

Desenvolvimento de Uma Sonda Optoeletrônica Ressonante Para Sinais Eletromagnéticos até VHF Visando Aplicações em Telecomunicações

Ricardo M. Ribeiro, Odair S. Xavier, Jorge A. M. Souza e Andrés P. L. Barbero

Laboratório de Comunicações Ópticas
Departamento de Engenharia de Telecomunicações
Universidade Federal Fluminense
24.210-240 Niterói RJ Brasil

Resumo – Este trabalho descreve pela primeira vez o desenvolvimento experimental de uma sonda optoeletrônica de sinais de rádio na faixa MF/HF/VHF que mostra o formato de onda completo. Uma antena *loop* ressonante, passiva e sintonizável, alimenta um LED ultra-brilhante que é modulado pela corrente em RF gerada. O sinal luminoso é enviado por fibra óptica plástica (POF) de PMMA para um receptor óptico remoto. As medidas são feitas em campo-próximo. A sonda não-calibrada apresenta 47,7 dB_{μV} de faixa dinâmica. Uma técnica de compensação da variação da atenuação do enlace em até 5,5 dB é proposta e testada com sucesso.

Palavras-chave – Antena *loop*, fibra óptica plástica, MF/HF/VHF, LED, sonda eletromagnética.

Abstract – We show for the first time the experimental development of an optoelectronic probe for radio signals in the MF/HF/VHF band that displays the complete waveforms. A resonating, tunable and passive loop antenna generates RF current modulating an ultra-bright LED. The light signals are transmitted by PMMA plastic optical fibre (POF) to an optical receiver in a remote location. All measurements are done in the near-field region. The uncalibrated probe has shown 47.7 dB_{μV} dynamic range. A new technique for compensation of link attenuation variation is proposed and successfully tested until 5.5 dB optical loss.

Keywords – Loop antenna, plastic optical fibre, MF/HF/VHF, LED electromagnetic probe.

I. INTRODUÇÃO

O presente trabalho foi motivado a partir de um sistema de radar aeroportuário que supostamente apresentava

Ricardo M. Ribeiro, rmr@pq.cnpq.br, Odair S. Xavier, odairxavier@yahoo.com.br, Jorge A. M. Souza, mitrione@oi.com.br, Andrés P. L. Barbero, pablo@telecom.uff.br. Os autores agradecem ao MCT/CNPq e a Faperj pelo apoio financeiro recebido através das concessões 303102/2006-3 e E-26/171.158/2005, respectivamente.

vazamento de microondas nas junções de guias de ondas, tornando-se então importante monitorar o nível (perigoso ou letal) de potência, pois diversas pessoas transitam no local. A idéia era posicionar próximo a cada junção das guias um sensor óptico de microondas fazendo telemetria remota via fibra óptica. A segunda motivação, foi uma decisão do grupo de iniciar pesquisas experimentais [1] na tecnologia de *Radio-over-Fibre* [2].

As sondas eletromagnéticas geralmente medem apenas a amplitude média do campo elétrico/magnético ou o vetor de Poynting da onda, fazendo então a retificação do sinal (conversão DC) com o uso de um diodo Schottky de chaveamento rápido. Desta forma, perdem-se diversas informações a respeito da onda eletromagnética sendo mensurada, tais como o seu formato e os diversos parâmetros. Além da medida da amplitude, certas situações podem requerer a detecção e o monitoramento do formato de onda dos sinais de rádio. Tais informações são extremamente importantes, por exemplo, no diagnóstico de Compatibilidade Eletromagnética (EMC) quando a amplitude de campo eletromagnético deve ser monitorada e comparada com limites de segurança ou tolerância dependentes da frequência [3].

A unidade de captura de RF deve ser fixada no ambiente a ser monitorado e a de recepção/processamento poderá ou deverá situar-se em localidade remota. As unidades devem ser ligadas entre si por um cabo de telemetria suficientemente longo. Cabos coaxiais podem influenciar as medidas, já que conduzem corrente e passam a funcionar como uma antena parasita, atenuam o sinal, irradiam e espalham ondas eletromagnéticas [4]. O uso de um enlace telemétrico de fibra óptica elimina possíveis problemas de interferência eletromagnética e evita a obtenção de falsos resultados de medidas, além de reduzir a atenuação do sinal, do volume, e do peso, em comparação com os cabos metálicos.

As sondas optoeletrônicas receptoras de campos elétricos ou magnéticos têm sido desenvolvidas desde os anos 80 de forma que as respectivas antenas geram correntes capazes de modular diodos laser [5,6] e LEDs [7]. Para que estas fontes luminosas operem em regime linear e com grande eficiência, torna-se necessário aplicar corrente de polarização (*bias*) nas mesmas [7].

As antenas *loop* são menos susceptíveis a ruídos eletromagnéticos que os outros tipos de antenas filiformes [8]. Este trabalho descreve o desenvolvimento de uma sonda optoeletrônica baseada numa antena *loop* passiva, ressonante e sintonizável para sinais de rádio, que apresenta um aspecto pouco comum e duas novas contribuições, respectivamente: operação em baixas frequências na faixa 0,4-40 MHz (MF/HF/VHF), utilização da tecnologia de POFs combinada com LEDs ultra-brilhantes e a introdução de uma técnica para compensar variações da atenuação no enlace de POF. Na realidade, o presente trabalho mostra uma evolução considerável quando comparado com os resultados descritos em [1], conforme os dois exemplos relatados a seguir. O presente artigo mostra experimentos até o início da faixa VHF, enquanto que [1] limitava-se a 2 MHz. Além disto, é aqui descrito um receptor óptico com pré-amplificador integrado, enquanto que em [1], apenas um foto-diodo de Si polarizado inversamente era utilizado.

Alguns exemplos de aplicações das sondas optoeletrônicas em Telecomunicações são: caracterização em campo próximo de antenas [5,7] e de circuitos de alta-frequência [9], monitoramento da poluição eletromagnética devido a radio-tele-difusão e serviços sem-fio [3], monitoramento da interferência causada por *Broadband Power Line* (1,7-80 MHz) nas radiocomunicações [10], conexão remota entre antenas e o aparelho de rádio, inclusive para as faixas AM e HF [11,12], etc.

II. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL E O PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA SONDA

A Figura 1 mostra esquematicamente o circuito equivalente da sonda optoeletrônica composta de uma antena *loop* alimentando um circuito optoeletrônico, que por sua vez é conectado a um receptor óptico através de 4,6 m de POF padrão (980/1000 μm e $\text{NA} = 0,50$) de PMMA.

Uma antena *loop* originalmente fazendo parte de um receptor comercial de rádio AM é conectada a um LED de GaAlAs emitindo 3,5 cd @ 20 mA em torno de 660 nm com 25 nm de largura espectral, modelo B5b-436-30 da Laser Roithner (Viena, Áustria). A atenuação de potência da presente combinação POF + LED é de ~ 1 dB enquanto que a POF apenas apresenta cerca de 2 GHz de largura de banda. A antena é eletricamente curta [13] até uma frequência de $\sim 8,6$ MHz pois $\text{NC} = 3,6 \text{ m} < \lambda/10$ onde $N = 8$, $C = 45 \text{ cm}$ e λ está situado entre 750 m e 30 m. A indutância medida da antena é de 31 μH . Diversos capacitores discretos (cerâmicos) e variáveis são conectados, por vez, combinados ou não, em série, podendo cobrir de centenas de pF até praticamente 0 pF. Desta forma, pode-se obter a ressonância do circuito entre 0,4 e >40 MHz.

ANTENA LOOP

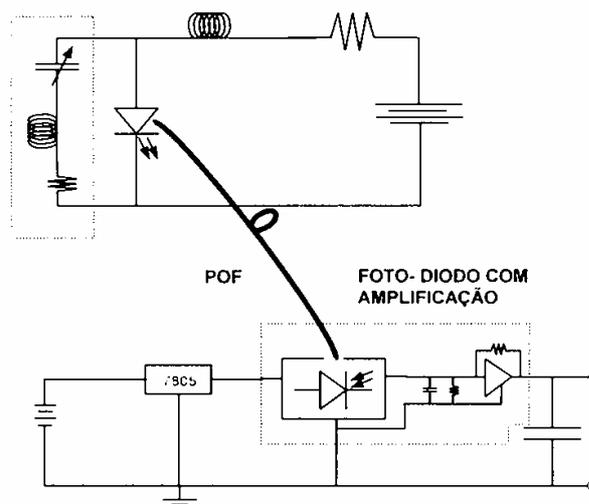


Fig. 1. Diagrama esquemático do circuito equivalente da sonda optoeletrônica.

A antena captura o fluxo de campo magnético criando uma corrente em RF que é injetada e modula o LED. Entretanto o sinal gerado pela antena é em geral muito fraco para vencer a barreira de potencial do LED ($V_{\text{limiar}} \approx 1,7 \text{ V}$), então é necessário fornecer uma voltagem de polarização usando uma fonte ajustável ou uma bateria. Em boa parte dos experimentos, o LED é polarizado diretamente com $V_{\text{DC}} \approx 3,7 \text{ V}$, bem acima do seu valor limiar. A resposta potência-corrente do LED torna-se bastante linear e sensível à corrente RF injetada em superposição a corrente DC de polarização. Isto garante a obtenção de um análogo do formato de onda fiel ao sinal de RF. A luz é acoplada diretamente do LED (com domo polido) para a extremidade clivada da POF (*butt-coupling*).

O receptor óptico constitui-se de um fotodiodo de Si com pré-amplificador integrado baseado num FET, modelo S6468-02 da Hamamatsu, com 35 MHz de largura de banda e 20 k Ω de ganho de transimpedância implicando numa sensibilidade de 11 mV/ μW . Uma janela de vidro protege o *chip* semiconductor de 0,8 mm de diâmetro, sendo que a extremidade clivada da POF é posta em contato direto com a primeira. Não se utiliza qualquer micro-lente para focalizar a luz no fotodiodo. Cálculos geométricos estimam em ~ 10 dB a perda na fotodetecção. Um capacitor na saída elimina as auto-oscilações que surgem quando o foto-diodo é apenas polarizado. Os formatos de onda de sinais de rádio provenientes da modulação da portadora óptica entre 0,4 e >40 MHz foram mostrados e armazenados num osciloscópio digital de 2 canais TDS 2022B da Tektronix.

Para a realização dos testes com a sonda optoeletrônica, foi utilizado um gerador de formatos de onda arbitrários AFG3101 da Tektronix, diretamente conectado a uma antena *loop* não-ressonante de mesmas dimensões que a antena utilizada na sonda. O gerador tem capacidade de entregar no máximo apenas 250 mW de potência a uma carga casada com 50 Ω . Não foram então

feitos esforços no sentido de se obter transmissão de sinais de rádio com grande amplitude de campo magnético.

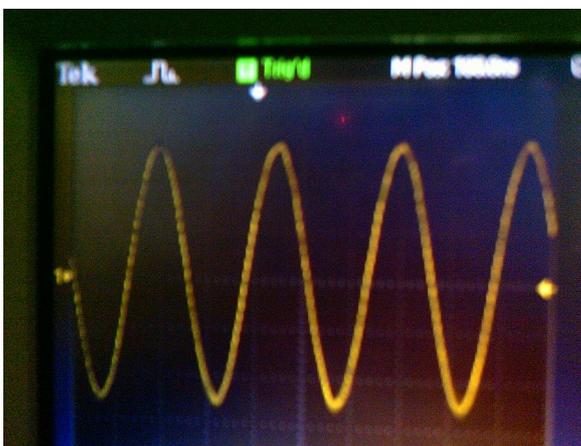
III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Formato temporal do sinal de RF

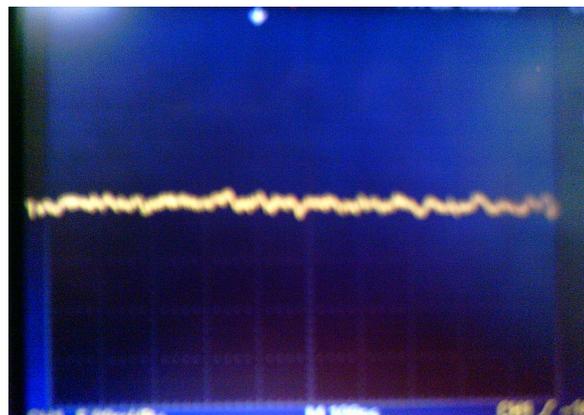
A Figura 2a mostra um formato de onda da portadora óptica como observado no osciloscópio, correspondente a uma excitação senoidal do gerador de ondas em 3,96 MHz com as antenas *loop* mantidas numa distância fixa entre si de 33,5 cm.

Um capacitor mecânico variável de valor adequado é utilizado no circuito e ajustado aproximadamente até se obter uma condição próxima da ressonância. Um ajuste fino de ressonância é obtido para uma frequência de 3,96 MHz variando a frequência do gerador de ondas. Um sinal bastante fiel à onda senoidal original pode aqui ser observado e nenhum procedimento de armazenamento de dados de medida e cálculo de média foi aplicado. Portanto os formatos de onda são obtidos em tempo real.

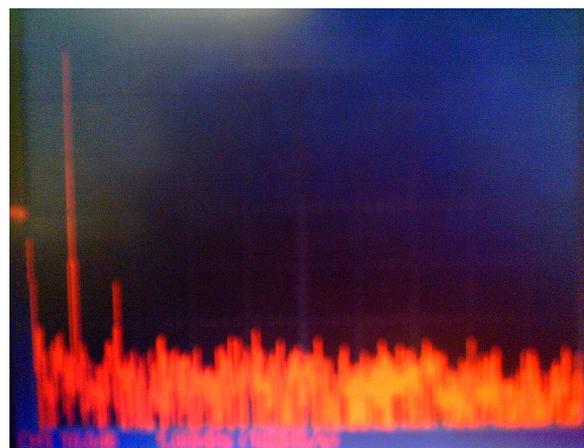
Em todas as medidas, a conexão óptica entre o LED e a POF é desfeita para que a autenticidade do sinal fosse confirmada. Neste último caso, sempre se observa apenas uma linha de base (nível de ruído) no osciloscópio, com cerca de 1,7 mV pico-a-pico, conforme mostrado na Figura 2b. A Figura 2c mostra o gráfico da Transformada Rápida de Fourier (FFT) a partir do formato de onda mostrado na Figura 2a. Pode-se notar claramente a presença de um pico exatamente em 3,96 MHz e outro em 7,92 MHz (segundo harmônico) cerca de 40 dB_V abaixo da amplitude do primeiro, que por sua vez encontra-se também cerca de 50 dB_V acima do nível de ruído. Isto atesta a pureza senoidal do sinal obtido pela sonda.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. (a) Formato de onda no osciloscópio (5 mV/div e 100 ns/div) do sinal de RF em 3,96 MHz demodulado no tempo, (b) linha de base com acoplamento óptico desfeito e (c) FFT do sinal (10 dB_V/div e 5 MHz/div).

Comparando os formatos de onda gerados pela sonda, com resultados obtidos anteriormente onde apenas um fotodiodo de silício (sem pré-amplificador) era utilizado para o dispositivo operando em 2 MHz [1], obteve-se um aumento de ~ 26 dB_V na amplitude de sinal.

A Figura 3a mostra um formato de onda da portadora óptica como observado no osciloscópio, correspondente a uma excitação senoidal do gerador de ondas em 30,9 MHz (início da faixa VHF) com as antenas *loop* mantidas numa distância fixa entre si de 33,5 cm. A Figura 3b mostra o nível de ruído no domínio do tempo com uma amplitude máxima de ~ 1,5 mV pico-a-pico. Comparando as amplitudes dos oscilogramas 3a e 3b, pode-se inferir uma relação sinal-ruído > 8,5 dB_V. A Figura 3c mostra o gráfico da Transformada Rápida de Fourier (FFT) a partir do formato de onda mostrado na Figura 3a. Pode-se notar claramente a presença de um único pico exatamente em 30,9 MHz, cerca de 13 dB_V acima do nível de ruído, que de forma mais precisa pode ser atribuído como sendo a relação sinal-ruído.

um fotodiodo com pré-amplificador integrado com frequência de corte nominalmente de -3dB em 35 MHz.

B. Medida da faixa dinâmica

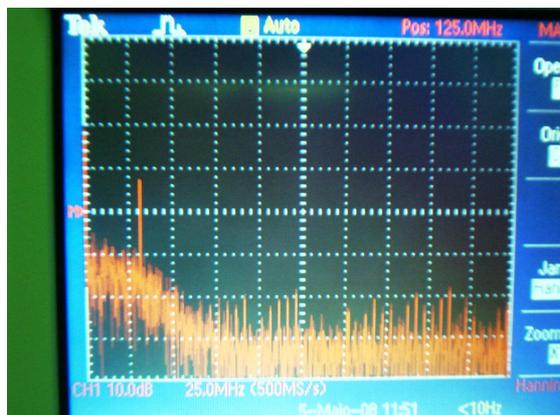
A Figura 4 mostra a medida da amplitude de voltagem pico-a-pico (mV) em função da distância entre as antenas *loop* em unidades de λ . O referido sinal numa frequência de 2,42 MHz, foi medido na tela do osciloscópio (similar ao mostrado na Figura 2).



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. (a) Formato de onda no osciloscópio (2 mV/div e 25 ns/div) do sinal de RF em 30,9 MHz demodulado no tempo, (b) linha de base com acoplamento óptico desfeito e (c) FFT do sinal (10 dBV/div e 25 MHz/div).

A sonda foi capaz de detectar e mostrar formatos de onda senoidais com até 43 MHz (VHF) de frequência, mesmo utilizando um LED do tipo emissor de superfície e

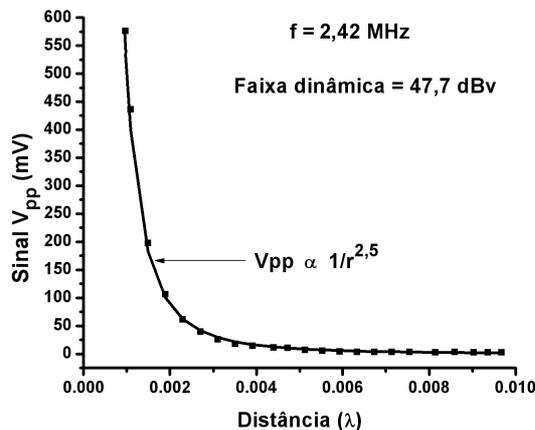


Fig. 4. Sinal de amplitude de voltagem pico-a-pico em função da distância (12-120 cm) entre as antenas *loop* operando em 2,42 MHz no campo-próximo, em unidades de comprimento de onda.

As medidas foram feitas a partir de 12 cm de distância entre as antenas, até a maior distância possível (120 cm) nas mesmas condições, de forma que a amplitude de sinal ficasse bem próxima da amplitude de ruído (~1,7 mV).

Os sinais de amplitude de voltagem medidos são proporcionais à amplitude do campo magnético capturado pela antena *loop* da sonda que opera em regime de campo-próximo. Para tal, é teoricamente [14] previsto uma dependência $\sim 1/r^3$, onde r é a distância entre as antenas. O resultado experimental mostrou uma dependência com $\sim 1/r^{2,5}$ que embora discrepante, mostra que não se trata do regime em campo-distante, onde uma dependência $1/r$ seria obtida. A partir do maior e menor valor de amplitude de voltagem possível de medir, obtém-se a faixa dinâmica de operação da sonda como sendo de 47,7 dB_V.

C. Medida da resposta em frequências

A Figura 5 mostra a resposta em frequências da sonda operando entre 0,4 e 9,0 MHz com as antenas operando no regime de campo-próximo, distando entre si de 33,5 cm.

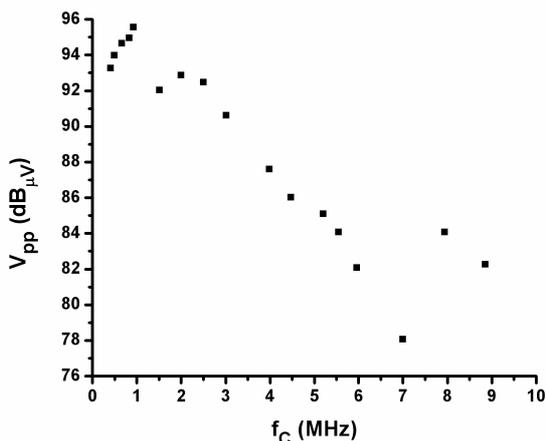


Fig. 5. Resposta em frequências da sonda optoeletrônica operando em campo próximo (33,5 cm de distância entre as antenas) na faixa 0,4 - 9,0 MHz.

Na realidade, o gráfico da Figura 5 mostra a resposta em frequências do par de antenas *loop* utilizadas. Portanto, tal comportamento é aproximadamente atribuído à sonda por si só. Observa-se que a sensibilidade da sonda, diretamente ligada ao fator da antena (*antenna factor*), é máxima dentro da faixa AM de rádiodifusão, pois a antena *loop* utilizada foi originalmente projetada para a referida faixa. Os capacitores de sintonização permitem fazer a sonda ressonar em mais altas frequências, entretanto com desempenho (em dB_{μV}) linearmente decrescente numa taxa de 3,1 dB_{μV}/MHz à medida que a frequência aumenta. Esta perda de desempenho deve-se provavelmente a diversos fatores adicionais à antena *loop*, como a resposta em frequência do LED e as perdas nos capacitores. A melhora do sinal em 8 e 9 MHz deve-se no momento a causas desconhecidas. Com o mesmo capacitor de ressonância, pode-se observar sinal de amplitude de voltagem > 6 dB_{μV} acima do ruído até 10,2 MHz.

D. Compensação da variação da atenuação no enlace de POF

Curvaturas, envelhecimento, variação de comprimento e novas conexões podem mudar a atenuação (de ~1 dB em 4,6 m) no enlace de POF. Ainda que o nível de potência de RF incidente se mantenha constante, a amplitude de modulação (I_{RF}) sobre a portadora óptica vista no osciloscópio irá variar se a atenuação da POF também variar. Seria então impossível saber se foi o nível de RF que variou e de quanto. No sentido de aumentar a confiabilidade da sonda, torna-se necessário dispor de uma técnica de compensação da variação de atenuação da fibra.

É aqui proposto o uso de um sinal óptico de referência não-modulado (I_{DC}) como sendo aquele originado pela aplicação de uma voltagem V_{DC} de polarização DC sobre o LED, onde $V_{DC} > V_{limiar}$ [1]. I_{RF} e I_{DC} variam de amplitude na mesma proporção em que varia a atenuação do enlace de POF. Entretanto, I_{DC} não é em princípio afetado por

mudanças no nível de potência de RF que incide na sonda. A razão da amplitude dos sinais I_{RF}/I_{DC} provê então uma medida mais robusta da magnitude do campo eletromagnético incidente.

Observa-se no osciloscópio que o sinal foto-detectado é de fato uma superposição das componentes I_{RF} e I_{DC} . As mesmas são então medidas separadamente, a razão I_{RF}/I_{DC} é calculada e cada uma é marcada no gráfico mostrado pela Figura 6 em função da atenuação da POF entre 0 dB e 5,5 dB, enquanto o nível de potência de RF é mantido constante. As antenas *loop* operando em 2,42 MHz são ainda fixadas numa distância de 33,5 cm entre si, ao invés de 2 MHz e 14cm [1]. Cálculos estatísticos fornecem o mesmo desvio padrão de I_{RF}/I_{DC} que o obtido em [1].

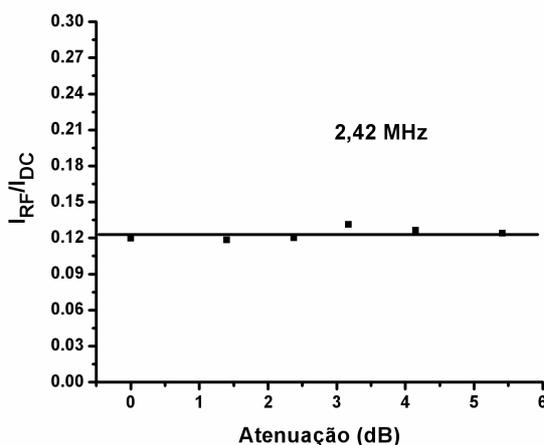


Fig. 6. Gráfico da dependência da razão I_{RF}/I_{DC} com a atenuação óptica do enlace de POF para 2,42 MHz e distância de 33,5 cm entre as antenas.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho descreve algumas medidas de caracterização de uma sonda optoeletrônica de campo magnético H, ressonante, passiva e sintonizável. A sonda é composta por uma antena *loop* conectada com um capacitor de sintonização e um LED ultra-brilhante visível fazendo enlace de telemetria remoto para um receptor óptico através de uma POF de PMMA. A sonda tem sido até então desenvolvida para operar nas frequências da faixa MF/HF/VHF em campo próximo, não só por conveniência, mas também por possuir diversas aplicações em potencial para a área das Telecomunicações. Foi demonstrada a detecção óptica de sinais de rádio com frequências entre 0,4 MHz e >40 MHz com faixa dinâmica de 47,7 dB_V e *roll-off* de 3,1 dB_{μV}/MHz entre 2,5 e 7 MHz. Obteve-se um formato de onda em 3,96 MHz com grande pureza espectral. Uma técnica nova e simples para a compensação da variação da atenuação da POF até 5,5 dB foi demonstrada para 2,42 MHz. Até o presente estágio, não foi feita qualquer tentativa de calibrar a sonda optoeletrônica. Os resultados obtidos, embora de caráter ainda preliminar, se mostram promissores.

Cabos metálicos tais como linhas coaxiais podem induzir EMI em sistemas de medida de ondas eletromagnéticas em RF, pois funcionam como uma antena e os resultados de medidas podem vir alterados. Devido à natureza dielétrica das fibras ópticas, estas não induzem EMI permitindo medidas seguras e confiáveis, pois adicionalmente permitem separar convenientemente o transdutor da unidade de detecção e processamento. As fibras ópticas apresentam baixas perdas, isolamento elétrica, não interferem ou são interferidas por ondas na faixa de rádio e são bastante simples na manipulação, conexão e de baixo custo quando se faz uso das POFs. Desta forma, operadores e circuitos eletrônicos sensíveis podem ser mantidos longe de áreas perigosas como aquelas sujeitas a altos níveis de potência de RF.

O uso de POF de PMMA fica limitado em cerca de 100 m de comprimento de enlace de telemetria. Tal comprimento pode ser estendido a centenas de metros com o uso de POFs fluoretadas ou quilômetros com fibras de sílica.

As especificações do fotodiodo com pré-amplificador aqui utilizado indicam uma máxima voltagem de saída de $0,5 V_{pp}$ ou $1 V_{pp}$ considerando uma carga de impedância de 50Ω ou de alta impedância, respectivamente. Eliminando os cabos coaxiais na montagem e blindando corretamente os circuitos da sonda, espera-se conseguir uma amplitude de ruído de $<1 mV_{pp}$, o que permite uma estimativa de obtenção de uma faixa dinâmica de $>60 dB_V$ sem substituir qualquer componente nos circuitos ou incluir pós-amplificação com controle de ganho.

Enfim, a sonda pode ter seus vários parâmetros de desempenho melhorados ao se projetar adequadamente à antena *loop*, usar LEDs de melhor resposta em frequência ou LDs, otimizar os acoplamentos ópticos, introduzir um estágio de pós-amplificação, usar outras fibras ópticas, blindar adequadamente os circuitos, etc.

No momento existem limitações materiais no Laboratório onde este trabalho está em desenvolvimento. Então por razões de conveniência, optou-se por iniciar trabalhos experimentais em baixas frequências, que ainda assim se mostram interessantes para diversas aplicações. Para frequências em VHF e maiores, uma sonda optoeletrônica pode ser muito útil, por exemplo, para o estudo da distribuição de amplitude do campo elétrico originado dos vários serviços *wireless* em áreas urbanas ou com rarefação de sinais de RF, áreas pouco acessíveis onde apenas uma pequena antena de sonda pode ser introduzida. Pode também ser útil no monitoramento de transmissões ilegais e em medidas de propagação de RF em ambientes *indoor*.

A sonda aqui descrita tem a flexibilidade de se constituir numa unidade compacta e portátil onde o enlace telemétrico a fibra óptica pode ou não ser usado conforme a necessidade. Deve-se também notar que a sonda compreende uma antena *loop* passiva, ou seja, não utiliza amplificador em linha. Este último deveria ser incluído caso se deseje que a sonda venha a tornar-se um sistema do tipo *Radio-over-Fibre*.

REFERÊNCIAS

- [1] Ricardo M. Ribeiro, Odair S. Xavier, Jorge A. Mitrone and Andrés P. L. Barbero, "Optoelectronic Probe for RF Electromagnetic Field Sensing Linked With Plastic Optical Fibre", 16th International Conference on Plastic Optical Fibers, p. 206-209, Turin, Itália, 10-12 de Setembro (2007).
- [2] A. Ng'oma, "Design of a Radio-over-Fibre System for Wireless LANs", Information Report TUE_WP6_PUB_02_v01, Technische Universiteit Eindhoven (2002).
- [3] D. Trinchero, G. Perrone and R. Paoletti, "Low-cost analog optical link for environmental electromagnetic remote monitoring", EMC2000, September 2000, Brugge.
- [4] C.J. Schneider, N. Engelberts and J.D.P. van Dijk, "Characteristics of a passive RF field probe with fibre-optic link for measurement in liquid hyperthermia phantoms", Phys. Med. Biol., **36**, 4, 461-474 (1991).
- [5] K.I. Hayashi, K. Arai and Y. Ido, "Phase-sensitive radio-frequency magnetic probe using laser diode and optical fiber", Journal of Lightwave Technology, **5**, 7, 906-909 (1987).
- [6] W. Mann and K. Petermann, "VCSEL-based miniaturised E-field probe with high sensitivity and optical power supply", Electronics Letters, **38**, 10, 455-456 (2002).
- [7] P.S. Neelakanta and D. DeGroff, "Light-emitting diode as radio-frequency detector development of RFI-free electromagnetic field sensor", Electronics Letters, **25**, 23, 1606-1608 (1989).
- [8] David Lauder and James Moritz, "Design of a portable measuring system capable of quantifying the LF and HF spectral emissions from Telecommunications transmission networks at field strengths of $1 \mu V/metre$ and below", Report AY3430, Radiocommunications Agency, UK (1999).
- [9] K. Yang, L.P.B. Katehi and J.T. Whitaker, "Electric field mapping system using an optical-fiber-based electrooptic probe", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. **11**, 4, 164-166 (2001).
- [10] Broadband over Power Line: Why Amateur Radio Is Concerned About Its Deployment", The National Association for Amateur Radio, March 2005, www.arl.org/bpl.
- [11] Syntronics Corporation, www.syntronicscorp.com.
- [12] Photonuum, Inc., www.photonuum.com.
- [13] C. A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design", p. 203, 2nd edition, Wiley (1997).
- [14] Ichiro Yokoshima, "Absolute Measurements for Small Loop Antennas for RF Magnetic Field Standards", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, **IM-23**, 3, 217-221 (1974).