

1

Introdução

O estudo da propagação óptica no espaço livre recebeu considerável impulso após a Segunda Guerra Mundial com a descoberta do laser. Os cientistas iniciaram diversas pesquisas nessa área com o objetivo de compreender os mecanismos e os fenômenos físicos envolvidos no problema em questão.

As pesquisas de propagação de feixe laser na atmosfera inicialmente foram dirigidas para as aplicações militares como: apontamento, designação de alvo, medição de distância, guiamento de mísseis, e outras. Posteriormente permitiram o desenvolvimento de aplicações civis como: sensoriamento remoto da atmosfera, e comunicações ópticas no espaço livre.

A crescente demanda por novos pontos de acesso de comunicação em altas taxas freqüentemente esbarra no clássico problema chamado "Last Mile Network Problem", problema do acesso à rede na última milha. A maioria dos usuários de internet de alta velocidade está distante cerca de uma milha dos troncos de fibra óptica de alta velocidade (2,5Gbps - 10Gbps), espinha dorsal da comunicação de dados. A necessidade por comunicação de dados de alta velocidade é alimentada pelo aumento do uso comercial da internet, intranets privadas, comércio eletrônico, armazenamento de dados e "backup", redes virtuais privadas, vídeo conferência, e voz sobre IP ("Internet Protocol").

A chave para se obter a comunicação de dados de alta velocidade é a utilização do tronco principal de fibra óptica. Entretanto, o acesso ao tronco de fibra óptica para a maioria dos assinantes, que estão fisicamente localizados dentro da distância de uma milha, é limitado à infra-estrutura de cabos de cobre existentes para TV e telefone. Novas tecnologias como a "Very High-Speed Digital Subscriber Line" (VDSL) ou "cable modems" têm aumentado a largura de banda dos enlaces que empregam fios de cobre para 52 Mbps. Isso é mais do que as tradicionais linhas ISDN ("Integrated Services Digital Network") oferecem (1,5 Mbps), porém, muito menos do que o necessário para utilizar totalmente a espinha dorsal de fibra óptica (Gbps).

Possíveis soluções para o gargalo da última milha são: instalação de fibra óptica diretamente para todos os clientes; uso de tecnologia de rádio frequência sem fio como serviço de distribuição local multiponto (LMDS); Redes sem fio 3G (celular); e uso de comunicação óptica a laser no espaço livre (“Free Space Optics” - FSO).

Do ponto de vista da disponibilidade, a fibra óptica seria a solução ideal, entretanto por causa do alto custo e do tempo de instalação não é uma solução muito prática. LMDS é uma solução rádio sem fio que possui capacidade de largura de banda de poucas centenas de Mbps, mas sua frequência de portadora está dentro da faixa de bandas licenciadas. O adicional de custo e tempo para a obtenção da licença junto aos órgãos de fiscalização torna essa alternativa menos atraente.

A comunicação óptica no espaço livre é uma área que vem ganhando importância nos últimos anos, e que em princípio atende a duas grandes demandas:

1) A necessidade por rapidez, segurança e alta taxa de transmissão nas comunicações entre satélites. Aqui como em muitos outros campos, a demanda militar tem conduzido a evolução. É fácil compreender que é praticamente impossível interceptar um sinal óptico no espaço livre;

2) A necessidade por uma solução prática e barata para a comunicação de altas taxas em situações onde a fibra óptica não é economicamente compensadora. Isto é claramente um mercado com alto potencial para crescimento.

Sistemas ópticos sem fio oferecem rapidez na instalação e na sua inicialização, uma vez que não necessitam de licença para operar, e ainda, provêm um sistema flexível com largura de banda equivalente a da fibra óptica, em torno de 2.5 Gbps para sistemas comerciais disponíveis atualmente.

O cerne da problemática que envolve as aplicações de sistemas ópticos sem fio é a propagação óptica no espaço livre. A grande diferença entre a transmissão a laser no espaço livre e na fibra óptica é a previsibilidade da atenuação da potência do sinal do laser na fibra, quando comparado à atmosfera. Cabos de fibra óptica atenuam numa taxa constante da ordem de 2 a 3 dB/km para fibras multimodos e de 0,2 a 0,5 dB/km para fibras monomodo. Por outro lado, a atenuação atmosférica da potência do laser é completamente variável e difícil de prever, podendo chegar a valores da ordem de 0,2 dB/km em condições climáticas

de tempo excepcionalmente claro, a 310 dB/km em um nevoeiro muito denso típico do Reino Unido [1].

O problema da difusão da informação até o usuário final, com acesso de alta capacidade, vem despertando crescente interesse na propagação óptica de feixe laser na atmosfera de baixa altitude (caminhos horizontais), para aplicações em enlaces ópticos entre edifícios.

Os sistemas de comunicações ópticas no espaço livre possuem muitas vantagens se comparados aos sistemas de comunicação por rádio frequência tais como: grande largura de banda, instalação rápida, isenção de licença, baixo peso e tamanho reduzido.

Apesar dessas vantagens, os sistemas de comunicações ópticas são muito sensíveis às condições atmosféricas como neblina, nevoeiro e turbulência, que atenuam mais o sinal óptico do que o sinal de rádio frequência.

À medida que a frente de onda óptica se propaga na atmosfera ela é distorcida e atenuada por fenômenos como: expansão do feixe por difração, absorção e espalhamento por partículas em suspensão, espalhamento por refração devido à turbulência atmosférica, desfocalização térmica e ionização do ar em aplicações de alta potência, entre outros. Todos esses fenômenos removem energia do feixe ocasionando sua atenuação. A refração causada pela turbulência gera o efeito conhecido como cintilação, que é o objeto de estudo do presente trabalho.

A atenuação de um feixe de laser por nevoeiro denso pode chegar a 315 dB/km [1]. Com base no histórico de visibilidade do local onde será instalado o enlace é possível prever a condição mais desfavorável, e adotar uma margem de potência compatível. Por outro lado, a aplicação de enlaces lasers em localidades com ausência de nevoeiro passa a ter a cintilação como fenômeno limitante. Em particular, o impacto da cintilação é causar variação aleatória na intensidade do sinal recebido, levando a um grande desvanecimento do sinal [2].

Durante o desenvolvimento de um enlace laser com dimensões físicas reduzidas dos transmissores e receptores, para aplicação na comunicação de uma plataforma móvel com uma estação fixa, a cintilação mostrou-se responsável pela perda de pacotes de bits. Esse evento motivou a realização de um estudo sobre a cintilação e sua relação com as variações da geometria dos transmissores e receptores, apresentados na presente tese.

Em [3] foi observado que o enlace FSO de laser com maior comprimento de onda ($9,1\ \mu\text{m}$) apresentava menor nível de cintilação do que o enlace FSO de $1550\ \text{nm}$. Esse último, por sua vez, apresentava menor cintilação do que o enlace FSO de $780\ \text{nm}$. Como os diâmetros de abertura dos receptores eram da ordem de $80\ \text{mm}$ esperava-se que os níveis de cintilação fossem muito próximos uns dos outros.

Ao longo do desenvolvimento do presente trabalho é demonstrado experimentalmente que a fibra óptica multimodo de alimentação dos transmissores é responsável pelo aumento dos níveis de cintilação.

1.1. Apresentação do Trabalho

O desenvolvimento recente dos lasers quânticos em cascata (QLC) [4], e dos fotodetectores de poços e pontos quânticos (QWIP e QDIP) [5] rápidos e sensíveis, que operam no infravermelho de ondas longas, denominado *LWIR* (“Long Wavelength Infrared”), aponta a comunidade científica na direção da investigação de possíveis vantagens de se usar comprimentos de ondas mais longos, como em $4\ \mu\text{m}$ e $10\ \mu\text{m}$. Em [6], Colvero apresenta resultados experimentais que comprovam um desempenho melhor do infravermelho de ondas longas ($10\ \mu\text{m}$), na presença de um nevoeiro denominado “dense up slope costal fog”, quando comparado diretamente ao infravermelho próximo ($780\ \text{nm}$ e $1550\ \text{nm}$), em três enlaces FSO idênticos e dispostos em paralelo. “Up slope costal fog” é o nevoeiro denso formado por correntes de ar provenientes do mar que são forçadas a subir devido ao relevo. Todavia os efeitos de cintilação também são dependentes do comprimento de onda e merecem ser estudados cuidadosamente nessa nova janela atmosférica ($10\ \mu\text{m}$) que ora torna-se acessível. Esse trabalho limita-se ao estudo da propagação óptica na linha de visada, e tem como foco o efeito da turbulência atmosférica, na condição de espalhamento fraco, sobre a propagação de um feixe laser.

O capítulo 2 descreve os fundamentos dos Sistemas de Comunicações Ópticas no Espaço Livre (“Free Space Optics” - FSO).

O capítulo 3 destina-se a introduzir os conceitos necessários para a compreensão do fenômeno da Turbulência Atmosférica, que é a responsável por causar o efeito da Cintilação Eletromagnética.

O capítulo 4 descreve a teoria da propagação de onda eletromagnética, na linha de visada, em um Meio Aleatório. Nesse capítulo são apresentadas as equações básicas que descrevem o espalhamento fraco da onda eletromagnética.

O capítulo 5 descreve as montagens experimentais, os ajustes realizados para configurar a geometria da óptica, o “hardware” empregado, e apresenta os resultados obtidos. Três enlaces lasers são avaliados quanto aos seus desempenhos em relação à cintilação. Foi realizada uma comparação direta da influência do “Speckle” da fibra óptica multimodo, no desempenho dos enlaces.

O capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho.