Visualização através da Parede usando Radar UWB

Carlos R. P. Dionisio e Sergio Takeo Kofuji

USP - Universidade de São Paulo, Dept. de Eng. de Sistemas Eletrônicos, Av. Prof. Luciano Gualberto tr. 3, 158, São Paulo, SP

Resumo — Existem muitas ocasiões onde é desejável inspecionar o interior de um quarto antes de entrar fisicamente nele, por exemplo, em resgate de reféns e segurança dos edifícios. Sistemas de radar de banda ultra larga (UWB) para visualização através da parede (TWI) resolvem este problema de uma forma não possível por outros sistemas de visualização e atualmente representam um importante tópico de pesquisa. O objetivo deste trabalho é descrever e implementar um sistema de radar UWB para TWI. A propagação de sinais UWB num ambiente 2D é simulado através do método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD). Os sinais refletidos são coletados e pós-processados pelo algoritmo Back-Projection para gerar a imagem do ambiente irradiado. Os resultados são satisfatórios e mostram a vantagem de utilizar um sistema de radar UWB para TWI.

Palavras-chaves — Radar UWB, TWI, Algoritmo de Back-Projection.

I. INTRODUÇÃO

Na década de 60, a tecnologia de banda ultra larga (UWB) foi originalmente desenvolvida para comunicação militar segura como radares. UWB é utilizada para referenciar qualquer tecnologia de rádio em que se use simultaneamente uma banda de freqüências que pode abranger a partir de centenas de MHz a maior freqüência de microondas [12].

O problema de visualização através da parede (TWI) é de considerável interesse para aplicações militares e civis [5]. Estas aplicações requerem a capacidade de visualizar alvos através de paredes de diferentes materiais (por exemplo, madeira, concreto, pedra ou tijolo) com densidades relativamente altas. Algumas aplicações de TWI, que visam atender necessidades da sociedade atual, incluem busca, resgate, segurança e rastreamento.

Os sistemas de radar podem ser utilizados para visualizar a presença de alvos através da parede [2, 6, 7, 15]. Para uma boa eficiência do sistema, o radar deveria transmitir o sinal numa freqüência suficientemente baixa para poder penetrar as paredes e ter uma largura de banda muito larga para que alvos detrás das paredes sejam nitidamente visualizados. A largura de banda deve ser de vários GHz para conseguir uma alta resolução. Os sistemas de radar UWB satisfazem estas exigências. O sinal UWB transmitido é muito curto da ordem de nanosegundos. A antena transmissora irradia o ambiente com sinais UWB onde se encontram os alvos. Então, os sinais refletidos são recebidos pelas antenas receptoras e processados para gerar a imagem correspondente. Radar de abertura sintética (SAR) é um sistema de visualização coerente que simula uma grande antena ou abertura e gera imagens de sensoriamento remoto de alta resolução. Em sistemas de TWI, a fusão das tecnologias de radar UWB e SAR tornam-se uma poderosa combinação para obter uma alta resolução em alcance e em azimute [11, 17]. Neste cenário, uma banda ultra larga fornece resolução fina, freqüências centrais relativamente baixas permitem uma boa penetração da parede e processamento SAR reforça a resolução.

No processo de geração da imagem, as principais abordagens para o processamento de sinais SAR são o algoritmo range-Doppler [14], algoritmo w-k [16] e algoritmo back-projection (BP) [1, 9]. Para obter alta resolução em azimute, o ângulo de integração de imagens SAR deveria ser grande. Assim, o uso de sinais UWB e grandes ângulos de integração provocam novas complexidades e desafios para algoritmos tradicionais de geração de imagens SAR [17]. Algumas hipóteses não são válidas e algumas técnicas clássicas, tais como o algoritmo range-Doppler, não podem ser aplicadas. Porem, o algoritmo BP tem a capacidade para efetivamente e eficientemente compensar o diferencial da variação da curvatura, tornando-o aplicável a formação de imagens SAR UWB com grande ângulo de integração. Neste trabalho, o desempenho do algoritmo BP é verificado e analisado usando dados simulados.

O presente trabalho faz parte de um projeto mais amplo, que tem por objetivo a construção de um protótipo de um sistema de radar UWB para TWI. Como passo inicial da pesquisa, apresentamos os primeiros resultados da nossa investigação.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. Na Seção II apresentamos o algoritmo de geração da imagem. As características de um sinal UWB são descritas na Seção III. O método utilizado para resolver o problema de TWI é apresentado na Seção IV. A Seção V fornece os resultados da simulação. Finalmente, a Seção VI contém as conclusões e trabalhos futuros.

II. ALGORITMO DE BACK-PROJECTION

Este algoritmo que pode ser utilizado para a geração de imagens SAR [1, 9]. Basicamente, para cada ponto do ambiente, o algoritmo realiza uma somatória de energias registradas nas diferentes antenas receptoras.

Considere uma antena transmissora em $TX = (x^{TX}, y^{TX})$. A *k*-ésima antena receptora encontra-se em $RX_k = (x_k^{RX}, y_k^{RX})$ e o sinal recebido nele é registrado em E_k . A imagem plana do ambiente é dividida em um número finito de pixels em alcance e em azimute. Matematicamente, o sinal projetado no ponto $p_{ij} = (x_i, y_j)$, correspondente ao pixel (i, j), é dado por:

Carlos R. P. Dionisio, carlos@pad.lsi.usp.br, Tel +55-11-30919741, Fax +55-11-30915254; Sergio Takeo Kofuji, kofuji@ pad.lsi.usp.br, Tel +55-11-30915662, Fax +55-11-30915254. Carlos R. P. Dionisio é grato a CAPES pela Bolsa de Pós-doutorado no âmbito do programa PNPD/CAPES.

$$I(i,j) = \sum_{k} E_k(t_k^{ij}),$$

onde

$$t_k^{ij} = \frac{d_{TX}^{ij} + d_{ij}^{RX_k}}{c}.$$

A velocidade da luz no espaço livre é *c* e t_k^{ij} denota o tempo total de ida e volta do sinal para o percurso $TX \rightarrow p_{ij} \rightarrow RX_k$. As distâncias são obtidas pelas seguintes equações:

$$d_{TX}^{ij} = \|p_{ij} - TX\| = \sqrt{(x_i - x^{TX})^2 + (y_j - y^{TX})^2}$$
$$d_{ij}^{RX_k} = \|RX_k - p_{ij}\| = \sqrt{(x_k^{RX} - x_i)^2 + (y_k^{RX} - y_j)^2}$$

O resultado deste procedimento é uma imagem de radar 2D. Este algoritmo tem uma complexidade computacional de $O(N^3)$ para uma imagem $N \times N$ e N antenas receptoras distribuídas ao longo da abertura sintética.

III. SINAL UWB

O sinal UWB deve possuir uma largura de banda fracional maior que 0,2 ou uma largura de banda maior que 500 MHz [12]. Também, o espectro e nível de potência do sinal devem satisfazer os regulamentos da Federal Communications Commission (FCC) para sistemas UWB [8]. Estas características espectrais do sinal UWB são determinadas pela forma do pulso utilizado pelo transmissor.

Na literatura, as formas de sinais UWB usualmente utilizados são baseadas na função Gaussiana e suas derivadas. Por exemplo, a quinta derivada da gaussiana, ou derivada de ordem maior, possui as características espectrais de um sinal UWB. Também, para sistemas indoor, elas fazem uso eficiente do espectro alocado na máscara da FCC [10].

A seguinte equação representa a quinta derivada da gaussiana:

$$y(t) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}} \left(-\frac{t^5}{\sigma^{11}} + \frac{10t^3}{\sigma^9} - \frac{15t}{\sigma^7} \right) \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2} \right),$$

onde A é a amplitude do sinal, t é o tempo e σ estabelece a duração do pulso. A Fig. 1 ilustra esta forma de sinal UWB. Observe que a característica distintiva dos espectros UWB é a largura de banda muito larga combinada com uma freqüência central relativamente baixa.



Fig. 1. Sinal UWB e sua densidade de potência espectral.

IV. MÉTODO

Este trabalho apresenta a descrição e implementação de um sistema TWI utilizando uma combinação de radar UWB e SAR. Em termos gerais, o sistema pode ser dividido em quatro componentes principais: escolha da forma do sinal UWB; configuração das antenas; método para a coleta de dados; e algoritmo de processamento de sinais SAR para a geração da imagem.

A. Forma do Sinal UWB

Neste trabalho, utilizamos como sinal UWB a quinta derivada da gaussiana com $\sigma = 51$ ps como ilustrado na Fig. 1. Este sinal tem uma freqüência central de 7.01 GHz e uma largura de banda ao redor de 5 GHz em -10 dB.

B. Configuração das Antenas

SAR pode ser implementada deslocando uma ou mais antenas, fixando múltiplas antenas sobre uma área relativamente grande, ou combinações dos mesmos. Neste trabalho, todas as antenas são modeladas como antenas isotrópicas. Especificamente, utilizamos uma antena transmissora e 48 antenas receptoras espalhadas numa área próxima do alvo.

C. Coleta de Dados

O método FDTD é uma técnica computacional popular de modelagem eletromagnética [13]. Através deste método, modelamos a propagação de um sinal UWB dentro de um ambiente ao longo do tempo. Durante a simulação, os sinais refletidos devido à parede e alvos dentro do ambiente são registrados em cada antena receptora.

D. Geração da Imagem

Os dados coletados em cada antena receptora são combinados e processados para obter uma imagem do mapa de refletividade do ambiente. Para a geração da imagem, utilizamos o algoritmo BP. Porém, antes aplicamos a transformada de Hilbert sobre os dados coletados para gerar um "sinal analítico" [4].

V. RESULTADOS

Neste trabalho, nosso interesse não é testar o método sobre ambientes complexos e sim validar cada componente do sistema para o problema de TWI. Desta forma, consideramos um ambiente 2D simples contendo uma parede e pessoas estáticas representadas por esferas. Trabalhos futuros serão direcionados para ambientes complexos 3D. Nesta secção, para diferentes cenários, o algoritmo BP gera as correspondentes imagens do ambiente. Nestas imagens, regiões com maior intensidade de cor representam regiões com maior probabilidade de presença de alvos (cor vermelha). Finalmente, todos os algoritmos e métodos foram implementados através do *software MATLAB 8.0*.

A. Configuração do Ambiente

Um ambiente de 3.0 m de largura e 5.0 m de comprimento é modelado dentro da estrutura do FDTD. Ela contém uma parede de madeira, uma antena transmissora e 48 antenas receptoras. Dentro do ambiente, a parede tem 10 cm de espessura e encontra-se a uma distância de 7.5 cm de cada

antena. A antena transmissora TX e as antenas receptoras RX_1, \dots, RX_{48} estão distribuídas uniformemente ao longo da abertura. A antena transmissora encontra-se na metade da abertura, exatamente em (0 m, 1.5 m). A Fig. 2 ilustra a configuração do ambiente. Nesta figura, cada alvo, representado por uma esfera metálica de 10 cm de radio, é desenhado na sua posição correspondente.

A Fig. 3 ilustra a resposta isolada no receptor RX_1 do alvo-1. A resposta isolada refere-se à diferença entre as respostas registradas num dado receptor com e sem a presença do alvo. A Fig. 4 ilustra a imagem gerada do alvo-1 utilizando o algoritmo BP. Observe que a "imagem" do alvo-1 é nítida.



Fig. 2. Configuração do ambiente 2D.

B. Ambiente com um único alvo

Como primeiro caso, consideramos um único alvo (alvo-1) dentro do ambiente localizado em (3 m, 1.5 m).



Fig. 3. Resposta isolada no receptor RX_1 do alvo-1 e sua correspondente transformada de Hilbert.



Fig. 4. Imagem do alvo-1 localizado em (3 m, 1.5m).

C. Ambiente com dois alvos

Como segundo caso, consideramos o alvo-1 e um segundo alvo (alvo-2) localizado em (4 m, 2.25 m).



Fig. 5. Resposta isolada no receptor RX_1 do alvo-1 e alvo-2.



Fig. 6. Imagem do alvo-1 e alvo-2 localizados em (3 m, 1.5m) e (4 m, 2.25 m), respectivamente.

A Fig. 5 ilustra a resposta isolada no receptor RX_1 do alvo-1 e alvo-2. Esta figura mostra claramente uma menor magnitude da resposta do alvo-2 em comparação com a resposta do alvo-1.

A imagem gerada para o segundo caso é ilustrada na Fig. 6. Nesta figura, o alvo-1 pode ser identificado de forma muito mais nítida que o alvo-2. Isto é porque a magnitude do sinal que alcança o alvo-2 é inferior ao que alcança o alvo-1. A resposta do alvo-2 é mais atenuada que a resposta do alvo-1, uma vez que o tempo de viagem de ida e volta do sinal transmitido é maior.

D. Ambiente com múltiplos alvos

Finalmente, consideramos o alvo-1, alvo-2 e mais dois alvos, isto é, o alvo-3 em (1.5 m, 0.75 m) e alvo-4 em (2.25 m, 1.5 m). A Fig. 7 ilustra a resposta isolada no receptor RX_1 dos quatro alvos. Esta figura mostra claramente a diferença entre as magnitudes das respostas dos alvos. Como o alvo-1 fica detrás do alvo-4, ele obtém a menor magnitude de resposta.



Fig. 7. Resposta isolada no receptor RX_1 do alvo-1, alvo-2, alvo-3 e alvo-4.

A imagem gerada para o ultimo caso é ilustrada na Fig. 8. Nesta figura, o alvo-1 e alvo-2 não podem ser identificados claramente. Observe que, a maior distância entre o alvo e a antena, menor a magnitude da resposta do alvo.



Fig. 8. Imagem do alvo-1, alvo-2, alvo-3 e alvo-4 localizados em (3 m, 1.5m), (4 m, 2.25 m), (1.5 m, 0.75 m) e (2.25 m, 1.5 m), respectivamente.

Considerando todas as imagens geradas, observamos o seguinte: durante a geração da imagem, os pixels correspondentes a presença de alvos são continuamente reforçados, enquanto que as outras áreas obtêm uma baixa intensidade ou formam um sombreamento. As imagens geradas tendem a ser ampliados ou manchados. Um artefato que aparece nas imagens é o efeito "sombra".

VI. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresenta os primeiros passos na concepção de um protótipo de um sistema de TWI usando radar UWB. Descrevemos os principais componentes de um sistema de radar UWB para TWI: forma do sinal UWB, configuração das antenas, método para a coleta de dados e algoritmo para a geração da imagem.

Cada componente é validado através dos experimentos. O sinal UWB escolhido consegue atravessar a parede, refletir no alvo e alcançar a antena receptora. Porém, para alvos mais distantes, menor a energia que é recebida nas antenas. Outras configurações das antenas podem ser adotadas para melhorar os resultados. Os dados coletados sofrem um processamento para gerar a imagem. Este processamento deve focalizar a energia refletida numa imagem nítida. O algoritmo escolhido para esta tarefa foi o Back-Projection por ser adequado para aplicações no domínio do tempo. Porem, ele possui uma alta complexidade computacional. Isto não é desejável para sistemas em tempo real.

Os próximos passos deste trabalho consistem em desenvolver técnicas para filtrar ou "limpar" a imagem gerada e reconstruir a forma do alvo. Para alcançar estes objetivos, utilizaremos técnicas de processamento de sinais e imagens. Devido à alta complexidade computacional do algoritmo Back-Projection, uma versão rápida será implementada.

Também, utilizaremos o software CST MICROWAVE STUDIO® [3] de simulação eletromagnética para a coleta de dados e desenho de antenas UWB. Para uma mais realista simulação computacional, a coleta de dados irá considerar ambientes complexos 3D e antenas UWB (por exemplo, antena monopolo circular [18]). Desta forma, obteremos respostas com maior precisão e mais próximo do caso real.

REFERÊNCIAS

- A.C. Kak and M. Slaney, Principles of computerized tomographic imaging. IEEE Press, New York, 1987.
- [2] Christian Debes, Jesper Riedler, Moeness Amin, Abdelhak M. Zoubir, "Iterative Target Detection Approach for Through-the-Wall Radar Imaging," in Proc. of the 4th IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2009.
- [3] CST GmbH, Germany, CST STUDIO SUITE v2009 User's Manual, Jan. 2009. www.cst.com.
- [4] D. Gabor, "Theory of Communications," J. Inst. Electr. Eng., pt. III, 93, 429-457, 1946.
- [5] D. Hugh Griffiths and Chris J. Baker, Radar Imaging for Combatting Terrorism, Springer Netherlands 2006.
- [6] E. Baranoski, "Through wall imaging: Historical perspective and future directions," in Proc. of the 3rd IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2008.
- [7] F. Ahmad and M. G. Amin, "Wideband synthetic aperture imaging for urban sensing applications," Journal of the Franklin Institute, vol. 345, no. 6, pp. 618–639, September 2008.
- [8] FCC, First Report and Order 02-48.February 2002.
- [9] G.T. Herman, Image reconstruction from projections. Spriner-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1979.
- [10] H. Sheng, P. Orlik, A. M. Haimovich, L. J. Cimini and J. Zhang, "On the spectral and power requirements for ultra-wideband transmission",

IEEE Conf on Communications, Anchorage, USA, 11-15 May, 2003, pp. 738-742. [11] Hawa Yves, A Study of Fast Backprojection Algorithm for UWB SAR

- and a Comparison between Fast- and Global Backprojection, Master's thesis, The Department of Electrical Engineering, Blekinge Institute of Technology, November 2008.
- [12] IEEE Standard for Ultrawideband Radar Definitions Corrigendum 1, 2008.
- [13] K.S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media", IEEE Trans. Antennas Propagations, vol. AP-44, No. 12, pp. 1630-1639, 1996.
- [14] L.J. Cutrona, Synthetic Aperture Radar. In M.I. Skolnik, (Ed.), Radar
- Handbook, Ch. 23. New-York: McGraw-Hill, 1970.
 [15] L.-P. Song, C. Yu, and Q. H. Liu, "Through-wall imaging (twi) by radar: 2-D tomographic results and analyses," IEEE Transactionson Geoscience and Remote Sensing, vol. 43, no. 12, pp. 2793-2798, 2005.
- [16] M. Soumekh, Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1999.
- [17] Yibo Na, Yilong Lu, Hongbo Sun, "A Comparison of Back-Projection and Range Migration Algorithms for Ultra-Wideband SAR Imaging", The 4th IEEE Workshop on Sensor Array and Multi-Channel Processing – SAM'2006, Waltham, Massachusetts, USA, July 2006, pp.320-324.
- [18] Héctor Dave Orrillo Ascama, Carlos R. P. Dionisio, Sergio Takeo Kofuji, "Antena Monopolo Circular: Análise e Propagação UWB em Ambientes Indoor", Anais do II Congresso Tecnológico Infobrasil -InfoBrasil 2009, Fortaleza/CE, Brasil. May 2009.