

Demodulação de Sinal de Giroscópio a Fibra Óptica: Resultados Experimentais Utilizando Técnica de Cruzamentos de Zero

Alves, F.D.P.; De Carvalho, R.T.; Oliveira, J.E.B.

Departamento de Eletrônica Aplicada / ITA / CTA - S. J. dos Campos - SP, durante@ele.ita.cta.br,
Divisão de Fotônica / IEAv / CTA - S. J. dos Campos - SP - CEP. 12231-970, ricardo@ieav.cta.br,
Departamento de Microondas e Eletroóptica / ITA / CTA - S. J. dos Campos - SP, edimar@ita.cta.br.

Resumo. Este trabalho apresenta características experimentais de um demodulador óptico de giroscópio a fibra óptica que utiliza técnica de cruzamentos de zero e apresenta elevado potencial de miniaturização. Através da análise das componentes espectrais do sinal óptico interferométrico na saída de um giroscópio que está sendo desenvolvido no Instituto de Estudos Avançados (IEAv), Centro Técnico Aeroespacial (CTA), demonstra-se que é possível realizar demodulação analógica baseada na técnica de cruzamentos de zero. A implementação de um demodulador utilizando esta técnica permitiu concluir que é possível medir variações de fase inferior a $15\mu\text{rad}$ utilizando circuitos com componentes optoeletrônicos de baixo custo. Aspectos fundamentais dos circuitos implementados e resultados experimentais são apresentados.

Abstract. This work presents the experimental characteristics of a fiber optic demodulator which operates based on zero crossing technique and has high miniaturization potential. The analysis of the spectrum of the optical signal at the output of a gyroscope available at Instituto de Estudos Avançados (IEAv), Centro Técnico Aeroespacial (CTA), shows that it is feasible to employ analogical demodulation based on zero crossing technique. The implementation of a demodulator using this technique allowed us to conclude that phase shifting as lower as $15\mu\text{rad}$ could be detected using circuits with low cost optoelectronics components. A few key characteristics of the circuits developed as well as some experimental results are discussed.

I. Introdução

O estado da arte da tecnologia optoeletrônica e das técnicas de processamento de sinais ópticos tem possibilitado uma utilização crescente de sensores ópticos em aplicações aeroespaciais. Entre estes sensores destaca-se o giroscópio a fibra óptica (GFO) o qual possibilita a detecção de velocidade de rotação com elevada sensibilidade e fator de escala linear em uma ampla faixa dinâmica [1].

O GFO consiste essencialmente de um interferômetro do tipo Sagnac que proporciona um sinal óptico na sua saída que depende da velocidade ou ângulo de rotação do interferômetro com relação a um referencial inercial [2].

O projeto e caracterização, através de ensaios em campo de GFO, constitui área de grande interesse do IEAv/CTA, e um grupo de pesquisa dedicado a estas atividades foi consolidado nos últimos dez anos [3]. Neste trabalho apresenta-se alguns resultados experimentais obtidos na área de demodulação óptica utilizando técnica de cruzamentos de zero. A utilização do circuito de demodulação desenvolvido em um GFO disponível no IEAv proporcionou resultados comparáveis àqueles produzidos por demodulação

coerente utilizando amplificadores tipo *Lock-in*, porém com vantagens de redução de preço e miniaturização [4]. Este trabalho é constituído de quatro seções além desta introdução. Na segunda seção apresenta-se o princípio de operação do GFO através de descrição operacional de sua representação esquemática. São apresentadas ainda na segunda seção, equações básicas que descrevem o desvio de fase de Sagnac gerado por uma rotação e a função de transferência do dispositivo em função das características do modulador de fase utilizado e do desvio de fase de Sagnac. A terceira parte aborda a técnica de demodulação do sinal interferométrico através dos deslocamentos dos pontos de cruzamento de zero da parte AC da corrente na saída do fotodetector, impostos pela variação de fase de Sagnac. São discutidas a linearidade e a sensibilidade deste tipo de detecção. O circuito eletrônico de demodulação é representado esquematicamente e seus principais blocos são descritos. Resultados experimentais, obtidos utilizando-se o circuito implementado para demodular o sinal de um GFO disponível no IEAv comparativamente a resultados obtidos utilizando-se demodulação coerente, realizada com amplificadores *Lock-in*, são analisados na quarta seção. Finalmente, na quinta seção apresenta-se algumas conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

II. Princípio de Operação do GFO

A representação esquemática do GFO ilustrada na figura 1 apresenta os principais componentes optoeletrônicos de uma configuração tipo malha aberta, com entrada e saída comuns. Todos os trechos de fibra presentes no dispositivo são tipo monomodo e preservam polarização óptica [2].

Na figura 1 o sinal óptico gerado pelo laser alimenta um acoplador direcional A_1 que tem uma das saídas conectadas a um polarizador óptico. O acoplador A_1 tem diretividade igual a 3 dB e sua presença é necessária para obtenção de uma entrada e saída comum no GFO [2]. O polarizador é necessário devido a rotações de polarização geradas no acoplador ou em decorrência de imperfeições ou deformações mecânicas das fibras. O sinal de saída do polarizador ao atingir o segundo acoplador direcional, A_2 , tem sua potência decomposta em duas parcelas que propagam-se em sentidos opostos na bobina de fibra óptica. Quando o GFO é submetido a um movimento de rotação com velocidade angular Ω os sinais contrapropagantes na bobina retornam ao acoplador A_2 com fases que diferenciam entre si por uma quantidade que é proporcional a esta velocidade angular, de acordo com previsões teóricas realizados por Sagnac [5]. Os sinais contrapropagantes após propagarem-se na bobina de fibra, retornam à entrada do acoplador A_2 e subsequentemente passam pelo polarizador para finalmente retornarem ao acoplador A_1 . Este acoplador proporciona um sinal

interferométrico na entrada do circuito de detecção que é constituído de um fotodetector e um estágio amplificador. O sinal elétrico obtido na saída deste bloco alimenta um circuito de processamento eletrônico onde é realizada a medida do desvio de fase de Sagnac gerado pela rotação. Na figura 1, o modulador de fase óptica tem como função estabelecer um ponto quiescente para a função de transferência do GFO, que proporciona elevada sensibilidade com fator de escala linear [5]. Este trabalho tem como objetivo a implementação de um circuito de demodulação óptica, utilizando técnica de cruzamentos de zero e comparar os resultados obtidos com aqueles determinados através de demodulação coerente utilizando *Lock-in*, conforme ilustra a figura 1.

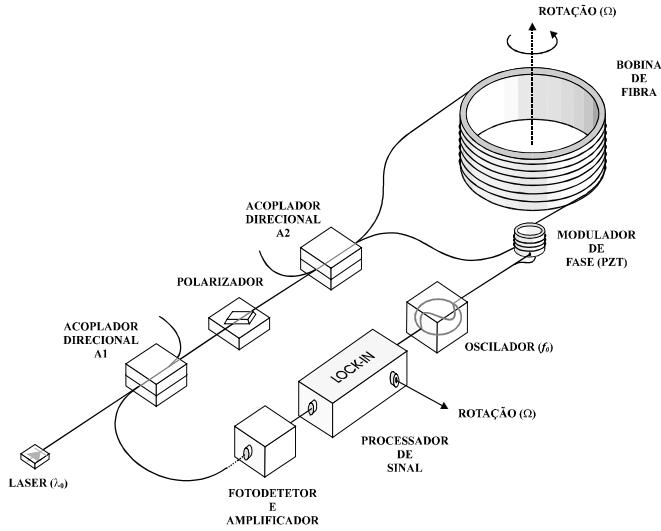


Figura 1. Representação esquemática de um GFO em configuração tipo malha aberta com entrada e saída comuns

A diferença de fase de Sagnac, ϕ_s , descrita nos parágrafos anteriores, é determinada através da seguinte expressão [4]:

$$\phi_s = \frac{2\pi L_f D}{\lambda_0 c_0} \Omega \quad (1)$$

onde D é o diâmetro da bobina de fibra, L_f é o comprimento da fibra, Ω é a velocidade de rotação e λ_0 e c_0 são respectivamente o comprimento de onda do laser e a velocidade da luz no vácuo.

Levando em consideração que o modulador óptico, mostrado na figura 1, é posicionado assimetricamente com relação aos acessos do acoplador A_2 , conclui-se que uma diferença de fase entre os sinais contrapropagantes é gerada por este modulador e pode ser expressa da seguinte forma, quando o sinal de modulação é harmônico com frequência ω ,

$$\Delta\phi(t) = \phi_m \cos(\omega t), \quad (2)$$

onde ω é a frequência de modulação gerada pelo oscilador mostrado na figura 1 e ϕ_m é o índice de modulação.

Recorrendo as equações (1) e (2), admitindo que os acopladores A_1 e A_2 apresentam diretividades iguais a 3 dB e desconsiderando as perdas nos trechos de fibra bem como nos vários "splices" representados na figura 1, obtém-se a seguinte expressão para a razão entre a intensidade óptica na saída do interferômetro, I_{out} , e a intensidade óptica do laser, I_L ,

$$\frac{I_{out}(t)}{I_L} = \frac{1}{4} \{1 + \cos[\phi_s + \phi_m \cos(\omega t)]\}. \quad (3)$$

A intensidade óptica, determinada pela equação (3) é convertida fotoeletricamente em uma corrente através de um fotodetector tipo PIN (figura 1), que é determinada através da seguinte expressão [6]:

$$i(t) = \eta \frac{e\lambda_0 A_{ef}}{hc_0} I_{out}(t) \quad (4)$$

onde A_{ef} é a área efetiva do fotodetector, e a carga do elétron, η é a eficiência quântica do fotodetector e h é a constante de Planck. Esta corrente por sua vez contém a informação de diferença de fase de Sagnac e consequentemente da velocidade de rotação.

III. Demodulação do Sinal do GFO

Existem basicamente dois métodos de demodulação do sinal do GFO, a demodulação em malha fechada e a demodulação em malha aberta, ambos discutidos em [7] e que podem ser compreendidos através do esquema apresentado na figura 1. No primeiro método, um modulador de fase optoeletrônico é acoplado à bobina de fibra do giro de modo a introduzir uma diferença de fase não recíproca entre as ondas contrapropagantes, para compensar o desvio de fase de Sagnac, ϕ_s , mantendo defasagem nula dos campos que superpõe-se na entrada do fotodetector. Esta técnica requer a utilização de um modulador faixa larga com modulação dente de serra. A diferença de fase introduzida corresponde a ϕ_s , que se deseja medir. A demodulação em malha aberta, por sua vez, utiliza a modulação descrita pela equação (2) e concentra-se na determinação direta de ϕ_s através da medida das componentes espectrais do sinal na saída do fotodetector, que usualmente é obtido utilizando dispositivos eletrônicos, digitais ou analógicos de processamento de sinal.

Ambos os métodos de demodulação podem utilizar várias técnicas para se chegar a ϕ_s . A referência [4] faz uma análise de cada um dos métodos e suas técnicas, em termos de desempenho e dificuldade de implementação óptica e eletrônica. A técnica apresentada neste trabalho consiste de uma demodulação analógica, em malha aberta.

Técnica de detecção de cruzamento de zeros. Esta técnica utiliza-se da propriedade da diferença dos intervalos de tempo determinados pelos pontos de cruzamento de zero da componente AC da corrente determinada pela equação (4), apresentarem proporcionalidade com a velocidade de rotação, a qual está submetida o GFO.

Recorrendo as equações (3) e (4), é possível realizar a expansão de $i(t)$ em termos de série de Fourier, filtrar a componente DC, e impondo a condição de baixos valores de diferença de fase de Sagnac obtém-se a seguinte expressão em termos dos harmônicos predominantes de $i(t)$,

$$i(t)_{AC} \approx -A_1 \sin \phi_s \sin \omega t + A_2 \cos \phi_s \cos 2\omega t \quad (5)$$

onde

$$A_1 = \frac{1}{4} P \eta \frac{e\lambda_0}{hc_0} J_1(\phi_m), \quad (6)$$

$$A_2 = \frac{1}{4} P \eta \frac{e \lambda_0}{h c_0} J_2(\phi_m) \quad (7)$$

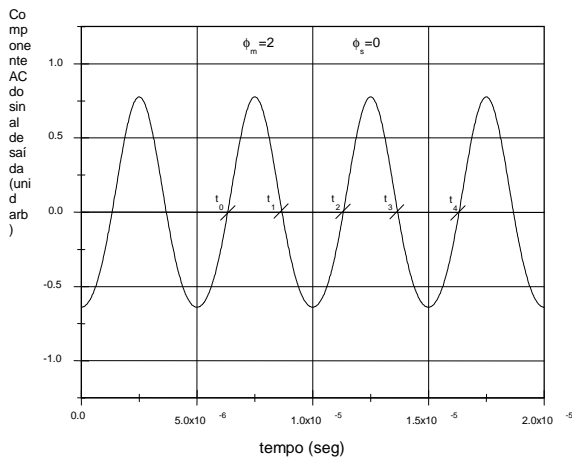
e $J_1(\phi_m)$ e $J_2(\phi_m)$ são, respectivamente, as funções de Bessel de primeira espécie de primeira e segunda ordem e $P = A_{ef} I_L$, é a potência óptica correspondente a intensidade I_L e a área efetiva A_{ef} .

A figura 2 mostra a forma de onda de $i(t)_{AC}$ para valores de ϕ_m e ϕ_s escolhidos arbitrariamente com intuito de exemplificar o efeito da sua variação em função de ϕ_s . Quando $\phi_s = 0$ ou seja, quando o interferômetro está em repouso, está presente no sinal somente o segundo harmônico. Ao se introduzir um valor não nulo de ϕ_s , ou seja uma rotação no eixo perpendicular ao plano do interferômetro, adiciona-se ao sinal o primeiro harmônico cuja amplitude varia com ϕ_s , causando um deslocamento nos pontos de cruzamento do zero ($t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, \dots$). Cabe ressaltar que $\omega t_4 = \omega t_0 + 2\pi$, devido a característica periódica do sinal. O intervalo de tempo $T_1 = (t_2 - t_1)$ aumenta ao passo que o intervalo $T_2 = (t_4 - t_3)$ diminui, ou vice-versa dependendo do sentido da rotação, porém o período $T = (t_4 - t_0)$ permanece constante. Para pequenos valores de ϕ_s , $A_1 \ll A_2$ e pode-se obter as expressões para os pontos cruzamentos de zero especificados na figura 2, no intervalo de $0 < \omega t < 2\pi$, e posteriormente determinar a diferença de intervalos de tempo δt em relação a ϕ_s ,

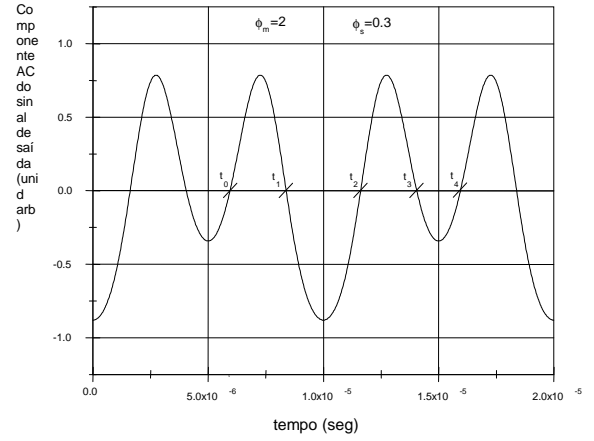
$$\delta t = (T_1 - T_2) = \frac{\sqrt{2} A_1}{\omega A_2} \phi_s = \frac{J_1(\phi_m) \sqrt{2}}{J_2(\phi_m)} \phi_s = K \phi_s \quad (8)$$

onde K dependente unicamente de ϕ_m .

A relação determinada pela equação (8) mostra o relacionamento linear entre δt e ϕ_s . Esta linearidade é limitada pela aproximação ($\sin \phi_s \approx \phi_s$), realizada para obtenção da expressão (5). Para valores de ϕ_s de até 0.05 rad a não linearidade é da ordem de 0.04%. A referência [8] discute com mais detalhes este aspecto. Além disso, a faixa dinâmica de valores de ϕ_s que se comportam de acordo com a equação (8), depende do índice de modulação ϕ_m [4].



(a)



(b)

Figura 2. Componente AC do sinal interferométrico, para $\phi_m = 2 \text{ rad}$, $\omega = 2\pi \cdot 100 \text{ kHz}$ e, (a) Sistema em repouso ($\phi_s = 0$) e (b) Sistema submetido a uma rotação ($\phi_s = 0.2 \text{ rad}$).

Demodulador Analógico. De posse da discussão anterior identifica-se um problema de medida de diferença de intervalos de tempo. A idéia básica para se realizar esta medida é carregar um capacitor C , durante o intervalo de tempo T_1 utilizando uma fonte de corrente constante I e descarregá-lo durante T_2 , utilizando outra fonte de corrente de mesmo valor e sentido oposto a primeira ($-I$). Deste modo, o nível de tensão δV , remanescente em C após um ou n ciclos completos é proporcional a δt e por sua vez proporcional a rotação. A expressão (9) mostra a relação entre a tensão remanescente no capacitor devido a δt com a diferença de fase de Saganac ϕ_s e conseqüentemente com a velocidade de rotação.

$$\delta V = n \frac{J_1(\phi_m) I \sqrt{2}}{\omega C J_2(\phi_m)} \phi_s, \quad (9)$$

Para implementar essa idéia utilizou-se um circuito com a topologia mostrada na figura 3, onde identificam-se os seguintes blocos:

- Filtro passa faixa, que recebe o sinal fotodetectado, elimina a componente DC do mesmo e filtra o ruído de frequências mais altas.
- Um detetor de cruzamentos de zero que consiste de um comparador rápido que compara o sinal com zero e entrega para o próximo bloco um trem de pulsos TTL com mesma frequência do sinal de entrada e pulsos com duração de T_1 e T_2 (figura 2).
- Uma lógica de separação de sinais, que basicamente divide a frequência por dois, gerando uma saída que contém somente pulsos de duração T_1 e outra que contém somente pulsos de duração T_2 .
- Um bloco denominado gerador de rampas que é o coração do sistema. Este contém duas fontes de corrente iguais e de sentidos opostos que são chaveadas pelos sinais do bloco anterior. Uma fonte carrega o capacitor durante o pulso de duração T_1 e a outra carrega em sentido oposto durante o tempo que contém o pulso de duração T_2 . Um pulso de *reset*, enviado pela lógica de controle, leva a

tensão no capacitor a zero depois de n ciclos onde n é o fator de escala do sinal de saída.

- e. Um *Sample-Hold* que mantém a tensão no valor máximo ou mínimo, dependendo do sentido da rotação, durante os n ciclos de carregamento do capacitor. Este bloco também é gatilhado pela lógica de controle.
- f. Um bloco que se encarrega de prover o CLK para a lógica de controle e a lógica de separação de sinais. A topologia é a mesma do bloco detector de cruzamento de zeros, porém este detecta o cruzamento de um nível DC pouco acima de zero de modo a obter um sinal TTL que contém pulsos um pouco mais largos que T_1 e T_2 .
- g. A lógica de controle basicamente conta os n ciclos de carregamento do capacitor, envia um pulso de *hold* para o *Sample-Hold* e em seguida *reseta* o capacitor.
- h. Finalmente um filtro sintonizado em baixa frequência elimina o ruído de frequências mais altas e impõe um fator de integração ao sinal.

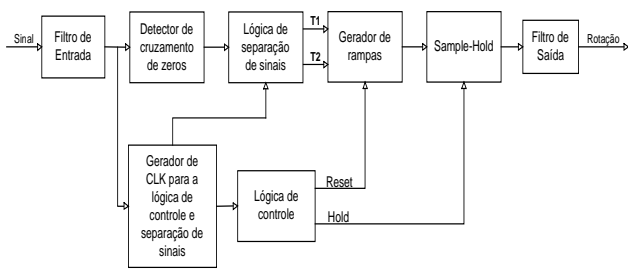


Figura 3 . Diagrama de blocos do circuito de demodulação analógica do GFO

IV. Resultados Experimentais

Um circuito com a topologia descrita na figura 3 foi implementado com componentes de baixo custo e a parte lógica foi programada num *Erasable Programmable Logic Device* (EPLD) de modo a melhorar a miniaturização.

Utilizando-se um simulador eletrônico do sinal do GFO contendo os dois primeiros harmônicos, calibrou-se o circuito e impôs-se ao mesmo degraus de δt (equação (8)). A figura 4 mostra a resposta do circuito para degraus de 450ps (parte (a)) que corresponde a um ϕ_s de $125\mu\text{rad}$, e para degraus de 90ps (parte (b)), que corresponde a um ϕ_s de $25\mu\text{rad}$. Ainda com relação a figura 4 é possível verificar que a incerteza no valor de δt é da ordem de 45ps (1σ) que corresponde a uma incerteza no valor de ϕ_s de $13\mu\text{rad}$, que é a menor fase de Sagnac que pode ser medida. É importante ressaltar que para um giroscópio com bobina de fibra de 20cm de diâmetro, 1km de fibra e comprimento de onda do laser $\lambda=780\text{nm}$, ϕ_s de $13\mu\text{rad}$ equívale a uma velocidade de rotação de $0.5^\circ/\text{h}$.

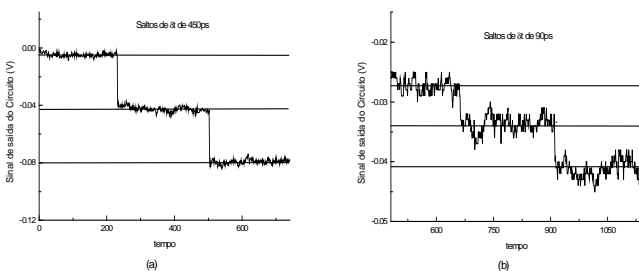
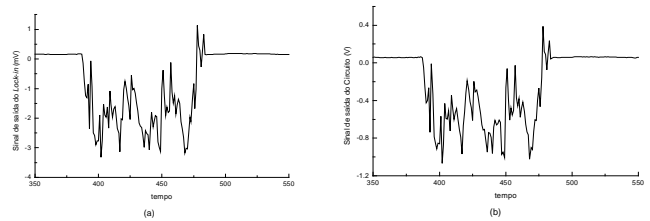


Figura 4 . Resposta do circuito demodulador desenvolvido a degraus de δt de (a) 450ps ($125\mu\text{rad}$) e (b) 90ps ($25\mu\text{rad}$).

Em seguida, conectou-se o circuito em teste a um giroscópio montado em bancada de modo que a demodulação do sinal foi realizada simultaneamente por este circuito e por um amplificador comercial tipo *Lock-in*.

A figura 5 mostra a forma de onda amostrada na saída dos dois demoduladores correspondente a deriva do circuito óptico (GFO em repouso). Este resultado valida a técnica empregada, uma vez que a menos de um fator de escala e um *offset*, os sinais provenientes da demodulação por *lock-in* (figura 5 (a)) e da demodulação do protótipo implementado (figura 5 (b)) tem a mesma forma de onda.

Figura 5 . Demodulação simultânea do sinalfo GFO em repouso,



realizada por Amplificador tipo *Lock-in* e (b) Protótipo desenvolvido.

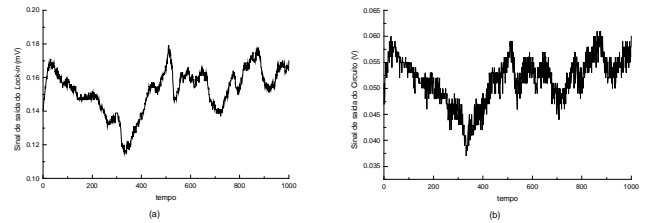


Figura 6 . Demodulação simultânea do sinal do GFO submetido a uma perturbação, realizada por (a) Amplificador tipo *Lock-in* e (b) Protótipo desenvolvido.

A figura 6 mostra as formas de onda resultantes de uma rotação manual (perturbação) da bobina de fibra. A menos de sutis diferenças causadas pelo método de amostragem da medida, a resposta é a mesma para os dois demoduladores.

O método utilizado neste trabalho apresenta limitações, principalmente no que tange a dispositivos eletrônicos, que não permitem a obtenção de resoluções muito elevadas porém algumas vantagens em relação aos métodos clássicos [7] são relevantes. O primeiro ponto é o custo, que é muitíssimo mais baixo que os demais, viabilizando seu emprego em mísseis, por exemplo, que nunca fazem um segundo voo. Outra vantagem é a compactidade, pois com alguns circuitos integrados é possível realizar a tarefa de equipamentos grandes e caros. A capacidade de detecção, atualmente da ordem de $0.5^\circ/\text{h}$ para um GFO com características citadas anteriormente, é bastante promissora e totalmente válida para algumas aplicações [9] que não exijam alta precisão, podendo o demodulador desenvolvido servir como base para sistemas comerciais.

V. Conclusões

A tecnologia de Giroscópios a fibra óptica vem sendo desenvolvida no Instituto de Estudos Avançados (IEAv) nos últimos dez anos e neste contexto se insere a demodulação do sinal deste sensor óptico. Noções sobre o princípio de funcionamento do GFO mostrou que este é

baseado no interferômetro de Sagnac e como tal utiliza técnicas de modulação em fase para melhorar a sensibilidade e precisão do sinal interferométrico. Um tratamento matemático na expressão da função de transferência do GFO, permitiu mostrar a existência de uma relação entre a diferença dos intervalos determinados pelos pontos de cruzamento de zero δt , e a fase de Sagnac ϕ_s . Esta propriedade permitiu abordar o problema de demodulação do sinal como um problema de medida de tempo. Em oposição ao processamento de sinal usual, medida da amplitude dos harmônicos utilizando amplificadores *Lock-in*, uma proposta, utilizando a técnica de cruzamentos de zero, simples e de baixíssimo custo foi implementada e experimentada. Os resultados obtidos, ou seja a capacidade de se medir a fase de Sagnac ϕ_s com valores menores que $15\mu\text{rad}$, demonstram a possibilidade de utilização da técnica de cruzamentos de zero na demodulação óptica de GFOs miniaturizados utilizados em diversas aplicações.

Ricardo T. de Carvalho - dados não disponíveis na data de publicação desta edição.

José Edimar Barbosa Oliveira recebeu o título de Doctor of Philosophy em 1986 pelo Departamento de Engenharia Elétrica da McGill University, Canadá. Mestre em Engenharia Eletrônica pelo Departamento de Circuitos e Microondas do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos e é Engenheiro Elétrico (opção Eletrônica) pela Universidade de Brasília. É professor do Instituto Tecnológico de Aeronáutica desde março de 1977, onde atualmente exerce função de Professor Titular. Tem ministrado diversos cursos em nível de graduação e de pós-graduação nas áreas de microondas e telecomunicações. Nos últimos vinte anos tem atuado intensamente na pesquisa de dispositivo para interação acusticoóptica para fins de instrumentação e de telecomunicações. O professor Edimar orientou diversas teses em nível de mestrado e doutorado e possui inúmeras publicações em periódicos e congressos nacionais e internacionais.

REFERÊNCIAS

- [1] Hotate, K.; Fiber Optic Gyros: Put a New Spin on navigation. **Photonics Spectra**, 108-112, April 1997.
- [2] Arditty, H.J.; Lefèvre, H.C. Theoretical Basis of Sagnac Effect in Fiber Gyroscope. **Fiber Optic Rotation Sensors and Related Technologies**, Berlin Springer-Verlag, 1992.
- [3] André César, S., Gaudio, V.L.B., Oliveira, J.E.B. Giroscópio a Fibra Óptica. **Anais do II Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA**, Outubro 1996.
- [4] Alves, F.P.A. **Processamento de Sinal de Giroscópio a Fibra Óptica Utilizando Técnica de Cruzamentos de Zero** (Trabalho de Graduação) Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1997.
- [5] Sagnac, G. **L'éther lumineux démontré par effet du vent relatif d'éther dans un interféromètre en rotation uniforme**. C. R. Acad. Sci., 95:708-710, 1913.
- [6] Mattei, A.L.P. **Detecção de radiação óptica em sensores a fibra** (Tese de Mestrado) Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 1997.
- [7] Burns, W.K. **Optical fiber rotation sensing**. San Diego, Academic Press, Inc., 1994.
- [8] Almeida J.C.J. **Técnicas de processamento de sinais em girômetros a fibra óptica para sistemas de navegação inercial**. (Tese de Mestrado) Universidade de Campinas, Campinas, 1996.
- [9] Chow, W.W. et al The ring laser gyro. **Reviews of Modern Physics**, 57 (1):61-104, January 1985

Fábio Durante Pereira Alves é Capitão Aviador da Força Aérea Brasileira e piloto de helicóptero com especialização em salvamento. É Engenheiro pelo Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA) e Mestre em Ciências, também pelo ITA. Atua na área de Processamento de Sinal Interferométrico e Fotônica aplicada à Guerra Eletrônica.