

# Feixes não Difrativos Aplicados a Comunicações Ópticas no Espaço Livre

Marco Antonio M. Miranda e Prof. Dr. Hugo Enrique Hernandez Figueroa  
marcoantonio2m@ieee.org e hugo@dmo.fee.unicamp.br

DMO - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Estadual de Campinas  
FAPESP

Palavras Chaves: Comunicações Ópticas – Feixes de Bessel - Difração



## Introdução

Os feixes não difrativos pertencem à classe das chamadas ondas localizadas (*Localized Waves, LW*), as quais a princípio devem se propagar sem distorção por longas distâncias (muito maiores, que as chamadas convencionais) em meios não guiados lineares ou não-lineares. Um dos feixes mais simples pertencentes a essa classe é o feixe de Bessel de ordem zero, estudado por Durnin. Considerando que esse feixe é uma solução modal da equação de onda eletromagnética no espaço livre, idealmente deveria se propagar infinitamente sem distorção, entretanto para sua geração, seria necessário utilizar uma abertura de diâmetro infinito, inviável na prática.

Para tanto, utiliza-se uma abertura de diâmetro finito que é capaz de gerar um feixe de Bessel truncado, o qual dependendo desse diâmetro, pode propa-

gar-se por longas distâncias sem distorção até colapsar e se espalhar subitamente. Tais distâncias podem ser ordens de magnitude maiores que um feixe Gaussiano convencional, para condições de excitação equivalentes.

Tendo então conhecimento das condições teóricas através do estudo das equações e da análise do comportamento desses feixes (Gaussiano e Bessel) e sua propagação no espaço através de simulações em *software*, e ainda reproduzido o experimento de Durnin, projetou-se então um enlace óptico simples de comunicações ópticas no espaço livre com esses dois diferentes tipos de feixe.

O objetivo é analisar o comportamento de ambos aplicados ao enlace com foco na verificação se há ou não melhora de desempenho em termos de distância e qualidade de recepção, levando em conta perturbações externas, como turbulência do ar e obstáculos. A intenção desse estudo é contribuir para melhorias nos sistemas atuais de comunicação desse tipo.

## Metodologia

A primeira etapa desse estudo foi a análise teórica do efeito da difração nos feixes de Bessel e Gaussiano em sua propagação. Para tanto, realizou-se simulações utilizando o *software* MATLAB para a implementação da equação de difração de Rayleigh-Sommerfeld.

Numa segunda etapa, foi efetuado um estudo do funcionamento de um enlace FSO (*Free Space Optics*) levando em consideração as vantagens e desvantagens e as diferentes tecnologias de implementação. Logo após, foi projetado um aparato simples de comunicação utilizando os feixes convencionais (Gaussiano com lente).

Numa terceira etapa, estudou-se as diferentes formas de geração de um feixe de Bessel de ordem zero e efetuou-se sua implementação física. Nesse caso utilizou-se uma abertura angular de diâmetro finito com uma lente, e ainda um *axicon*.

Por último, integrou-se esse aparato para geração do feixe não difrativo ao enlace simples implementado a fim de comparar, em termos de desempenho, qual seria o mais adequado. Para estes testes, leva-se em consideração, principalmente a presença de obstáculos e a qualidade de recepção do sinal transmitido.

## Resultados e Discussão

A Figura 1 apresenta uma comparação teórica entre a intensidade do feixe de Bessel e do Gaussiano para um sinal com comprimento de onda de 1064nm e um raio de abertura de 0.0035m ao longo da dimensão  $z$ . Verificou-se que o feixe de Bessel está livre de difração até uma distância de aproximadamente 0.51m, em que este cai para cerca de 50% de sua amplitude, enquanto que isso ocorre no feixe gaussiano a uma distância de 1.8cm.

Durnin, descobriu a equação de Bessel como solução da equação de onda em 1987, e desde então vários estudos tem sido desenvolvidos nessa área. A solução encontrada foi a seguinte:

$$u(P, t) = \exp[i(\beta z - \omega t)] J_0(\alpha \rho)$$

Observe que, nesse caso teremos uma onda propagante na direção  $z$ , e um padrão de Bessel na transversal. Quando o feixe é truncado, portanto de energia finita, ele se torna resistente a difração até um certo ponto, pois a energia dos lóbulos laterais do feixe de Bessel alimentam o lóbulo principal, até o limite do truncamento e então ele colapsa, se difratando rapidamente. O que não ocorre no caso do feixe gaussiano, que possui apenas um lóbulo central. Importante notar ainda, que para efeitos de comparação, ambos os feixes possuem um *spot* de largura 60 $\mu$ m.

Na geração experimental dos feixes de Bessel utilizando a abertura anular de diâmetro finito, observou-se resultados semelhantes aos obtidos teoricamente, Mesmo não sendo um feixe idealmente de ordem zero. Assim, essa etapa foi concluída com sucesso.

Então, foi implementado ainda um enlace óptico convencional de baixo custo utilizando um laser apontador e um fotodetector. O projeto visou efetuar a comunicação serial entre dois computadores, principalmente. Após algumas medições pôde-se observar que o aparato funcionou bem até uma frequência de 4.8kHz, logo após esse valor observou-se a saturação do fotodetector. Depois de validado o funcionamento desse protótipo, resta então a integração com o aparato de geração do feixe de Bessel.

A idéia básica é comparar uma transmissão utilizando o feixe de Bessel de ordem zero com uma realizada com o gaussiano. Tirar conclusões como qual deles é mais resistente a difração, ou se o formato do pulso não influirá positivamente nessa propagação é um dos objetivos finais desse projeto.

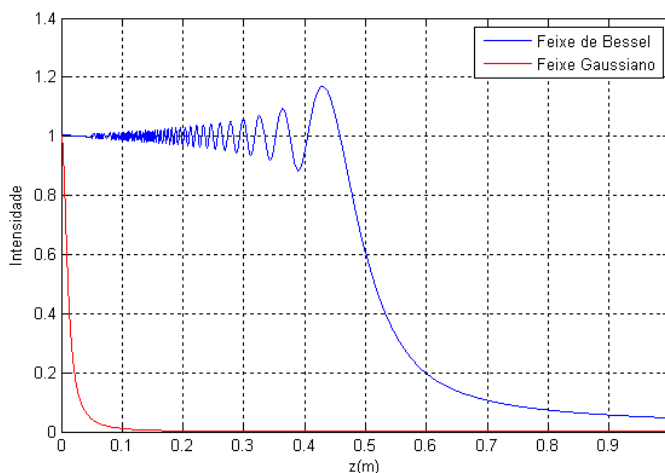


Figura 1: Feixes de Bessel e Gaussiano com propagação no espaço livre.

## Conclusões

Foi analisado o fenômeno da difração presente na propagação de um sinal gerado a partir de uma abertura finita e esse resultado, conhecido como Integral de Difração de Rayleigh-Sommerfeld do tipo II, foi utilizado para a obtenção dos resultados teóricos. Os gráficos obtidos por meio de simulação computacional mostraram que as vantagens dos feixes de Bessel sobre o gaussiano no que diz respeito à difração são bastante expressivos. Pois, conforme observado neste caso, dois feixes com a mesma largura possuíam alcances máximos diferentes em  $z$ , sendo que o feixe de Bessel chega a alcançar uma distância de cerca de 28 vezes maior que o feixe gaussiano.

Foi apresentado também um link óptico simples de baixo custo utilizando um laser apontador, tal laser foi adaptado a um circuito que realiza a modulação por amplitude de pulso e utilizado em um canal *simplex*. Os resultados obtidos foram bastante promissores, mas percebeu-se que em frequências acima de 4,8kHz esse circuito começa a apresentar uma taxa de erro de *bit* acima de 0%.

## Referências Bibliográficas

- [1] J. Durnin, J. J. Miceli e J. H. Eberly, "Diffraction-free beams", Phys. Rev. Lett. Vol. 58, pp. 1499-1501 (1987).
- [2] L. A. Ambrósio, "Feixes Localizados em Pinças Ópticas com Partículas Convencionais e Metamateriais", tese de doutorado (defendida em 31/08/2009).
- [3] H. E. Hernández-Figueroa, M. Zamboni-Rached, e E. Recami (Editores), "Localized Waves", Wiley and Sons, 369 páginas, (2008)
- [4] M. Zamboni-Rached, L. A. Ambrósio, and H. E. Hernandez-Figueroa, "Finite Aperture Realization of the Diffraction-Attenuation resistant beams in absorbing media", 2007 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC 2007).