IVF

A implementação experimental do protótipo de IVF teve como objectivos:

1. Desenvolver um sensor absoluto de distância baseado em IVF para uma missão espacial, capaz de medir a DPO entre pares de sub-telescópios de um interferómetro de abertura múltipla com uma incerteza inferior a 10  $\mu m$ .
2. Validar o modelo de incerteza do sensor desenvolvido para a definição e optimização das especificações do sensor.

A Figura 2 mostra o esquema de implementação da metrologia absoluta para a medição da DPO entre um par de sub-telescópios.

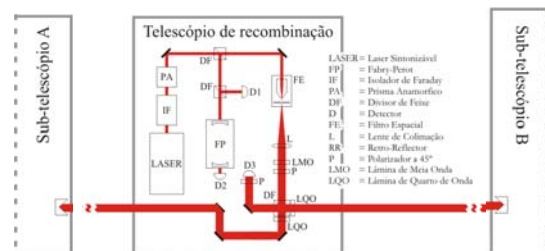


Figura 2 – Esquema de implementação da metrologia absoluta baseada em IVF.

Neste protótipo foi utilizado um laser ECDL capaz de uma amplitude de variação de 150 GHz, correspondendo a um CDO sintético de aproximadamente 2 mm. A variação de frequência tem uma duração de 50 ms, permitindo uma taxa de medições de 20 Hz. Os diversos sinais são totalmente adquiridos e posteriormente processados.

Um isolador de Faraday (IF) impede que radiação rectro reflectida volte a entrar na cavidade do laser ECDL, e um prisma anamórfico (AP) circulariza o feixe elíptico. O feixe é dividido em dois no primeiro divisor de feixe (DF): uma parte é reflectida para os subsistemas de monitorização da potência (detector D1) e de medição do varrimento de frequência (FP e detector D2) e o restante é transmitido para o interferómetro, após ser filtrado (FE) e colimado (L). No interferómetro, definido pelos retro-reflectores (colocados nos sub-telescópios), a luz é manipulada por um conjunto de lamina de atraso e polarizadores de modo a otimizar a potência disponível. Após reflexão nos RR, os feixes são recombinados e feitos interferir no detector D3. Para detectar as franjas sintéticas, utilizou-se uma detecção homodina.

Durante a medição, enquanto o laser varre a frequência, os sinais dos três detectores (monitorização da potência para normalização dos sinais, FP e interferómetro) são adquiridos simultaneamente. Depois do processamento dos sinais adquiridos, obtém-se o número de franjas por ressonância  $N/r$ .

O controlo do sensor, a aquisição de sinal e o processamento são feitos por uma aplicação desenvolvida em Labview™. A Figura 3 mostra um exemplo das franjas sintéticas adquiridas (após normalização com o sinal da monitorização da potência) e as ressonâncias do FP.

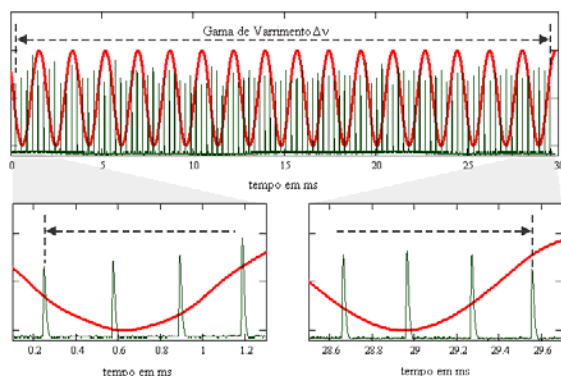


Figura 3 – Franjas sintéticas e ressonâncias adquiridas num sensor de IVF.

Para obter a distância absoluta a partir dos dados usando (4), o processamento terá de:

1. definir a gama de varrimento, escolhendo a ressonância inicial e a final;
2. determinar a gama de varrimento medindo o número de ressonâncias dentro da gama;
3. medir o número de franjas sintéticas (parte inteira e fraccional) dentro da gama de varrimento;
4. calcular o número de franjas por ressonância.

O processamento de dados pode ser mais eficiente se todos os dados disponíveis forem usados. Ao invés de medir apenas  $N$  e  $r$  para obter  $N/r$ , podemos medir o número de franjas  $N_i$  para cada ressonância  $r_i$  e determinar  $N/r$  usando uma regressão linear com todos os pontos. Deste modo, aumenta-se a exactidão na medição torna-se o procedimento mais robusto a erros (fazem-se medições para várias dezenas de ressonâncias e não apenas em duas).

A Figura 4 mostra uma imagem do sistema óptico do protótipo implementado. O laser sintonizável é um ECDL capaz de realizar um varrimento de frequência (sem saltos de modos) até 150 GHz (TBL-7000 da NewFocus numa configuração Littman-Metcalf radiando nos 633 nm). O FP é estabilizado em temperatura e têm um FSR de 1 GHz (FP confocal da TOPTICA).

O FSR do FP foi calibrado, usando o próprio sensor e uma mesa de translação, com um método desenvolvido no INETI, capaz de ser reutilizado no espaço<sup>[7]</sup>.

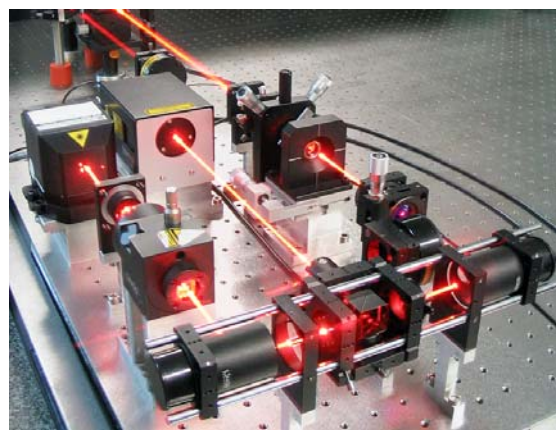


Figura 4 – Montagem do sistema óptico do protótipo experimental de IVF.

#### 4. - BALANÇO DE INCERTEZA

O valor da incerteza expandida apresentado foi determinado considerando as seguintes componentes<sup>[8]</sup>:

- desvio padrão experimental da média de 100 medições do número de franjas sintéticas  $N$  (componente tipo A);
- incerteza correspondente à determinação da parte fraccional de  $N$ ;
- incerteza correspondente à determinação do número  $r$  de FSR do FP;
- incerteza no valor da FSR do FP;
- incerteza no valor do índice de refração do meio de propagação;

A componente da incerteza respeitante à medição da parte fraccional de  $N$  é igual a 1/400, correspondendo a um majorante determinado após a realização de um número exaustivo de medições.

A componente da incerteza na determinação do número  $r$  de FSR do FP é igual a 1/3000 (majorante). Este valor depende da *Finesse* do FP (razão entre o valor da FSR e a largura a meia altura ressonância) e da exactidão com que o processamento de sinal localiza a posição do máximo da ressonância.

A componente de incerteza do valor da FSR do FP corresponde ao resultado da calibração do FP (método desenvolvido no INETI)<sup>[7]</sup>.

A incerteza no valor do índice de refração do meio de propagação corresponde a um majorante, calculado considerando a influência da temperatura ambiente, pressão atmosférica e humidade relativa na variação do índice de refração do ar (a partir da equação de Edlén para o índice de refração do ar<sup>[9]</sup>).

Para a componente de incerteza relativa à frequência de excitação, utilizou-se o valor majorante de 10 mHz.

Na Figura 5 são mostrados os balanços de incerteza para os três casos acima referidos. De salientar que o peso da componente Tipo A foi sempre inferior a 1%. Os resultados são dominados apenas por duas componentes, com pesos diferentes consoante o valor da distância a medir:

- Para distâncias inferiores a 125 mm domina a componente relativa à determinação da parte fraccional de  $N$ ;

- Para distâncias superiores a 750 mm domina a componente relativa à determinação da parte fraccional de  $N$ ;
- Para distâncias intermédias, ambas as componentes influenciam o valor da incerteza expandida.

Distância Medida L = 0.005 m					
Quantidade	Estimativa	Tipo de Avaliação / Distribuição	Incerteza padrão [u (k)]	Coefficiente de sensibilidade [s]	Componente quadrática [s <sup>2</sup> u(k)]
Incerteza em $N$	2.50E-03	B / rectangular	1.44E-03	$\frac{1}{2} \frac{c}{FSR \cdot r \cdot n}$	1.03E-03 m
Desvio padrão experimental da média das medições de $N$	8.23E-05	A / normal	8.23E-05	$\frac{1}{2} \frac{c}{FSR \cdot r \cdot n}$	1.03E-03 m
Incerteza em $r$	3.33E-04	B / rectangular	1.92E-04	$-\frac{1}{2} \frac{c}{FSR^2 \cdot r^2 \cdot n}$	-3.44E-05 m
Incerteza em FSR	5.00E+03 s <sup>-1</sup>	B / normal	5.00E+03 s <sup>-1</sup>	$-\frac{1}{2} \frac{c}{FSR^2 \cdot r \cdot n}$	-4.98E-12 m/s
Incerteza em $n$	1.00E-05	B / rectangular	5.77E-06	$-\frac{1}{2} \frac{c}{FSR \cdot r \cdot n^2}$	-3.44E-05 m
Incerteza combinada, $U_c (y) =$					Σ 2.22E-12 m <sup>2</sup>
Factor de expansão, $k =$					2
Incerteza expandida, $U =$					3.0E-06 m
Incerteza expandida, $U =$					600 μm/m

Distância Medida L = 0.30 m					
Quantidade	Estimativa	Tipo de Avaliação / Distribuição	Incerteza padrão [u (k)]	Coefficiente de sensibilidade [s]	Componente quadrática [s <sup>2</sup> u(k)]
Incerteza em $N$	2.50E-03	B / rectangular	1.44E-03	$\frac{1}{2} \frac{c}{FSR \cdot r \cdot n}$	1.03E-03 m
Desvio padrão experimental da média das medições de $N$	1.68E-04	A / normal	1.68E-04	$\frac{1}{2} \frac{c}{FSR \cdot r \cdot n}$	3.01E-14 m <sup>2</sup>
Incerteza em $r$	3.33E-04	B / rectangular	1.92E-04	$-\frac{1}{2} \frac{c}{FSR^2 \cdot r^2 \cdot n}$	-2.07E-03 m
Incerteza em FSR	5.00E+03 s <sup>-1</sup>	B / normal	5.00E+03 s <sup>-1</sup>	$-\frac{1}{2} \frac{c}{FSR^2 \cdot r \cdot n}$	-3.00E-10 m/s
Incerteza em $n$	1.00E-05	B / rectangular	5.77E-06	$-\frac{1}{2} \frac{c}{FSR \cdot r \cdot n^2}$	-2.07E-03 m
Incerteza combinada, $U_c (y) =$					Σ 4.65E-12 m <sup>2</sup>
Factor de expansão, $k =$					2
Incerteza expandida, $U =$					4.3E-06 m
Incerteza expandida, $U =$					14 μm/m

Distância Medida L = 8.0 m					
Quantidade	Estimativa	Tipo de Avaliação / Distribuição	Incerteza padrão [u (k)]	Coefficiente de sensibilidade [s]	Componente quadrática [s <sup>2</sup> u(k)]
Incerteza em $N$	2.50E-03	B / rectangular	1.44E-03	$\frac{1}{2} \frac{c}{FSR \cdot r \cdot n}$	1.03E-03 m
Desvio padrão experimental da média das medições de $N$	2.31E-03	A / normal	2.31E-03	$\frac{1}{2} \frac{c}{FSR \cdot r \cdot n}$	5.66E-12 m <sup>2</sup>
Incerteza em $r$	3.33E-04	B / rectangular	1.92E-04	$-\frac{1}{2} \frac{c}{FSR^2 \cdot r^2 \cdot n}$	-5.52E-02 m
Incerteza em FSR	5.00E+03 s <sup>-1</sup>	B / normal	5.00E+03 s <sup>-1</sup>	$-\frac{1}{2} \frac{c}{FSR^2 \cdot r \cdot n}$	-7.98E-09 m/s
Incerteza em $n$	1.00E-05	B / rectangular	5.77E-06	$-\frac{1}{2} \frac{c}{FSR \cdot r \cdot n^2}$	-5.52E-02 m
Incerteza combinada, $U_c (y) =$					Σ 1.72E-09 m <sup>2</sup>
Factor de expansão, $k =$					2
Incerteza expandida, $U =$					8.3E-05 m
Incerteza expandida, $U =$					10 μm/m

Figura 5 – Balanços de Incerteza para as medições a 5 mm (cima) 300 mm (meio) 8 m (baixo).

A Figura 6 mostra os resultados obtidos para a incerteza expandida para medições de distância absoluta desde 5 mm a 8 m.

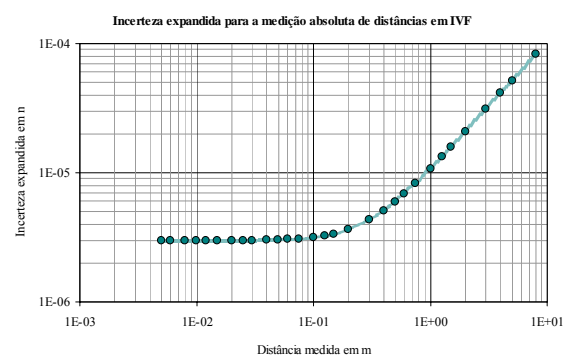


Figura 6 – Incerteza expandida para medições de distância absoluta desde 5 mm a 8 m com IVF.

## 5. - MEDIÇÃO ABSOLUTA DE DISTÂNCIAS NO ESPAÇO

Para a medição absoluta de distâncias com IVF no espaço, não é realista considerar que durante o varrimento de frequência (algumas dezenas de milissegundos) essa distância é constante. Se durante a medição a distância variar, é necessário determinar qual a influência dessa variação na medida final. Designe-se essa variação da distância durante a medição por deriva.

Quando ocorre deriva durante o varrimento de frequência, dois fenómenos contribuem para o aparecimento de franjas (temporais) no detector: 1. a variação da frequência (gerando franjas sintéticas, como por exemplo  $\Lambda = 2$  mm) e 2. a deriva (gerando franjas ópticas, com  $\lambda = 632,8$  nm). É impossível distinguir entre estes dois tipos de franjas e, como consequência, as franjas ópticas vão ser interpretadas como franjas sintéticas, fazendo com que o valor da deriva seja multiplicado por um factor de ampliação  $\Lambda/\lambda$ , como é mostrado na equação (6). Ao medir uma distância  $L$ , se existir uma deriva com amplitude  $\Delta L_{\text{deriva}}$ , o número total de franjas detectadas é dado por:

$$N = \frac{2 \cdot n}{\Lambda} \cdot L + \frac{2 \cdot n}{\lambda} \cdot \Delta L_{\text{deriva}} \quad (5)$$

Nesta equação, a influência da deriva nas franjas sintéticas e a influência da variação de CDO nas franjas ópticas foi desprezada pois a sua contribuição para o número de franjas é várias ordens de grandeza inferior à das parcelas indicadas. Com deriva, a distância é dada por:

$$L = N \cdot \frac{\Lambda}{2 \cdot n} - \Delta L_{\text{deriva}} \cdot \frac{\Lambda}{\lambda} \quad (6)$$

Se a deriva for desprezada, não se fazendo qualquer tipo de compensação, o segundo termo de (6) corresponde a um erro na medição que, não sendo possível medir tem de ser adicionado à incerteza. Como exemplo, para um varrimento de 50 GHz ( $\Lambda \approx 6$  mm) no visível ( $\lambda \approx 600$  nm), o factor de ampliação é  $\approx 10\,000$ ; uma deriva de apenas 1 nm introduz um erro de 10  $\mu$ m na medição final.

Depending on requirements, drift may or may not be negligible and must be either reduced (control) or measured (compensation).

Um sistema independente de metrologia relativa pode sempre medir o valor da deriva, e deste modo solucionar o problema, no entanto, esta solução iria aumentar significativamente a complexidade do sistema, pondo em risco a sua validade para aplicações espaciais.

Se pudermos assumir que, durante o varrimento (dezenas de milissegundos), a velocidade da deriva é constante, a influência da deriva pode ser removida efectuando duas medidas consecutivas com diferentes valores de duração de varrimento ( $\Delta t$ ) e/ou gama de varrimento ( $\Delta v$ ). Para uma velocidade de deriva  $V$  constante, a equação (6) pode ser escrita da forma:

$$L = N \cdot \frac{\Lambda}{2 \cdot n} - \text{sinal}(\Delta v) \cdot V \cdot \Delta t \cdot \frac{\Lambda}{\lambda} \quad (7)$$

onde  $\text{sinal}(\Delta v)$  é o sinal da variação da frequência (+ para um varrimento de frequência crescente e - para um decrescente). Para duas medições consecutivas, 1 e 2 temos:

$$\begin{cases} L_1 = N_1 \cdot \frac{\Lambda_1}{2 \cdot n} - \text{sinal}(\Delta v_1) \cdot V \cdot \Delta t_1 \cdot \frac{\Lambda_1}{\lambda} \\ L_2 = N_2 \cdot \frac{\Lambda_2}{2 \cdot n} - \text{sinal}(\Delta v_2) \cdot V \cdot \Delta t_2 \cdot \frac{\Lambda_2}{\lambda} \\ L_2 = L_1 + V \cdot \Delta t_3 \end{cases} \quad (8)$$

onde  $\Delta t_3$  representa o intervalo de tempo entre o fim da primeira e o fim da segunda medição. A velocidade da deriva e o valor corrigido da distância absoluta para a segunda medição são obtidos a partir de (8) e (3):

$$\begin{cases} V = \frac{\lambda}{2 \cdot n} \cdot \frac{\left( \frac{N_2}{r_2} - \frac{N_1}{r_1} \right)}{\left( \Delta t_3 \cdot \frac{FSR}{c} \cdot \lambda \right) + \left( \text{sinal}(\Delta v_2) \cdot \frac{\Delta t_2}{r_2} - \text{sinal}(\Delta v_1) \cdot \frac{\Delta t_1}{r_1} \right)} \\ L_2 = \frac{c}{r_2 \cdot FSR} \cdot \left( \frac{N_2}{2 \cdot n} - \text{sinal}(\Delta v_2) \cdot V \cdot \frac{\Delta t_2}{\lambda} \right) \end{cases} \quad (9)$$

Estas equações são exactas desde que a velocidade da deriva se mantenha constante durante as duas medições, condição fácil de obter numa aplicação espacial do sensor.

De modo a testar este método de compensação, introduziu-se uma mesa de traslação piezo-eléctrica numa dos retro-reflectores para simular a deriva.

Uma análise ao modelo matemático, considerando as componentes de incerteza indicadas anteriormente, mostrou que os melhores resultados são obtidos quando:



$\Delta v_2 = -\Delta v_1 = \text{maior gama de varrimento possível}$  e  
 $\Delta t_2 = \Delta t_1 = \text{menor duração de varrimento possível}.$

Os testes realizados mostraram que é possível atingir um nível considerável de compensação mesmo para velocidades de deriva de 2000 nm/s. Refira-se que para esta velocidade, sem compensação, o erro na medição excederia 300  $\mu\text{m}$ , quase duas ordens de grandeza superior à incerteza.

Como exemplo refira-se que, para a missão Darwin da ESA, o valor estimado para a velocidade de deriva de um satélite a voar em formação é de 100 nm/s, uma ordem de grandeza inferior às velocidades testadas.

De modo a testar a robustez do método de compensação, realizaram-se medições na presença de uma deriva com uma velocidade de variação sinusoidal de amplitude  $V = \pm 1300 \text{ nm/s}$  e um período de 1 minuto. Note-se que para uma aplicação espacial esta é certamente uma condição extrema, dificilmente atingida (até porque poria em causa o funcionamento de outros sensores do sistema de metrologia). A Figura 7 mostra os resultados obtidos para este teste. No gráfico de cima, a linha a cheio corresponde à distância real e os pontos ao resultado da medição. O erro, para a maioria dos casos, não excede os 10  $\mu\text{m}$ . Algumas medições, com erros em torno dos 20  $\mu\text{m}$ , correspondem à situação em que a aceleração é máxima e, consecutivamente, a maiores variações da velocidade da deriva durante a medição (até 10%) - note-se que o modelo só é exacto se esta velocidade se mantiver constante.

Como é mostrado, o método não é só eficaz a medir a distância como também a medir a velocidade da deriva.

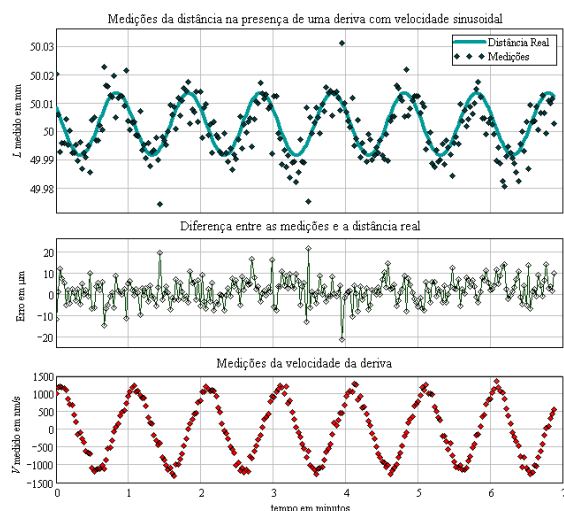


Figura 7 – Medições de distância absoluta com IVF na presença de uma deriva com velocidade sinusoidal

(cima), erro na medição da distância (meio) e medição da velocidade da deriva (baixo).

## 6 – CONCLUSÕES

O protótipo implementado foi capaz de realizar medições até 1 m com uma incerteza expandida de alguns micrómetro, mesmo na presença de deriva, a uma taxa de medição de cerca de 10 Hz, tudo isto com um grau de complexidade aceitável. As tarefas mais complexas, normalmente implementadas em electrónica dedicada, foram atribuídas ao processamento de dados.

Apresentou-se, e validou-se experimentalmente, um modelo de compensação da deriva utilizando duas medidas consecutivas.

Interferometria de Varrimento de Frequência é, portanto, uma técnica essencial para metrologia absoluta de comprimento, especialmente quando a complexidade e a robustez são parâmetros importantes, como é o caso de instrumentação para o espaço.

Por fim, refira-se que este protótipo foi já testado com bastante sucesso num demonstrador (internacional) do sistema de metrologia de um telescópio de abertura múltipla em malha fechada, constituído por um interferómetro de luz branca (que simulava o telescópio), o sistema de metrologia relativa (interferómetro de Michelson heterodino), e o sistema de metrologia absoluta aqui descrito. Nestes testes, o sensor de IVF foi capaz de medir a DPO sempre com um erro inferior a 6  $\mu\text{m}$ .<sup>[10]</sup>

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio dado pela Agência Espacial Europeia (ESA) no âmbito do projecto “DARWIN/HPOM - High Precision Optical Metrology”, pela “Western European Armaments Organisation” (WEAO) no âmbito do projecto “EUCLID/CEPA9/RTP9.9 - HROSS - High Resolution Optical Satellite Sensor”, e pela Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do projecto POCTI/FAT/41213/2001.

## REFERÊNCIAS

- [1] 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)
- [2] B. Calvel, I. Cabeza, A. Cabral, J. Rebordão, E. Manske, R. Sesselmann, Z. Sodnik, A. Verlaan, "High Precision Optical Metrology for DARWIN", 2nd International Symposium on Formation Flying Missions and Technologies, pp. 14-16, Arlington, VA, USA (2004)
- [3] H. Kikuta, K. Iwata, R. Nagata, "Distance Measurement by the wavelength shift of laser diode light", Applied Optics, 25, pp. 2976-2980 (1986)
- [4] T. Kinder, K. Salewski, "Absolute Distance Interferometry (ADI) with Grating Stabilised Tuneable Diode Laser at 633nm", Journal of Optics A, 4, pp. S364-S368 (2002)
- [5] B. Swinkels, N. Bhattacharya, A. Wielders, J. Braat, "Absolute distance metrology for space interferometers", Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV, W. Osten, C. Gorecki, E. Novak; eds., pp. 312-317, Proc. SPIE 5856 (2005)
- [6] Alexandre Cabral, José Rebordão, "Absolute distance metrology with frequency sweeping interferometry Distance Measurement by the wavelength shift of laser diode light", Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements III; Jennifer E. Decker, Gwo-Sheng Peng; Eds., pp. 195-204, Proc. SPIE 5879 (2005)
- [7] A. Cabral and J. Rebordão, "Calibration of the Fabry-Pérot free spectral range using a tunable laser in a Michelson interferometer", Opt. Eng. 45 (2006).
- [8] ISO, GUM – "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, International Organization for Standardization", Geneva, Switzerland (1995).
- [9] Birch, K.; Downs M.; "An Updated Edlén Equation for the Refractive Index of Air", Metrologia 30, 155-162, 1993.
- [10] L.Bonino, F.Bresciani, G.Piasini, M.Pisani, A. Cabral, J. Rebordão and F. Musso, "An Interferometer For High-Resolution Optical Surveillance From Geo - Internal Metrology Breadboard", in Proc. 6th Int. Conf. on Space Optics, ESA (2006)