

# Sistema para Medição da Constante de Estrutura do Índice de Refração para Enlaces Ópticos em Espaço Livre Baseado em Triangulação por Amplitude

Nelson C. N. Assis, André M. Tauk, Vinícius H. N. Silva, Andrés P. Lopez Barbero, Ricardo M. Ribeiro

**Resumo**— A propagação de feixes ópticos em espaço livre em meios turbulentos tem sido tema de investigações teórica e experimental nos últimos anos. Flutuações aleatórias no índice de refração causam alterações na forma de propagação da luz e como consequência efeitos são observados no feixe no plano receptor. O objetivo deste trabalho é mostrar os avanços no desenvolvimento de uma técnica capaz de medir os efeitos atmosféricos em enlaces FSO. A técnica permite a medida do  $C_n^2$ , calculando, em tempo real, o deslocamento radial  $r_c$  do feixe óptico no plano receptor, provocado pelos efeitos simultâneos do *Beam Wander* e *Beam Spread*.

**Palavras-Chave**—FSO, *Beam Wander*, *Beam Spread*, Turbulência atmosférica, constante estrutural para índice de refração.

**Abstract**—The propagation of optical beams in free space through turbulent media has been subject of theoretical and experimental investigations in recent years. Random fluctuations in refractive index cause changes in the way of propagation of the light as consequence effects are observed in the beam at receiver plane. The objective of this work is to presenting the progress of developing of a technique able to measure the atmospheric effects in FSO links. The technique allows the measurement of  $C_n^2$ , by calculating in real time, displacement  $r_c$  of optical beams at receiver plane, caused by the simultaneous effects of the *Beam Wander* and *Beam Spread*.

**Keywords**—FSO, *Beam Wander*, *Beam Spread*, Atmospheric Turbulence, Refractive index Structure Constant (RISC).

## I. INTRODUÇÃO

FSO é um sistema de comunicação banda-larga, sem fio que utiliza uma portadora óptica para transmitir informação através do ar. Um sistema ponto-a-ponto basicamente composto de dois transceptores—bi-direcionais alinhados em visada direta [1].

Inerentemente portátil, o FSO é reconhecido como uma tecnologia de transmissão de dados extremamente segura, onde a interceptação do canal de comunicação e a demodulação não autorizada do sinal apresenta grande grau de dificuldade. Não requer licenciamento do espectro como nas comunicações via rádio (RF), e por utilizar uma portadora óptica é imune a interferências eletromagnéticas [2]. Além disso, é uma tecnologia de baixo custo quando comparado as fibras ópticas, mas que ao mesmo tempo possui largura de banda equivalente. Nesse contexto, o FSO surge como uma das soluções a crescente demanda por banda, assim como, para o gargalo da última milha [3].

Entretanto, o FSO está sujeito inevitavelmente a efeitos atmosféricos que degradam o feixe óptico. Essa degradação causada pela turbulência atmosférica, espalhamento, absorção, entre outros, se torna evidente na atenuação, deflexão e defasamento do sinal óptico. Nesse sentido, faz-se necessário o estudo de técnicas com o propósito de entender e mitigar tais efeitos para aprimorar os sistemas FSO [4-6].

A turbulência atmosférica é a variação aleatória do índice de refração do ar à medida que ocorrem mudanças de temperatura, pressão e umidade na atmosfera. Assim, essas constantes alterações do índice de refração ao longo do tempo acabam por criar um meio turbulento que ao interagir com feixe óptico degrada as características do mesmo como, por exemplo, amplitude, fase e direção de propagação. Essa interação gera três efeitos bem conhecidos: Divagação, Cintilação e Espalhamento do feixe. Sendo os dois primeiros os maiores responsáveis pela degradação dos enlaces FSO. Na literatura é possível encontrar algumas técnicas e dispositivos para medir turbulência atmosférica como, por exemplo, interferômetros a fibra óptica [7], cintilômetros [5], sensores de frente de onda Shack-Hartman [8], câmeras CCD [9], PSD e detectores de quadrante [10-11].

Este trabalho apresenta os avanços da técnica inicialmente apresentada no SBRT 2009[18] e em artigo recentemente aceito para publicação [15]. Nestes trabalhos, o objetivo foi validar a técnica de triangulação por amplitude e mostrar que é possível rastrear o feixe óptico e, conseqüentemente, medir a divagação do feixe (*Beam Wander*) para monitorar a turbulência atmosférica através do cálculo do  $C_n^2$ . O dispositivo utilizado para comprovar a técnica era composto de três detectores devidamente colocados no plano do receptor e um microprocessador para realização dos cálculos. Também, é importante salientar que na ocasião os experimentos foram realizados em regime quase-estático e, para simular a divagação do feixe foram utilizados estágios de translação controlados manualmente no plano receptor. No trabalho aqui apresentado, foram realizados experimentos em regime dinâmico, ainda em ambiente de laboratório. Para isso o feixe óptico, ainda foi movimentado mecanicamente de tal forma a simular parcialmente o efeito da turbulência atmosférica. Através da análise analítica e estatística dos resultados, a técnica tem-se mostrado robusta e confiável para sua utilização em campo.

O trabalho está organizado da seguinte forma: Seção II descreve os principais efeitos da turbulência atmosférica, dando maior atenção ao efeito da divagação do feixe que será utilizado diretamente para aplicação da técnica; Seção III descreve qualitativamente a técnica proposta, e apresenta quantitativamente os parâmetros de mérito a serem medidos e

Nelson C. N. de Assis, A. M. Tauk, A. P. López-Barbero, R. M. Ribeiro, Lab. de Com. Ópticas (LaCOP), Curso de Mestrado em Eng. de Telecom., Univ. Fed. Fluminense, Niterói, Brasil, 24.210-240, E-mails: [ncevidanes@gmail.com](mailto:ncevidanes@gmail.com). V. H. N. Silva, Telecom-Bretagne, Optics Dep., Brest, Bretagne, France, 29200, E-mail: [vinicius.nunes@telecom-bretagne.eu](mailto:vinicius.nunes@telecom-bretagne.eu).

calculados; Seção IV mostra a montagem experimental da técnica em desenvolvimento e Seção V com os resultados e discussões relacionados aos experimentos realizados dinamicamente.

II. TURBULÊNCIA ATMOSFÉRICA E BEAM WANDER

A turbulência atmosférica é provocada pelo processo de aquecimento da superfície terrestre, e que provoca um aquecimento do ar que esteja próximo à terra, mudando sua densidade e conseqüentemente seu índice de refração. Por convecção, essas camadas de ar aquecidas sobem se misturando com camadas de ar a uma temperatura mais baixa, tornando o meio heterogêneo ou turbulento, gerando o que é chamado de células ou bolhas de ar. Distorções na frente da onda óptica, devido a não-homogeneidades na atmosfera, resultam em alargamento (*Beam Spread*) e variações aleatórias transversais no plano de recepção da posição do centro do feixe, chamado de divagação de feixe (*Beam Wander*). Além da mudança na forma de propagação, a turbulência atmosférica destrói a coerência espacial do feixe de laser, o que é chamado de Cintilação. Tal perda limita a qualidade na recepção do feixe de Laser [1,2,14,15].

Na técnica aqui em desenvolvimento utilizada para medir a turbulência atmosférica levam-se em consideração os efeitos do *Beam Wander* (deslocamento radial) e *Beam Spread* (alargamento do feixe). Porém, para o cálculo da constante  $C_n^2$  será levado somente em consideração o deslocamento radial. Desta forma, os efeitos de *Beam Spread* e *Cintilação* não serão mais abordados.

A variável  $r_c$  representa o deslocamento radial do centro do feixe luminoso no plano do receptor provocado pelo efeito da divagação do feixe. A magnitude de  $r_c$  pode ser obtida por coordenadas retangulares através da seguinte relação de transformação:

$$r_c = \sqrt{x_c^2 + y_c^2} \tag{1}$$

Considerando-se a origem do plano cartesiano em  $(x,y)=(0,0,0,0)$ .

O efeito de *Beam Wander* é caracterizado estatisticamente pela variância de  $r_c$  no plano de recepção.

A variância  $\langle r_c^2 \rangle$  em enlaces de FSO tem sido equacionada como uma relação empírica e depende dos parâmetros de largura do feixe  $W$ , do comprimento do enlace  $L$ , e da constante estrutural de índice de refração  $C_n^2$  [15]:

$$\langle r_c^2 \rangle = 2.42 C_n^2 W^{-1/3} L^3 \tag{2}$$

A equação (2) é apropriada para turbulência fraca e intermediária.

III. TÉCNICA PROPOSTA

A técnica proposta que vem sendo desenvolvida faz uso da triangulação por amplitude para o rastreamento do deslocamento radial de um feixe óptico, sujeito aos efeitos de divagação e de abertura de feixe óptico [12,15]. Assim, pela medida da variância radial e tendo em vista a equação (2), será feita a

estimativa do grau de turbulência atmosférica quantizado pela constante de estrutura de índice de refração  $C_n^2$ .

Tomando um sistema cartesiano como referência no plano receptor, será considerado que o feixe óptico incidente tem distribuição gaussiana, centrado no ponto  $(x_c, y_c)$  dada por

$$P(x, y) = P_c e^{-\left(\frac{r}{W}\right)^2} \tag{3}$$

sendo  $W$  a largura do feixe óptico gaussiano,  $r$  a distância de um ponto qualquer  $(x,y)$  do plano ao centro do feixe óptico dado por:

$$r = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} \tag{4}$$

Para o rastreamento do feixe óptico no plano receptor, a técnica requer a aplicação do método da triangulação por amplitude. Para isso, três detectores são instalados no plano receptor, conforme a Figura 1.

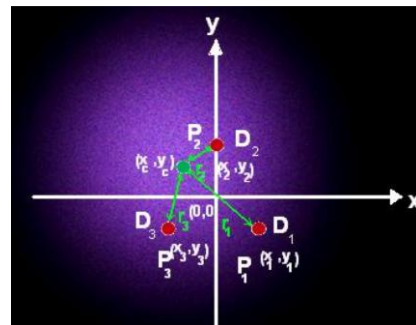


Fig. 1 Distribuição transversal do feixe óptico sobre o plano receptor. O feixe gaussiano está centrado em  $(x_c, y_c)$ . A figura mostra os 3 foto-detectores  $D_i$  e suas coordenadas  $(x_i, y_i)$ , com as correspondentes potências medidas  $P_i$  nos foto-detectores, e as distâncias  $r_i$  de cada detector ao centro do feixe gaussiano.

A distância  $r_i$  de cada foto-detector  $D_i$ , com  $i=1,2,3$ , ao centro do feixe óptico gaussiano é dada por

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} \tag{5}$$

sendo  $(x_i, y_i)$  as coordenadas dos três foto-detectores usados para aplicação da técnica aqui proposta.

A potência medida em cada foto-detector  $D_i$ , tendo em vista a Figura 1 e as equações (3), (4) e (5) é dada por

$$P_i = P_c e^{-\left(\frac{r_i}{W}\right)^2} \tag{6}$$

onde  $P_c$  é a potência no centro do feixe. A equação (4) quando aplicada aos foto-detectores  $i=1,2,3$ , e considerando  $\bar{P} = P_i / P_c$  gera o sistema de equações abaixo:

$$\begin{cases} (x_1 - x_c)^2 + (y_1 - y_c)^2 - W^2 \left( -\ln \bar{P} \right) = 0 \\ (x_2 - x_c)^2 + (y_2 - y_c)^2 - W^2 \left( -\ln \bar{P} \right) = 0 \\ (x_3 - x_c)^2 + (y_3 - y_c)^2 - W^2 \left( -\ln \bar{P} \right) = 0 \end{cases} \tag{7}$$

Com a solução do sistema (7) obtém-se  $(x_c, y_c)$  e  $W$ , que representa a posição do centro do feixe óptico no plano

receptor (deslocamento radial do feixe) e a largura do feixe, respectivamente. O sistema (7) é resolvido em tempo real usando a função FSOLVE, do Matlab, própria para resolver sistemas de equações não lineares a partir de uma *guess value*. A função utiliza o algoritmo de Levenberg-Marquardt para otimização de soluções.

Com a posição  $(x_c, y_c)$  obtida e usando a equação (1) determina-se o deslocamento radial do feixe em relação ao centro de origem do sistema Cartesiano (2D). Através da análise estatística da dinâmica de  $r_c$  em um intervalo de tempo, obtém-se a variância deslocamento radial do feixe  $\langle r_c^2 \rangle$  que aplicada à equação (2) infere-se o grau de turbulência atmosférico  $C_n^2$ .

#### IV. MONTAGEM EXPERIMENTAL

A Figura 2 ilustra o diagrama em blocos da montagem experimental destinada à coleta de dados para rastreamento do feixe de luz. Foram utilizados os seguintes componentes: Laser de bombeio de 600mW em 980nm da EM4 inc. modelo EM4 P161, atenuador de 5dB, bobina de fibra STD, controlador de temperatura da ILX Light Wave modelo LTD-5525, fonte de corrente controlada da Newport modelo 5030, placa de aquisição de dados da National Instruments modelo NI-USB 6216, computador, circuito RC, filtro de modos, motor de passo, fontes de tensão para alimentação de circuitos. No plano receptor, como mostrado nas Figuras 1 e 2, foram instalados os 3 foto-detectors,  $D_i$ , cuja potência detectada  $P_i$  é convertida em um valor de tensão elétrica  $V_i$ , através de um circuito de polarização formado por um resistor de carga. Como  $V_i$  é proporcional à potência  $P_i$ , e estas potências serão utilizadas em nossos cálculos na forma normalizada  $\bar{P} = P_i / P_c$ , como mostrado na Seção III, podemos nos referir às potências  $P_i$  ao longo do texto pelas tensões medidas  $V_i$ .

Com o propósito de controlar rigorosamente todos os parâmetros envolvidos no desenvolvimento da técnica, foi necessário garantir a simetria gaussiana do feixe óptico no plano receptor. A luz emitida pela fonte óptica foi acoplada a uma bobina de fibra óptica STD, de 5.5km, a fim de diminuir a coerência temporal da fonte óptica, diminuindo assim os efeitos de cintilação no experimento. Adicionalmente, um filtro de modos foi utilizado na saída da bobina de fibra óptica a fim de eliminar os modos de alta ordem excitados pelo uso de luz de comprimento de onda de 980nm na fibra STD, assegurando assim o formato gaussiano do *spot*. O plano receptor contendo os foto-detectors  $D_i$  foi posicionado a  $L=33$  cm da saída da fibra óptica STD, como visto na Figura 2.

Com a finalidade de armazenar e operar matematicamente os dados de tensão dos foto-detectors  $D_i$ , foi usada uma placa de aquisição (conversor AD) em um computador portátil. Neste, uma interface feita em Matlab para processamento e pós-processamento foi utilizada.

No trabalho anterior [12, 14, 15], a movimentação do feixe óptico foi substituída pela movimentação manual do anteparo do plano receptor contendo os foto-detectors  $D_i$ , usando estágios de translação.

No trabalho aqui apresentado a movimentação do feixe óptico se dará através do uso de um mecanismo que, com auxílio de um motor de passo acoplado à ponta de saída da fibra óptica STD, simulará o efeito de divagação do feixe em ambiente de laboratório.

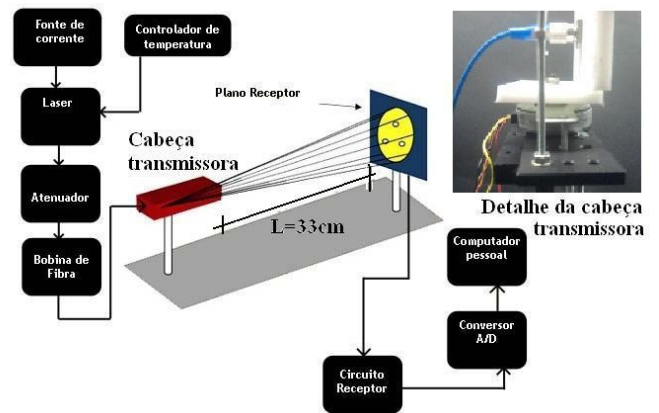


Fig. 2. Diagrama em blocos do esquema de montagem experimental. Em detalhe é mostrado o mecanismo de movimentação horizontal do feixe óptico na cabeça transmissora para simulação da turbulência em ambiente de laboratório.

O arranjo experimental aqui usado realiza o cálculo do deslocamento radial em tempo real. Sendo assim, a cada aquisição da tensão nos circuitos dos foto-detectors o sistema de equações (7) é ativado, gerando como resultado a posição do centro do feixe óptico  $(x_c, y_c)$  e a largura  $W$ .

#### V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como mostrado na Figura 1, os foto-detectors  $D_i$  foram posicionados no plano receptor na forma de um triângulo equilátero, sendo  $d$  a distância entre estes. Através de uma simples análise geométrica, a relação entre  $d$  e a distância  $r$  entre os foto-detectors e o centro do sistema cartesiano é  $d = r\sqrt{3}$ . As coordenadas dos fotodetectors são mostradas na Tabela 1, onde nota-se que  $d=33.7$ mm.

TABELA I. COORDENADAS CARTESIANAS DOS FOTODETECTORES

I	1	2	3
$x_i$ [mm]	-16,97	0	16,91
$y_i$ [mm]	-9,80	19,47	-9,76

Após a devida calibração de posição do sistema, foi feita uma medida da dinâmica de deslocamento do feixe óptico no plano receptor, mostrada na Figura 2(a). Para esta medida, o motor de passo foi controlado via interface feita em Matlab, e foi imposto a este um movimento oscilatório horizontal de um passo para a esquerda e outro para a direita de  $1.8^\circ$ /passo. Este ângulo de deslocamento angular da fonte, e considerando a distância  $L=33$  cm do arranjo experimental, impõe um deslocamento radial no plano receptor de  $r_c=10.37$  mm, para cada lado, totalizando 20.74 mm. Através da placa de

aquisição, foram coletadas 100000 amostras de tensão dos circuitos dos foto-detecores durante 3 segundos. A taxa de amostragem superior a 33kHz é suficiente para amostrar um deslocamento radial do feixe de 15kHz, muito superior à frequência de deslocamento radial citado na literatura para o efeito do Beam Wander, tipicamente de 1kHz[1].

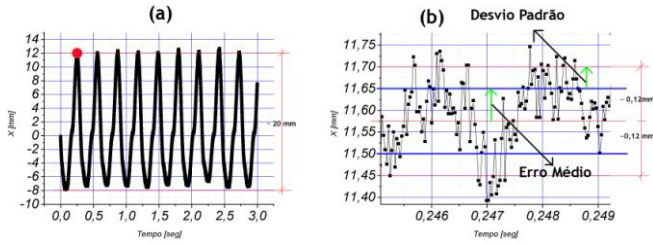


Fig. 3. (a) Rastreamento do feixe óptico no domínio do tempo, durante 3s, mostrando um deslocamento radial total de aproximadamente 20 mm em concordância com o valor de 20.74mm imposto no experimento. (b) Detalhe da Figura 2(a) para visualização do ruído, durante 3ms. Note que em volta do valor médio do deslocamento radial medido de 11.555, observa-se um erro médio de 0.08mm, e com desvio adicional de 0.04mm, obtendo erro máximo de 0.12mm.

O resultado mostrado na Figura 3 foi obtido resolvendo o sistema de equação (7), usando  $P_c=90mV$ . Além da posição instantânea do centro do feixe, o sistema (7) calculou a largura do feixe gaussiano com média de  $W\sim 19,5mm$ . Note da Figura 3(a) que o valor calculado do deslocamento radial do feixe oscila entre -8 mm e até 12 mm, totalizando uma excursão de 20 mm, que está em concordância com o valor imposto no experimento de 20.74mm. Na Figura 3(b) é mostrado em detalhe parte do traçado em destaque da Figura 3(a). A largura deste traçado, diretamente ligado à resolução do dispositivo em desenvolvimento, indica a presença de ruído nos foto-detecores.

Para melhor avaliar o ruído nos foto-detecores e consequentemente a resolução do sistema nas condições do arranjo experimental, foi feito um experimento com a cabeça transmissora em repouso, durante 3 segundos e em tempo real. O resultado deste experimento é mostrado na Figura 4.

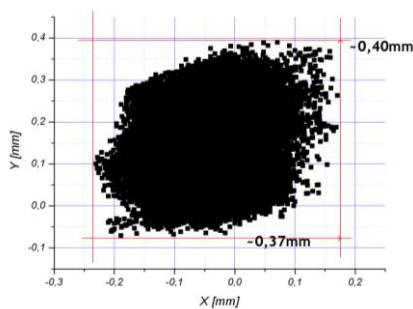


Fig. 4 Rastreamento do feixe óptico em tempo real com o feixe óptico em repouso, durante 3 segundos, mostrando uma variação do deslocamento radial máxima de aproximadamente 0.4mm.

A Figura 4 mostra a variação do deslocamento radial em torno de um ponto central, com uma concentração de pontos dentro de uma área de aproximadamente 0,37 mm x 0,40 mm. O valor dos parâmetros para este experimento foram os mesmos adotados no resultado apresentado na Figura 3. Como apontado

no experimento anterior, à presença de ruído nos foto-detecores provoca um erro absoluto  $\epsilon_{r_c}$  no cálculo do deslocamento radial definido como sendo

$$\epsilon_{r_c} = \sqrt{(x_c - \bar{x})^2 + (y_c - \bar{y})^2} \quad (8)$$

Na ausência de ruído, todas as posições  $(x_c, y_c)$  convergiriam para um único ponto na posição média  $(\bar{x}, \bar{y})$ . Com o auxílio da equação (8) e os dados do experimento mostrado na Figura 4 foram calculadas a distribuição de probabilidade do erro absoluto  $\epsilon_{r_c}$  do deslocamento radial, e a correspondente função de densidade de probabilidade, mostradas na Figura 5(a) e Figura 5(b).

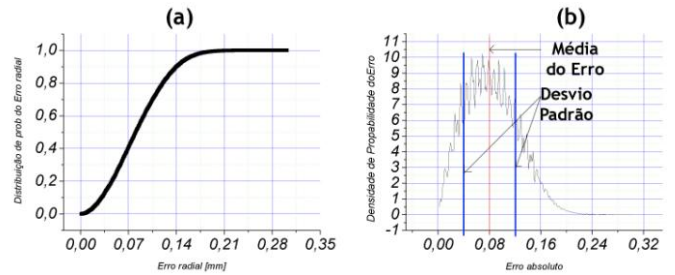


Fig. 5 (a) Função distribuição de probabilidade do erro absoluto do deslocamento radial, e (b) Função densidade de probabilidade do erro de movimentação radial.

Da análise das funções estatísticas [16] da Figura 5 tem-se que a média e o desvio padrão do erro absoluto do deslocamento radial são, respectivamente, 0,083mm e 0,04mm. Note, na Figura 3(b) que em torno do valor médio do deslocamento radial medido, de aproximadamente 11.555mm, é percebida a presença de um erro médio de 0.08mm e ainda com a existência de valores extremos de 0.12mm, em plena concordância com a estatística mostrada na Figura 5.

Com o objetivo de comparar o resultado estatístico do erro absoluto obtido pela análise dos dados experimentais com o valor teórico esperado, foi desenvolvida uma expressão analítica, baseada na equação (4). Então, calculando a taxa de variação da potência em qualquer dos foto-detecores, temos [15]:

$$\frac{dP_i}{dr} = \frac{\Delta P_i}{\Delta r} = \frac{P_c \cdot 2 \cdot r \cdot e^{-(r/W)^2}}{W^2} \quad (9)$$

Desta forma podemos equacionar qual é o valor da variação do deslocamento  $\Delta r$  em função da variação de potência no foto-detector  $\Delta P_i$ , obtendo:

$$\Delta r = \frac{W^2 \Delta P_i e^{(r/W)^2}}{2 \cdot r \cdot P_c} \quad (10)$$

Considerando que a variação de potência  $\Delta P_i$  tem origem no ruído no foto-detector, a quantidade  $\Delta r$  passa a representar o erro induzido por esse ruído na medida do experimento. A Figura 6 mostra o valor das tensões medidas nos 3 foto-detecores durante 30ms do experimento da Figura 4.

## REFERENCIAS

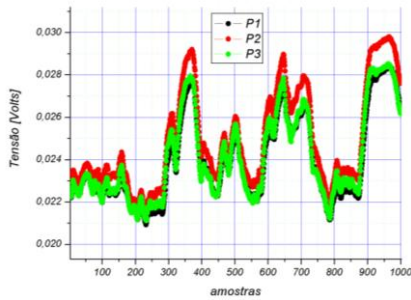


Fig. 6 Tensões medidas nos foto-detecores durante 30ms do experimento da Figura 4.

A análise estatística dos dados das tensões medidas da Figura 6 mostra a presença de um ruído médio de  $P_{noise} = \Delta P = 1,1\text{mV}$ . Recorrendo à equação (10) com  $W=19,57\text{mm}$ ,  $P_c = 90\text{ mV}$  e  $\Delta P_i = 1,1\text{ mV}$ , obtém-se  $\Delta r=0,32\text{mm}$ .

Contudo, o valor de  $\Delta r=0,32\text{mm}$  deve sofrer uma correção uma vez que no caso do feixe se mover, a potência coletada por um foto-detector cresce a um certo valor enquanto que nos outros a potência decresce na mesma proporção. Então, para que a diferença de potência entre dois foto-detecores seja de  $\Delta P$ , é necessário que haja uma variação de  $-\Delta P/2$  em um, e de  $\Delta P/2$ . Assim, a equação (10) pode ser reescrita como [15]:

$$R_L = \frac{W^2 \Delta P e^{(r/W)^2}}{4 \cdot r \cdot P_c} \quad (11)$$

onde  $R_L$  é o limite da resolução do experimento, dado por

$$R_L = \frac{\Delta r}{2} = 0,16\text{mm}$$

que está em concordância com o valor mostrado na Figura 3(b) para a soma da média com o desvio padrão do erro absoluto do deslocamento radial.

## VI. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi mostrado o avanço no desenvolvimento de uma técnica capaz de caracterizar o grau de turbulência de um meio para uso em um enlace de FSO. A técnica aqui apresentada mostra reais possibilidades de sua aplicação em campo, rastreamento a dinâmica do deslocamento radial do feixe óptico no plano receptor. As análises estatística e analítica mostraram perfeita concordância quantitativa, o que demonstra domínio da técnica em desenvolvimento. Desta análise, e da equação (11) foi mostrado que o limite de resolução da técnica para a medida do deslocamento radial depende fortemente da SNR nos foto-detecores, assim como da relação em campo entre a distância entre os foto-detecores do dispositivo e a largura do feixe óptico  $W$  [15].

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES (bolsa de estudo e financiamento via Programa Pró-Defesa) e ao CNPq (bolsa de apoio técnico processo 503709/2010-7) pelo financiamento parcial a este projeto.

- [1] Dr. Heinz Willebrand e Baksheesh S. Ghuman, *Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks*. Editora Sams, 2002.
- [2] FSona Optical Wireless, FSO Guide ([http://www.fsona.com/technology.php?sec=fso\\_guide](http://www.fsona.com/technology.php?sec=fso_guide)). Último acesso em 21 de abril de 2011.
- [3] V. Ramasarma, "Free Space Optics: A Viable Last-Mile Solution," Bechtel Telecommunications Technical Journal, vol. 1, pp. 22-30, Dec. 2002.
- [4] F. Levander and L. S. Sakari, "Design and Analysis of an All-optical Free-space Communication Link," Dissertação de mestrado, Universidade de Linköping, Suécia, May 2002.
- [5] C. O. Font Jimenez, Mayagüez, E. S. Oh, M. P. Chang and G. C. Gilbreath, "Humidity contribution to the strength of turbulence parameter  $Cn^2$ ", Proceedings of SPIE Vol. 6215, 2006.
- [6] C. P. Colvero, M. C. R. Cordeiro and J. P. von der Weid, "FSO Systems: Rain, Drizzle, Fog and Haze Attenuation at Different Optical Windows Propagation," SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC 2007), pp. 563-568, Nov. 2007.
- [7] Marc D. Mermelstein, "Fiber-Optic Atmosphere Turbulence Sensor," Optics Letters, vol. 20, no. 18, pp. 1922-1923, Sep. 1995.
- [8] G. D. Love, C. N. Dunlop, S. Patrick, C. D. Saunter, R. W. Wilson and C. Wright, "Horizontal turbulence measurement using SLODAR," Proceedings of SPIE, vol. 5891, 589104, Aug. 2005.
- [9] H. Yuksel, C. C. Davis and L. Wasiczko, "Aperture Averaging Experiment for Optimizing Receiver Design and Analyzing Turbulence on Free Space Optical Communication Links," Conference on Lasers & Electro-Optics (CLEO), vol. 1, paper CTuG4, pp. 743-745, May 2005.
- [10] Gustavo Funes, Damián Gulich, Luciano Zunino, Darío G. Pérez and Mario Garavaglia, "Behaviour of the Laser Beam Wandering Variance with the Turbulent Path Length," Optics Communications, vol. 272, no. 2, pp. 476-479, Apr. 2007.
- [11] Damián Gulich, Gustavo Funes, Luciano Zunino, Darío G. Pérez and Mario Garavaglia, "Angle-of-Arrival Variance's Dependence on the Aperture Size for Indoor Convective Turbulence," Optics Communications, vol. 277, no. 2, pp. 241-246, Sep. 2007.
- [12] Vinícius N. H. Silva, *Desenvolvimento Experimental de uma Nova Técnica para a Medição da Turbulência Atmosférica, em Enlaces Ópticos Horizontais no Espaço Livre*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil, Mar. 2009.
- [13] Larry C. Andrews e Ronald L. Phillips, *Laser Beam Propagation through Random Media*, segunda edição, SpiePress, 2005.
- [14] Vinícius N. H. Silva, Andrés P. L. Barbero e Ricardo M. Ribeiro, *Experimental Development of a New Technique to Measure Atmospheric Turbulence in Horizontal Optical Links Through Free Space*, Proceedings of the International Workshop On Telecommunications (IWT 2009), pp. 09-11, February 16-19, São Paulo, SP, Brasil, Feb. 2009.
- [15] Vinícius N. H. Silva, Andrés P. L. Barbero e Ricardo M. Ribeiro, *A New Triangulation Like Technique for the Evaluation of the Refractive Index Structure Constant ( $C^2$ ) in Free-Space Optical Links*, paper aceito para publicação no JLT 2010.
- [16] T. T. Soong, *Fundamentals of probability and statistics for engineers*, John Wiley and Sons, 2004.
- [17] Shaik K.S., *Atmospheric propagation effects Relevant to Optical Communications*. Paper
- [18] Silva, V.N.H. ; López-Barbero, A.P. ; Ricardo M. Ribeiro . *Nova Técnica para a Medida da Constante de Estrutura para o Índice de Refração ( $Cn^2$ ) em Sistemas de Óptica no Espaço Livre..* In: XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBRT 2009), 2009, Blumenau. Anais do XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBRT 2009), 2009.