

# Medidas de Canal para Comunicação Óptica pelo Espaço Livre

Cristhof J. R. Runge, Maxwell V. da Silva e Jaime Portugheis

**Resumo**— O artigo apresenta e analisa medidas do desvanecimento do sinal óptico num enlace terrestre de comunicação óptica pelo espaço livre utilizando um sistema comercial. Diferentemente de trabalhos anteriores, a distância do enlace é bem curta (estimada em 91 metros). Mesmo assim, foi possível observar variações significativas do índice de cintilação do enlace ao longo de um dia. Este comportamento concorda com resultados anteriores da literatura obtidos para enlaces bem mais longos.

**Palavras-Chave**— Comunicação óptica pelo espaço livre, medidas de canal, índice de cintilação, desvanecimento.

**Abstract**— This article presents and analyzes fading measurements of optical signal in a terrestrial free space optical communication link using a commercial system. Unlike previous work, the link distance is very short (around 91 meters). Still, it was possible to observe significant scintillation index variations over a day. This behaviour agrees with previous results obtained in the literature for much longer links.

**Keywords**— Free space optical communications, channel measurements, scintillation index, fading.

## I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicações atuais utilizam dois tipos de meios para transmissão de informação: meios confinados, como fibras ópticas e cabos coaxiais, e, o espaço livre. No caso do espaço livre, a transmissão é feita através de ondas de radiofrequência (comumente na faixa de 3 kHz a 300 GHz) e luz (com comprimentos de onda de 400 a 1550 nm). Os sistemas que usam o espaço livre e luz são conhecidos como OWC (do inglês, "Optical Wireless Communications")[1]. Dentre estes sistemas OWC, aqueles que ficam ao ar livre ("outdoor") e são terrestres, são comumente conhecidos como sistemas FSO (do inglês, "Free Space Optics").

Neste artigo consideraremos os sistemas FSO. Estes sistemas possuem diversas vantagens sobre os sistemas tradicionais de radiofrequência (RF), como, por exemplo, extensa faixa de espectro eletromagnético livre para utilização, altíssimas taxas na ordem de Gbits/s, baixa interferência eletromagnética, e também, um custo de implantação baixo quando comparados aos sistemas que utilizam fibras ópticas ou RF. Entretanto, a propagação óptica se dá através da atmosfera: efeitos como absorção, espalhamento e turbulência estão presentes e provocam desvanecimento do sinal recebido no receptor. Portanto, o projeto de um sistema FSO necessita de modelos da função densidade de probabilidade da intensidade do sinal recebido. Estes modelos dependem em geral das condições climáticas de cada local. Mesmo sob

condições climáticas de um céu limpo, diferenças de pressão e temperatura derivadas do aquecimento solar e vento provocam variações do índice de refração do ar no percurso entre transmissor e receptor resultando em turbulência atmosférica. A turbulência causa então variações na amplitude e fase do sinal recebido, ou seja, desvanecimento [1].

Este artigo descreve resultados de medidas da variação de intensidade do sinal óptico recebido num enlace FSO terrestre e faz uma análise do desvanecimento resultante. O enlace experimental montado para obtenção destas medidas utilizou um sistema comercial e foi implantado sobre os telhados de dois prédios do campus onde se encontra a Faculdade de Tecnologia da Unicamp em Limeira, São Paulo. A distância do enlace é curta (estimada em 91 metros), entretanto ele possui a característica de ter edificações em quase toda sua extensão, estando os telhados das edificações bem próximos ao caminho do feixe óptico. As medidas obtidas mostram que mesmo sendo um enlace muito curto, foi possível observar o fenômeno da turbulência atmosférica.

## II. ENLACE EXPERIMENTAL

O enlace experimental utilizou um par de transceptores da família TS802/ST da empresa Optical Access Inc. que foram doados à Faculdade de Tecnologia da Unicamp. Cada transceptor consiste de apenas um transmissor e um receptor. A fonte de luz do transmissor consiste de um Laser operando em um comprimento de onda de 850 nm com potência de saída de 1 mW e ângulo de divergência de 3 mrad. No receptor, o detector consiste de um fotodiodo Si PIN com um campo de visão de 14 mrad. A interface para conexão com um equipamento periférico é feita através de uma fibra óptica multimodo.

O transceptor foi desmontado e separado em módulos. A partir de uma análise detalhada dos circuitos internos de um dos módulos do equipamento, foi possível determinar o ponto de monitoração da tensão de saída do fotodetector. Para coletarmos as medidas de canal utilizamos um osciloscópio portátil de armazenamento digital Tektronix TDS1000C-EDU. A taxa de amostras foi ajustada para 25 kHz.

Escolher os locais de instalação dos transceptores para o enlace FSO é uma questão relevante pois é necessário garantir uma boa linha de visada entre os transceptores. Estes precisam estar imunes às obstruções no caminho do sinal óptico, tais como árvores, folhas e pássaros [2],[3]. A trepidação é outro item crítico do ponto de vista do alinhamento do feixe. Desta forma, a escolha de superfícies de fixação que não sejam susceptíveis a deslocamentos ou trepidações, é um requisito

essencial na fase de implantação de um enlace FSO. Além disto, a qualidade do enlace irá depender das características do meio entre os transceptores [3].

A Figura 1 mostra uma vista aérea da localização do enlace obtida através do Google Earth [4]. O transmissor (na foto é o "alfinete" azul à direita) foi colocado sobre o telhado de um dos prédios do campus da Faculdade de Tecnologia e o receptor (na foto é o "alfinete" amarelo à esquerda) foi colocado sobre o telhado de outro prédio do campus distante aproximadamente 91 metros. Esta distância foi estimada utilizando-se uma ferramenta do Google Earth. Ambos os prédios possuem apenas um andar térreo e os transceptores se encontram a 5 metros do solo. Entretanto, como pode ser observado na Figura 1, o sinal óptico está sendo transmitido em grande parte sobre telhados e bem próximo a eles. A Figura 2 mostra o receptor do enlace. Pode-se notar na Figura 2 a proximidade do telhado que está a apenas 28 centímetros da localização do fotodetector do receptor.



Fig. 1. Vista aérea do enlace FSO mostrando a localização do transmissor e do receptor no campus da Faculdade de Tecnologia.



Fig. 2. Vista do receptor instalado no telhado de um prédio.

### III. MODELO DE CANAL

Iremos considerar um modelo de tempo discreto para as amostras coletadas pelo osciloscópio dado por [5]

$$r_k = h_k x_k + n_k, \quad (1)$$

onde a intensidade  $h_k$  (ou ganho do canal) representa o desvanecimento devido à turbulência atmosférica e  $x_k$  é o sinal transmitido. Para a medição, o sinal transmitido constitui-se apenas de uma portadora não modulada, e, portanto, o modelo não considera a resposta ao impulso do transmissor nem do receptor. Sem perda de generalidade, podemos fazer  $x_k = 1$ . Estamos considerando que o ganho do canal inclui a responsividade do fotodetector, o ganho do amplificador no receptor, perdas geométricas (de propagação), perdas atmosféricas médias e o desvanecimento devido ao fenômeno da cintilação [6].

Neste modelo é assumido que o efeito combinado do ruído térmico do receptor e da radiação de fundo é modelado como um ruído aditivo,  $n_k$ . Medidas experimentais já realizadas para este ruído aditivo mostram que ele pode ser considerado Gaussiano e branco [6], [7]. Medidas do sinal recebido,  $r_k$ , foram realizadas para um enlace experimental com comprimento de 1 km e estão descritas em [8]. Estas medidas foram utilizadas para estimar a variância da intensidade,  $h_k$ , desprezando-se o efeito do ruído aditivo (isto é, assume-se que  $r_k = h_k$ ). Para o enlace de 1,87 km descrito em [6], as amostras coletadas do sinal recebido são processadas através de um filtro "notch" para minimizar o efeito do ruído aditivo. Em [7] utilizou-se um enlace experimental longo (12 km) trabalhando com uma razão sinal-ruído (RSR) baixa. Sendo assim, o ruído aditivo não foi desprezado e o foco do trabalho foi a estimação da densidade de probabilidade da intensidade,  $h_k$ , conhecendo-se previamente a média e a variância do ruído aditivo. Mostra-se em [7] que, se a variância do ruído aditivo é da ordem do logaritmo da variância da intensidade (RSR baixa), o ruído não pode ser desprezado. Mas, se a variância do ruído aditivo é muito menor (pelo menos 10 vezes) que o logaritmo da variância da intensidade (RSR alta), o ruído pode ser desprezado.

### IV. MEDIDAS DE CANAL E SUA ANÁLISE

#### A. Índice de Cintilação

A variância normalizada do ganho de canal,  $h$ , é denominada índice de cintilação do canal FSO e é dada por [9]

$$\sigma_I^2 = \frac{E[h^2] - E[h]^2}{E[h]^2} \quad (2)$$

onde  $E[\cdot]$  denota valor esperado. Se  $E[h] = 1$ ,  $\sigma_I^2$  é igual a variância de  $h$ , e, pode portanto ser vista como o índice de cintilação [10].

O índice de cintilação pode ser estimado a partir das amostras coletadas pelo osciloscópio através das expressões:

$$E[h^2] - E[h]^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (h_k - E[h])^2 \quad (3)$$

e

$$E[h] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N h_k \quad (4)$$

onde  $N$  é o número de amostras coletadas. Dependendo do valor de  $\sigma_I^2$ , três regimes distintos de turbulência podem ser definidos: turbulência fraca ( $\sigma_I^2$  é pequeno), turbulência

moderada ( $\sigma_I^2$  está em torno de 1/2) e turbulência forte ( $\sigma_I^2$  está em torno de 1 ou é maior que 1).

Para turbulência fraca, os ganhos de canal são modelados com um função densidade de probabilidade lognormal

$$f(h) = \frac{1}{h\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(\ln(h) + \sigma^2/2)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5)$$

onde  $E[h] = 1$  e  $\sigma^2 = \ln(\sigma_I^2 + 1)$ .

Para turbulência de fraca a moderada, o modelo mais apropriado para os ganhos de canal é uma função densidade gamma-gamma [11]. E finalmente, para turbulência forte, um modelo de exponencial negativa é usualmente considerado [5]. Como estamos considerando neste trabalho um enlace curto, é de se esperar que observemos apenas turbulência fraca. Sendo assim, para efeito de análise das medições realizadas iremos considerar apenas uma densidade lognormal.

A Tabela I mostra valores estimados para o índice de cintilação a partir de uma série de medidas realizadas entre os dias 12 e 19 de agosto de 2014. As medidas da linha "Manhã" foram realizadas em torno das 6 horas, as da linha "Tarde" em torno das 13 hs e as da linha "Noite" em torno das 19 hs. As letras T, V e C se referem a Temperatura (graus Celsius), Vento (km/h) e Clima, respectivamente. Os dados foram obtidos da estação meteorológica da Faculdade de Tecnologia [12]. Observando os dados da Tabela I, podemos tentar tirar conclusões sobre a correlação de T, V ou C com os valores estimados do índice de cintilação. Esta tentativa é feita em [6] e [8]. Entretanto, preferimos apenas concluir o mesmo que foi concluído em [7]: os maiores índices de cintilação são observados próximos ao meio-dia (13 hs). Outro fato importante a observar é que na coluna "Medidas 2" da Tabela I temos um índice de cintilação no período da tarde aproximadamente 10 vezes maior que no período da manhã.

TABELA I  
VALORES ESTIMADOS PARA O ÍNDICE DE CINTILAÇÃO.

	MEDIDAS 1	MEDIDAS 2	MEDIDAS 3
Manhã	<b>0,0000147</b>	<b>0,0000252</b>	<b>0,0000202</b>
T	19,4	16,4	14,6
V	12,2	14,3	12,6
C	Nublado	Limpo	Nublado
Tarde	<b>0,0000583</b>	<b>0,0002383</b>	<b>0,0002115</b>
T	21,0	25,1	25,5
V	15,7	15,1	12,8
C	Limpo	Limpo	Limpo
Noite	<b>0,0000267</b>	<b>0,0000294</b>	<b>0,0000315</b>
T	26,8	14,2	23,7
V	12,8	12,1	15,8
C	Limpo	Chuvoso	Limpo

## B. Ruído

O ruído aditivo descrito em (1) é modelado como a soma do ruído térmico do receptor e da radiação de fundo. Para se obter os parâmetros da densidade Gaussiana que modela este ruído, desliga-se o transmissor e coleta-se as amostras do osciloscópio. Se agora cobrimos o receptor com uma placa escura, iremos obter apenas as amostras do ruído térmico do mesmo. Como em [6] e [7], não observamos diferenças

estatísticas significativas entre o ruído aditivo e o ruído térmico. A Figura 3 mostra tanto o histograma quanto a função densidade de probabilidade Gaussiana obtida através de um programa desenvolvido para ajuste de parâmetros de uma distribuição normal aos dados que geraram o histograma. Como o histograma foi normalizado para possuir uma área unitária, a densidade de probabilidade ajustada é uma densidade normalizada. O programa utilizou a função *normfit* do Matlab que se baseia no método de Máxima Verossimilhança. Foram utilizadas 24.820 amostras coletadas pelo osciloscópio. Pode-se observar da figura uma boa concordância do ajuste aos dados.

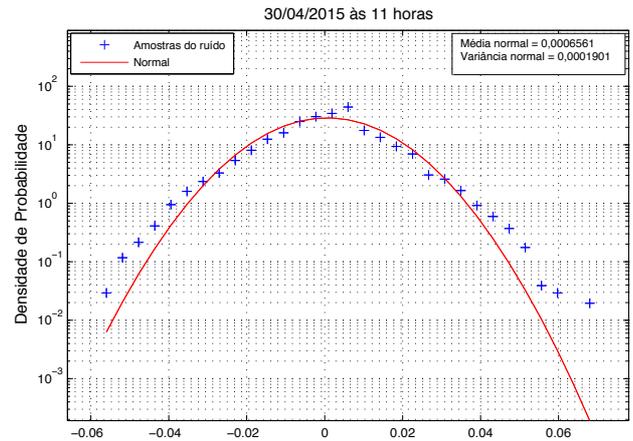


Fig. 3. Histograma do ruído térmico e a densidade Gaussiana ajustada

## C. Ganho de Canal

A Figura 4 mostra a gravação de um segmento de 1 segundo do sinal óptico detectado distorcido pela turbulência atmosférica com um índice de cintilação de 0,0002383. O sinal foi gravado em 15 de agosto de 2014 em torno das 13 horas sob céu limpo. A potência óptica é normalizada através da normalização da média da intensidade recebida para um valor unitário.

A Figura 5 mostra tanto o histograma quanto o ajuste da densidade lognormal obtido para o mesmo dia e hora de agosto. Neste caso o programa desenvolvido utilizou a função *lognfit* do Matlab que se baseia no método de Máxima Verossimilhança. Foram utilizadas 12.410 amostras coletadas pelo osciloscópio. Pode-se observar da figura uma boa concordância do ajuste aos dados.

A Figura 6 mostra tanto o histograma quanto o ajuste da densidade lognormal para dados coletados no dia 16 de agosto de 2014 em torno das 06 horas da manhã sob céu limpo. O programa que gerou o ajuste foi o mesmo que gerou o ajuste do dia 15 de agosto e o número de amostras coletadas também foi o mesmo. Pode-se novamente observar da figura uma boa concordância do ajuste aos dados.

Vale a pena ressaltar que ao compararmos o logaritmo da variância da intensidade detectada com a variância do ruído aditivo para todas as medidas realizadas, constatamos que ela era no mínimo 25 vezes maior, ou seja, tínhamos situações de

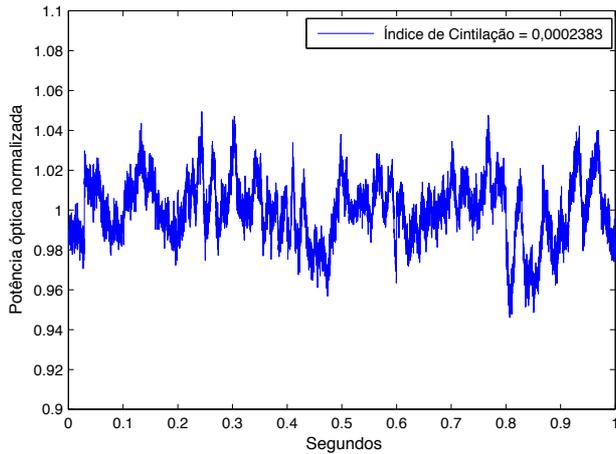


Fig. 4. Forma de onda do ganho normalizado de canal para um índice de cintilação de 0,0002383. A duração da gravação foi de 1 segundo.

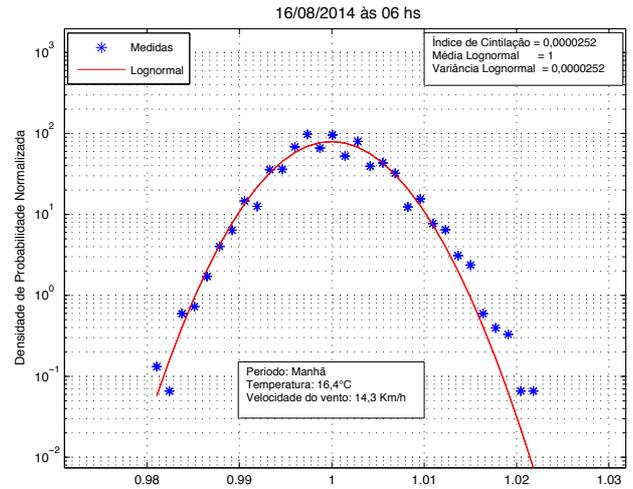


Fig. 6. Histograma do ganho de canal normalizado e a densidade lognormal ajustada para um período da manhã e condições climáticas de céu limpo. Valor esperado de  $h$ ,  $E[h] = 3,78$  V.

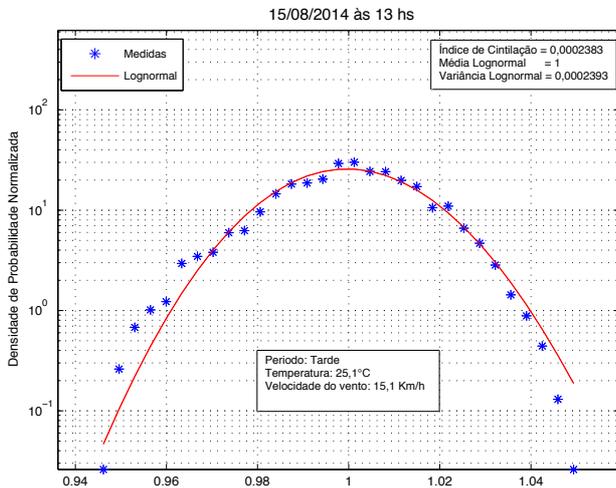


Fig. 5. Histograma do ganho de canal normalizado e a densidade lognormal ajustada para um período da tarde e condições climáticas de céu limpo. Valor esperado de  $h$ ,  $E[h] = 3,36$  V.

RSR altas. Sendo assim, nos ajustes mostrados nas Figuras 5 e 6, o ruído aditivo foi desprezado.

## V. CONCLUSÕES

Resultados de medidas do desvanecimento do sinal óptico num enlace FSO terrestre foram apresentados e a análise dos mesmos foi desenvolvida. Diferentemente de trabalhos anteriores, a distância do enlace utilizado foi bem curta (estimada em 91 metros). Mesmo assim, foi possível observar-se o comportamento das variações do índice de cintilação do enlace ao longo de um dia. Este comportamento concordou com resultados anteriores da literatura.

Alguns dos valores de índice de cintilação observados são próximos dos obtidos em [8] para um enlace com comprimento de 1 km, isto é, mais que 10 vezes maior que o utilizado neste trabalho. Sabemos que a qualidade do enlace irá depender das características do meio entre os transceptores

[3]. O enlace utilizado neste trabalho possui a característica de ter edificações em quase toda sua extensão, estando um dos telhados das edificações bastante próximo ao caminho do feixe óptico (apenas 28 cm). A nossa suposição é que esta característica possa, em parte, ter contribuído para os valores de índice de cintilação observados. Uma investigação sobre esta suposição está em curso. Foram realizados testes preliminares em laboratório utilizando uma superfície metálica aquecida com o intuito de modelar um possível aquecimento solar do telhado no caminho de propagação. Foi observado que nessa situação, a coluna de ar aquecida na proximidade do feixe transmitido provoca variações na amplitude do sinal recebido, o que deve influenciar o índice de cintilação. O uso de enlaces com caminho próximo a edificações, talvez seja um fator a ser considerado no modelamento e no cálculo de disponibilidade de enlaces FSO.

Pretendemos também coletar um número maior de amostras do sinal recebido para podermos obter um conjunto de amostras suficientes para serem utilizadas em simulação computacional do desempenho de um enlace FSO.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a José Aparecido Cicarone pelo apoio na montagem do enlace.

## REFERÊNCIAS

- [1] M. A. Khalighi e M. Uysal, "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective," *IEEE Commun. Surveys and Tutorials*, v. 16, no. 4, pp. 2231-2258, 2014
- [2] H. Henniger e O. Wilfert, "An Introduction to Free-space Optical Communications," *Radioengineering*, vol. 19, no. 2, pp. 203-212, 2010.
- [3] F. S. Marzano, S. Mori, F. Frezza, P. Nocito, G. M. T. Beileffi, G. Incerti, E. Restuccia, e F. Consalvi, "Free-space optical high-speed link in the urban area of southern Rome: preliminary experimental set up and channel modelling," *Proc. of the 5th European Conf. on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pp. 2737-2741, 2011.
- [4] <http://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/learn/>

- [5] J. Anguita, M. Neifeld, B. Hildner e B. Vasic, "Rateless Coding on Experimental Temporally Correlated FSO Channels," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 7, pp. 990-1002, 2010.
- [6] A. Mostafa e S. Hranilovic, "Channel Measurement and Markov Modeling of an Urban Free-Space Optical Link," *J. Opt. Commun. Netw.*, v. 4, no. 10, pp. 836-846, 2012.
- [7] A. Khatoun, W. G. Cowley e N. Letzepis, "Channel measurement and estimation for free space optical communications," *Australian Commun. Theory Workshop*, pp. 112-117, 2011.
- [8] K. H. Kim, T. Higashino, K. Tsukamoto e S. Komaki, "Optical fading analysis considering spectrum of optical scintillation in terrestrial free-space optical channel," *Int. Conf. on Space Optical Systems and Applications*, pp. 58-66, 2011.
- [9] L. Zhang, Z. Wu, Y. Zhang e H. Detian, "Improved maximum likelihood detection for mitigating fading estimation error in free space optical communication," *Optical Engineering*, vol. 52(1), pp. 015004: 1-6, 2013.
- [10] K. Kiasaleh, "Channel estimation for FSO channels subject to Gamma-Gamma turbulence," *Proc. Int. Conf. on Space Optical Syst. and Appl.*, pp. 1-7, 2012.
- [11] Z. Ghassemlooy, W. Popoola e S. Rajbhandari, *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*, CRC Press, 2012.
- [12] Página da Faculdade de Tecnologia na Internet: <http://www.ft.unicamp.br/dadosmeteorologicos>.