

Aplicação de Células Bragg Multicanal em receptores na faixa de microondas

Marcílio Alberto de Faria Pires, José Edimar Barbosa Oliveira
Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Divisão de Engenharia Eletrônica.

Resumo – O presente artigo trata da aplicação de células Bragg Multicanal em receptores na faixa de microondas. As aplicações de células Bragg em processamento óptico de sinais, tais como analisadores de espectro, moduladores espaciais e atenuadores ópticos variáveis, estão bem estabelecidas devido às suas características de desempenho. Inicialmente é tratado o efeito acustoóptico em célula Bragg monocanal e após é apresentada a célula Bragg multicanal como uma alternativa para a determinação de parâmetros importantes em sinais de microondas tais como ângulo de chegada e frequência do sinal.

Palavras-chaves – Microondas, Interação acusto-óptica, processamento óptico.

I. INTRODUÇÃO

A recepção de sinais de microondas em aplicações militares requer elevadas características de desempenho dos receptores empregados [1], tais como faixa dinâmica instantânea superior a 50 dB, sensibilidade superior a -60 dBm capacidade de operar em ambientes eletromagneticamente densos, elevada probabilidade de interceptação, resolução em frequência na faixa de poucos megahertz e determinação do ângulo de chegada (AOA – *Angle of arrival*). Existem diversas tecnologias que são possíveis de serem empregadas em tais receptores tais como os receptores a cristal vídeo, os receptores de medida instantânea de frequência (IFM – *Instantaneous frequency measurement*) e os receptores supereteródinos. Cada um desses receptores possuem vantagens e desvantagens que os qualificam para os diferentes tipos de missões a serem realizadas.

Uma outra tecnologia que vem mostrando um elevado potencial para aplicações em receptores é a acustoóptica. Os receptores que se utilizam de células Bragg, no qual o efeito acustoóptico é empregado são capazes de realizar o processamento óptico do sinal de microondas incidente nas antenas obtendo informações sobre AOA e frequência do sinal, com elevada probabilidade de interceptação e operando em ambientes eletromagneticamente densos.

II. O EFEITO ACUSTOÓPTICO

O efeito acustoóptico é a interação entre ondas eletromagnéticas, no caso um laser com uma distribuição espacial apropriada e uma onda acústica que se propaga em um meio adequado. Na figura 1 tem-se o esquema de uma

célula Bragg monocanal, na configuração de um analisador de espectro [2] (AOSA – *Acoustooptic spectrum analyser*)

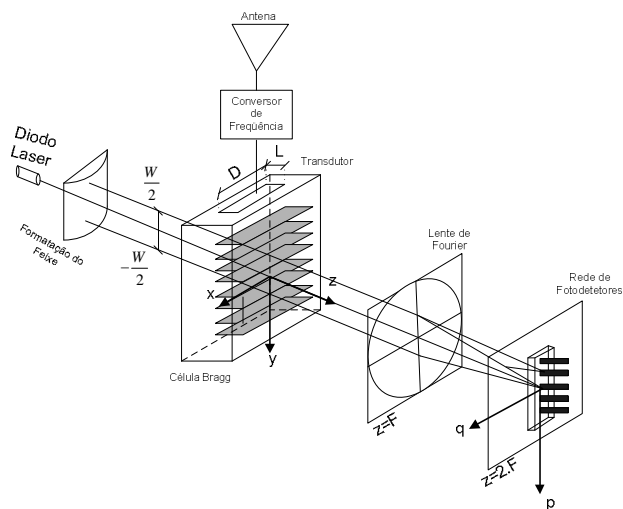


Fig 1 – Analisador de espectro acustoóptico.

A Fig.1 mostra uma montagem onde se tem uma fonte de laser que após adequadamente formatado incide em um ângulo apropriado em uma célula de material cristalino no qual se propaga uma onda acústica com a mesma frequência do sinal de microondas incidente na antena. A onda acústica gerada no interior da célula Bragg é obtida através de um transdutor piezoelétrico adequadamente dimensionado.

A coluna acústica propagando-se no interior da célula Bragg causa uma variação espacial e temporal na permissividade elétrica do material, que é matematicamente expressa através do coeficiente fotoelástico p do material.

Devido a interação acustoóptica, à saída da célula Bragg, tem-se o feixe incidente e um feixe difratado cujo ângulo de difração depende da frequência do feixe incidente. Ademais, tem-se um desvio em frequência do feixe óptico correspondente à frequência do sinal de microondas.

Uma forma de apresentar o efeito acustoóptico é a interação entre fótons e fônons que pode ser vista na figura a seguir[3].

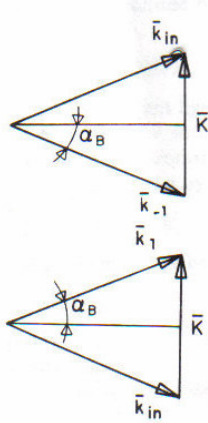


Fig. 2 – análise do efeito acustoóptico pelos vetores de onda associados.

Na Fig.2 o feixe óptico incidente é indicado pelo vetor \vec{k}_{in} , a onda acústica pelo vetor \vec{K} e o feixe óptico difratado pelo vetor \vec{k}_1 ou \vec{k}_{-1} que surgem dependendo do ângulo de incidência do feixe óptico.

Através do modelo partícula-onda de De Broglie, podemos analisar o efeito acustoóptico através da colisão de um fóton com energia $E_f = h.f_a$ e quantidade de movimento

$$p_a = \frac{h}{\lambda_a}, \text{ onde } h \text{ é a constante de Planck, } f_a \text{ é a frequência}$$

acústica e λ_a é o comprimento de onda acústica com um fóton de energia $E = h.f$ e quantidade de movimento

$$p = \frac{h}{\lambda} \text{ onde } f \text{ e } \lambda \text{ são, respectivamente, a frequência e o}$$

comprimento de onda do feixe de laser incidente.

Utilizando-se da conservação da energia e conservação da quantidade de movimento na colisão, tem-se que:

$$\vec{p}_d = \vec{p}_a \pm \vec{p} \quad (1)$$

Em (1) \vec{p}_d é o momento do fóton difratado.

Da equação de conservação de energia tem-se que:

$$\begin{aligned} E_d &= E \pm E_f \\ f_d &= f \pm f_a \end{aligned} \quad (2)$$

Observando-se que $f \gg f_a$, podemos concluir que a quantidade de movimento do fóton incidente e difratado são aproximadamente iguais e assim tem-se a situação indicada pela Fig. 3.

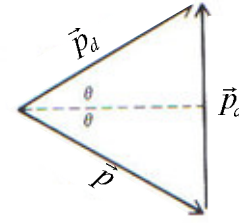


Fig.3 – Interação acustoóptica no regime de Bragg

Da Fig. 3 podemos concluir que o ângulo de Bragg θ é dado por:

$$\text{sen}(\theta) = \frac{p_a}{2.p_d} = \frac{\lambda}{2.\lambda_a}.$$

III. AS CÉLULAS ACUSTOÓPTICAS MONOCANAL

A utilização das células Bragg no modo de Bragg, no qual se tem um único feixe difratado é definido por características geométricas da célula Bragg, da frequência do sinal óptico, do índice de refração do material da célula e do comprimento de onda acústico[4]. O parâmetro utilizado é o fator Q, definido como:

$$Q = \frac{2.\pi.L.\lambda}{\lambda_a^2} \quad (4)$$

Quando este fator Q é menor do que 10, temos o regime de difração acustoóptica de Raman-Nath, na qual há várias ordens de difração. Para Q maior do que 10, tem-se o regime de Bragg. Nessas condições a célula Bragg monocanal é capaz de realizar a análise em frequência de um sinal de microondas transduzido para um sinal acústico no interior da célula.

No regime de Bragg, o número máximo de ângulos possíveis de serem resolvidos é dado pelo produto tempo-largura de faixa TW tal que:

$$M = \frac{\Delta\theta}{\lambda/L} = T.\Delta f = TW \quad (5)$$

Em (5) L é o comprimento da célula Bragg. O número de ângulos resolvíveis está diretamente ligado à resolução em frequência do receptor.

Uma forma de se apresentar o problema é recorrendo à óptica de Fourier e modelando matematicamente a transmitância complexa da célula Bragg. Inicialmente, o sinal na entrada do modulador pode ser formulado como:

$$V_{in}(t) = A(t).e^{j(2.\pi.f_a.t - \phi_0)} \quad (7)$$

A teoria de modos acoplados, utilizada para uma célula Bragg ideal na região linear de eficiência de difração permite representar a transmitância complexa da célula Bragg como:

$$T(x, y, t) = \eta \cdot L \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{D}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{y}{W}\right) A(t - t_r) e^{j(2\pi \cdot f_a \cdot t - \phi)} \quad (8)$$

Em (8) η é o coeficiente de acoplamento acusto-óptico normalizado da célula Bragg, a constante de fase

$$\phi = \phi_0 + 2\pi \cdot f_a \cdot t_r, \quad t_r = \left(\frac{2 \cdot y + W}{2 \cdot v_a}\right) \text{ e } v_a \text{ é a velocidade}$$

da onda acústica.

O campo eletromagnético é obtido pela transformada de Fourier espacial do campo eletromagnético do feixe de laser na célula Bragg, que pode ser modelado como:

$$E_y(x, y, z, t) = E_0(x, y) e^{j(2\pi \cdot f \cdot t - k \cdot z + \theta_0)} \quad (9)$$

O campo eletromagnético no plano da rede de fotodetectors é obtido pela equação:

$$e(p, q, t) = h(t) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} V_{in}(t - t_r) W(x, y) e^{j \frac{2\pi}{\lambda \cdot F} (p \cdot y + q \cdot x)} dx \cdot dy \quad (10)$$

Em (10) tem-se que:

$$h(t) = \frac{\eta \cdot L}{\lambda \cdot F} \cdot e^{j(2\pi \cdot f \cdot t + \theta_0 - 4\pi \cdot \frac{F}{\lambda})} \quad (11)$$

$$W(x, y) = E_0(x, y) \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{D}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{y}{W}\right)$$

Em (10) e (11), λ é o comprimento de onda do laser, F é a distância focal da lente de Fourier utilizada, p e q são as coordenadas cartesianas no plano da rede de fotodetectors, que foram colocados no plano de Fourier e L é a dimensão do transdutor na direção de propagação do feixe óptico.

Realizando a integral proposta em (10), tem-se que o campo eletromagnético no plano de Fourier é dado por:

$$E_y(p, q, t) = A(t - \tau) e^{j[2\pi(f_0 + f_a)t - \phi_0 - 2\pi \cdot f_a \cdot \tau + \phi_0]} \cdot \frac{E_0 \cdot \eta \cdot L \cdot D \cdot W}{\lambda \cdot F} \cdot e^{j \frac{\pi \cdot W \cdot f_a}{v_a}} \cdot \sin c\left(\frac{\pi \cdot L}{\lambda \cdot F} \cdot q\right) \cdot \sin c\left(\pi \cdot \left(\frac{p}{\lambda \cdot F} - \frac{f_a}{v_s}\right) \cdot W\right) \quad (12)$$

Em (12) tem-se que $\tau = \frac{W}{v_a}$ é a abertura temporal da célula

Bragg e E_0 é a amplitude do campo elétrico.

A equação (12) revela a dependência na coordenada do pico de campo elétrico como função da frequência acústica, caracterizando o efeito acustoóptico no regime de Bragg. Ela

também mostra o efeito Doppler que já era esperado quando feita a análise onda-partícula.

Esse resultado pode ser utilizado na análise de células Bragg multicanal, que permitem a obtenção de outros parâmetros do sinal que não somente a análise espectral.

IV. AS CÉLULAS ACUSTOÓPTICAS MULTICANAL

A célula Bragg multicanal determina a transformada de Fourier espacial do sinal na qual as posições no plano transformado tem relação linear com a análise do sinal de microondas no domínio da frequência. Porém, há situações em que são necessárias mais informações a respeito do sinal, como por exemplo o ângulo de chegada. Em tais aplicações faz-se necessário o uso da célula Bragg multicanal. A Fig. 4 mostra uma configuração onde se tem um arranjo de células Bragg formando uma célula Bragg multicanal.

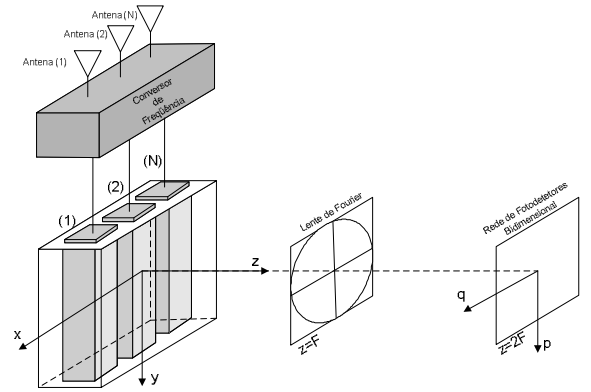


Fig.4 – Representação esquemática do processador óptico com célula Bragg Multicanal

Na Fig. 4 observa-se um arranjo de N células Bragg monocanal desfasadas em fase de maneira apropriada e iluminados adequadamente através de uma óptica de entrada adequada.

A localização espacial das antenas faz com que haja uma fase diferente na entrada de cada transdutor piezoelétrico. Pode-se então, modelar a entrada do transdutor de ordem n pela equação:

$$V_{in}^{(n)}(t, x) = A_n(t) \cdot e^{j(2\pi \cdot f_a \cdot t - \phi_n(x))} \quad (13)$$

Aplicando-se a mesma metodologia utilizada na seção anterior e fazendo-se a superposição dos resultados obtidos para os $N = 2 \cdot M + 1$ transdutores em uma configuração simplificada onde a diferença de fase entre os transdutores é constante e estes estão igualmente espaçados, tem-se o seguinte resultado para o campo no plano de Fourier.

$$E_y(p, q, t) = K.W.D.e^{j(\omega+\omega_0)t}.A(t-\tau).\text{sinc}\left(\pi\frac{p}{\lambda.F}-\frac{f_a}{v_a}\right)W. \quad (14)$$

$$\text{sinc}\left[\left(\frac{\pi.D}{\lambda.F}\right)q\right].R(q, \phi, M)$$

Onde

$$R(q, \theta, m) = \frac{\text{sen}\left[\left(\frac{2.M+1}{2}\right)\left(\frac{4.\pi.D}{\lambda.F}\right)q - \theta\right]}{\text{sen}\left[\frac{4.\pi.D}{\lambda.F}q - \theta\right]} \quad (15)$$

A análise de (15) permite observar que as coordenadas p e q estão independentes e que na coordenada p continua-se a ter a informação espectral, enquanto na coordenada q tem-se a informação de fase.

Esta fase é dependente do sinal na entrada de cada transdutor de tal forma que uma onda eletromagnética que atinge o arranjo de antenas com uma determinada inclinação, gerará em cada transdutor uma diferença de fase que será medida na direção q , o que mostra que as células acustoópticas multicanal podem ser aplicadas na determinação de importantes parâmetros de um pulso de radar, por exemplo.

V. CONCLUSÃO

O presente artigo teve como objetivo a apresentação de uma tecnologia com grande potencial de ser empregada em receptores de microondas embarcados, dada as suas características de desempenho, tamanho reduzido.

O ITA tem uma grande capacitação na área já tendo demonstrado o conceito de aplicação de células bragg monocanal em analisadores de espectro acustoóptico e com a criação de um laboratório específico na área.

O DARPA, órgão do departamento de defesa norteamericano, colocou a tecnologia acustoóptica como uma prioridade nas suas linhas de pesquisa na área de processamento óptico analógico de sinais (*AOSP – Analog Optical Signal Processing*), o que indica a necessidade de progredirmos na área e adquirirmos independência tecnológica.

REFERÊNCIAS

- [1] J. H. Collins, P. M Grant, "A Review of Current and Future Components for Electronic Warfare Receivers", *Trans. On Microwave Theory and Techniques*, vol. mtt-29, no. 5, pp. 395-403, May 1985.
- [2] A.F.S Tinoco, M.A. F. Pires, W.J. Perrela, J. E. B. Oliveira, "Estudo da Aplicação da Célula Bragg Multicanal em Detecção de Sinais de Microondas. X SBMO, pp 43-47.
- [3] A. Korpel, "Acousto-Optics-A review of fundamentals", *Proc. of the IEEE*, vol. 69, pp 47-53, Jan. 1981.
- [4] J. N. Lee, A. Vanderlugt, "Acousto-Optics Signal Processing and Computing", *Proc. of the IEEE*, vol. 77, pp 1527-1557, Oct. 1989.