

Predição de Cobertura de Bloqueio de Rádio-Frequência em Cenários Urbanos com Transições de Morfologia

Guilherme M. O. Silva¹, José C. A. Santos² e Maurício H. C. Dias²

¹Centro Tecnológico do Exército, Rio de Janeiro, RJ, 23020-470

²Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 22290-270

Resumo — Este trabalho descreve um algoritmo para predição de cobertura de bloqueio em cenários urbanos nas faixas de VHF e UHF. O algoritmo proposto inclui aspectos usualmente desconsiderados relacionados à propagação: o comportamento em terrenos de morfologia mista e a perda de percurso em vegetação densa. O código foi desenvolvido em MatLab e baseia-se nas predições de cobertura do bloqueador e do sistema-alvo para fins de cálculo da relação J/S na região de interesse. A área de cobertura de bloqueio é determinada pela comparação entre a relação J/S encontrada com o limiar de efetivação de bloqueio para o sistema-alvo. A ferramenta proposta tem grande utilidade no planejamento de operações de bloqueio, pois com ela é possível apontar áreas de cobertura não evidentes em análises simplificadas.

Palavras-Chave — Guerra Eletrônica, propagação de ondas de rádio, ferramentas computacionais.

I. INTRODUÇÃO

O bloqueio de rádio-frequência (RF) é uma técnica de ataque eletrônico largamente conhecida. Além de aplicações militares, é também empregado em operações de segurança pública [1]-[2]. No Brasil, bloqueadores de RF são ocasionalmente utilizados pelas autoridades em operações de controle de tráfico de drogas nas grandes cidades. Além disso, sob o mesmo escopo, os principais presídios possuem bloqueadores de RF para coibir o uso não autorizado de telefones celulares e rádios pelos prisioneiros [3].

A eficiência do bloqueio pode ser otimizada no caso de uma operação ser previamente planejada com base em informações detalhadas do cenário-alvo. Um recurso importante no planejamento da operação é a estimativa da área de cobertura de bloqueio, que pode ser definida como a região onde o sistema-alvo torna-se indisponível devido à ação do bloqueador de RF. A área de cobertura de bloqueio é obtida a partir de métodos de predição de perda de propagação em toda a região de interesse.

Quando há a disponibilidade de informações geográficas digitais, a abordagem *site-specific* torna-se uma opção flexível para a predição de perda de percurso. Aspectos como elevações do terreno, mapas de morfologias e propriedades elétricas dos obstáculos naturais presentes na área de interesse possibilitam o uso de predições ponto-a-ponto (PP), com o emprego de modelos de propagação adequados.

Guilherme M. O. Silva, gottoni@ctex.eb.br, Tel +55-21-24106297; José C. A. Santos, araujo@ime.eb.br, Tel +55-21-38204164; Maurício. H. C. Dias, mhcdias@ime.eb.br, Tel +55-21-38204135.

De forma geral, modelos semi-empíricos, teóricos ou numéricos podem ser aplicados. Em especial, uma combinação entre modelos semi-empíricos ponto-área (PA) com ajustes complementares PP relacionados a certas condições do terreno é frequentemente adotada pelos desenvolvedores de ferramentas computacionais para o planejamento de sistemas de rádio. Tal combinação pode prover uma predição de cobertura precisa com um esforço computacional relativamente baixo [4]-[6].

O presente trabalho descreve um algoritmo de predição de perda de percurso *site-specific* desenvolvido com a intenção de estimar a área de cobertura de bloqueio para bloqueadores de VHF e UHF em regiões urbanas. Bases de dados de altimetria e de morfologia do terreno são utilizadas pelo algoritmo, que adota a já mencionada combinação de métodos PA semi-empíricos com abordagens PP, calculando a perda mediana de percurso a partir do modelo Hata-COST231 [4]-[6]. Atenção especial foi dada ao ajuste PP em perfis que atravessam morfologias distintas, pois as equações de propagação referentes a áreas urbanas densas, urbanas médias, suburbanas ou abertas são diferentes no modelo Hata-COST231. A fim de contabilizar esta característica, o algoritmo inclui uma solução heurística baseada no modelo de Millington para terrenos mistos em baixas frequências [7]-[9]. Propagação em vegetação densa também foi considerada no algoritmo. O ajuste PP correspondente foi baseado em um método semi-empírico já existente, derivado de medidas realizadas em um parque urbano na cidade do Rio de Janeiro [10]. Os resultados da implementação do algoritmo em MatLab são apresentados, discutidos, e comparados com outras abordagens mais simples.

A seção II trata dos conceitos básicos de cobertura de bloqueio de RF. O cenário de aplicação, as bases de dados do terreno adotadas e os modelos de propagação são incluídos na seção seguinte. Na seção IV, um cenário de operação hipotética de bloqueio é adotado para a análise dos resultados do algoritmo executado em MatLab. A seção V conclui o artigo.

II. COBERTURA DE BLOQUEIO DE RF

O parâmetro principal para a estimativa da cobertura de bloqueio é a razão J/S (*Jamming / Signal* – sinal de bloqueio / sinal alvo) sobre a área analisada [1]-[3]. Esta razão é definida como a relação entre as potências recebidas pelo bloqueador (J) e pelo sistema-alvo (S) em cada ponto de recepção. Assim, tanto a distribuição do sinal do bloqueador

quanto a do sistema-alvo na área de interesse devem ser obtidas para uma análise apropriada da eficácia de bloqueio. Informações relacionadas à cobertura do sinal do sistema-alvo podem ser obtidas do operador do sistema, de cálculos através de métodos de predição de perda de percurso, ou a partir de medidas do sinal do sistema-alvo na região de interesse. De fato, a distribuição do sinal do bloqueador é o principal parâmetro desconhecido do planejador da operação, que deve, dentre outras condições, previamente avaliar sua cobertura em localidades distintas para o posicionamento do bloqueador. Esta distribuição deve ser estimada com o auxílio de modelos de propagação adequados para o cenário de análise desejado.

A cobertura de bloqueio é determinada por uma comparação entre a relação J/S estimada com o limiar de bloqueio requerido (J/S_{min}), que é um valor dependente do tipo de sistema de comunicação do sistema-alvo e do tipo de bloqueio utilizado. A área de cobertura de bloqueio compreende toda a região na qual $J/S > J/S_{min}$. Valores típicos de J/S_{min} para bloqueio por ruído podem ser encontrados em [3], [11]: 18 dB para telefones CDMA IS-95, -5 dB para terminais GSM, e -10 dB para *walkie-talkies* na faixa baixa de UHF. Sistemas que incorporam técnicas mais complexas para mitigar desvanecimento seletivo em frequência como o IS-95, WiFi LANs, ou telefones 3G apresentam maior robustez à interferência. Em especial, o ganho de processamento em sistemas que usam espalhamento espectral por sequência direta, como o sistema celular IS-95, faz com que a efetivação de bloqueio seja muito mais difícil de ser atingida.

Além disso, é importante mencionar que a área de cobertura de bloqueio típica em cenários urbanos tende a ser relativamente pequena, pois representa a interseção de regiões de cobertura de equipamentos de baixa potência. Embora esta característica possa ser indesejável ao planejador da operação de bloqueio, ela torna mais fácil a estimativa da relação J/S por permitir o emprego de modelos de propagação mais simples. As simplificações mais evidentes são as hipóteses de terra plana e troposfera homogênea.

III. DESCRIÇÃO DO ALGORITMO

O planejamento de bloqueio de RF requer informações sobre a cobertura do sistema-alvo e, também, sobre a flexibilidade necessária para testar opções de posicionamento do bloqueador. Para auxiliar o planejador, foi desenvolvido um algoritmo *site-specific* para estimar a cobertura de transmissores VHF e UHF em cenários urbanos (a frequência de operação é, na verdade, de 150 até 2000 MHz em virtude da limitação da faixa dos modelos selecionados), e também para permitir uma análise da interferência co-canal. A ferramenta determina a distribuição da recepção do sinal em toda a região de interesse para os dois seguintes sistemas: o bloqueador e o sistema-alvo. A relação J/S encontrada é, então, comparada ao limiar J/S_{min} para que seja possível determinar a área de cobertura de bloqueio. No *software* desenvolvido, atenção especial foi dada à modelagem da propagação em terrenos mistos e à perda adicional provocada

por florestas densas, aspectos usualmente desconsiderados em algoritmos convencionais.

A. Bases de dados digitais do terreno

O algoritmo trabalha com bases de dados de altimetria e de morfologia do cenário-alvo. Para a implementação em MatLab, foram adquiridas bases SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) *geotiff* para os dados de altimetria do terreno [12]-[13]. Como exemplo, a Fig. 1 ilustra o mapa de altimetria de uma área de $10,8 \times 10,8 \text{ km}^2$ (120×120 pixels), representando o centro de Campinas-SP, obtida da base de dados SRTM3 (90 m de resolução).

Informações de morfologia também são requeridas pelo algoritmo. Para a mesma área representada na Fig. 1, um mapa de morfologias foi elaborado para separar os distintos tipos de terreno encontrados na região. Este mapa foi criado na forma de um arquivo *tiff*, ilustrado na Fig. 2. Sete tipos distintos de morfologias foram identificados, como pode se observar na barra lateral da Fig. 2: 1 – Água, 2 – Vegetação baixa, 3 – Vegetação média, 4 – Vegetação densa, 5 – Suburbana, 6 – Urbana, e 7 – Urbana densa.

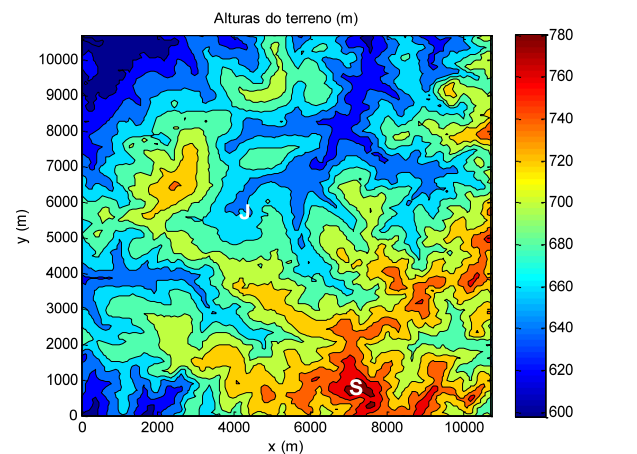


Fig. 1. Mapa de altimetria da região tomada como exemplo.

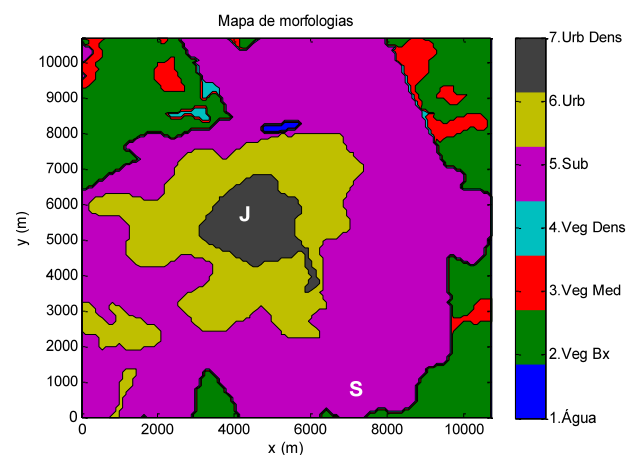


Fig. 2. Mapa de morfologias da região tomada como exemplo.

B. Modelos de propagação adotados

O algoritmo utiliza uma abordagem ponto-área (PA) com ajustes ponto-a-ponto (PP). Pelos motivos citados na seção anterior, foram adotados modelos válidos sob hipóteses menos restritivas, como a de terra plana e a homogeneidade da troposfera. De fato, o modelo Hata-COST231 foi escolhido para a abordagem PA [4]-[6]. Os ajustes complementares PP considerados pelo algoritmo foram: correções para terrenos mistos, perdas adicionais provocadas por vegetação densa (como em parques urbanos) e perdas devidas à difração em obstáculos naturais.

Além dos mapas de altimetria e morfologia, outros parâmetros de entrada devem ser fornecidos ao algoritmo: as posições do bloqueador e do transmissor do sistema-alvo (coordenadas e altura) e suas respectivas potências de transmissão. O ganho da antena não foi considerado nesta versão do algoritmo.

Hata-COST231 é um dos modelos de propagação semi-empíricos mais citados, e praticamente todas as ferramentas comerciais de predição de sistemas VHF e UHF disponibilizam este modelo para fins de cálculo. É válido para frequências compreendidas entre 150 e 2000 MHz – para faixas situadas abaixo de 1,5 GHz, empregam-se as expressões de Hata; para a faixa de 1,5 – 2 GHz, utilizam-se as equações desenvolvidas pelo grupo europeu COST (*European Cooperation in Science and Technology*). O intervalo de distâncias coberto pelo modelo é de 1 a 20 km.

O algoritmo determina a distribuição da recepção do sinal para ambos os transmissores (bloqueador e sistema-alvo) separadamente, para cada par de posições transmissor-receptor nas bases de dados disponíveis. Em cada percurso, o algoritmo extrai os perfis correspondentes de altimetria e de morfologia das bases digitais. Caso o perfil possua morfologia única, a perda mediana é simplesmente calculada de acordo com a equação apropriada do modelo de Hata-COST231. As morfologias numeradas de 5 a 7 são as mesmas preconizadas pelo referido modelo. Neste trabalho, as morfologias numeradas de 1 a 4 são todas associadas à morfologia “áreas abertas” no modelo de Hata, com respeito à predição PA.

Para perfis mistos, o algoritmo adota o método de Millington para o cálculo da perda mediana de percurso PA correspondente. Millington propôs uma média heurística para o cálculo da perda em terrenos mistos, para ondas terrestres em baixas frequências (até HF) [7]. Posteriormente, a UIT-R (União Internacional de Telecomunicações – Seção de Radiocomunicações) incorporou o modelo em uma de suas recomendações para predição de perda de percurso [8]. A proposta de extensão do uso da abordagem de Millington às faixas de frequência consideradas no presente algoritmo foi também heurística. A inspiração veio de um trabalho recente, no qual a transição de condição de visada direta para visada obstruída na propagação de sinais de sistemas de 2 a 15 GHz em áreas urbanas foi avaliada com base naquele método [14].

A perda mediana para um terreno misto L_M (dB) é dada por (1), que calcula a média entre as perdas de percurso direta e reversa, dadas respectivamente por (2) e (3). Os percursos

recursivos cumulativos direto (s_k) e reverso (r_k) são definidos por (4) e (5), respectivamente [9].

$$L_M = 0,5(L_D + L_R) \tag{1}$$

$$L_D = \sum_{k=1}^N \sum_{k=1}^N \dots \tag{2}$$

$$L_R = \sum_{k=1}^N \sum_{k=1}^N \dots \tag{3}$$

$$s_k = \sum_{k=1}^N \dots \tag{4}$$

$$r_k = \sum_{k=1}^N \dots \tag{5}$$

A perda adicional por vegetação é calculada a partir da presença da morfologia 4 (vegetação densa) no perfil. O modelo escolhido para estimar esta perda foi proposto em [10], baseado em medidas realizadas em um parque urbano na cidade do Rio de Janeiro, com árvores tipicamente tropicais. Este modelo é citado também na Rec UIT-R P.833 [15]. A perda adicional é dada por:

$$L_v = A_m (e^{-\gamma d_v}) \tag{6}$$

$$A_m = 0,18 f^{0,75} \tag{7}$$

$$\gamma = 0,0063 f^{0,53} \tag{8}$$

onde d_v é a distância percorrida pela onda de rádio através da vegetação, e f é a frequência de operação (MHz).

Também são consideradas as eventuais perdas por difração provocadas por obstruções da elipse correspondente à primeira Zona de Fresnel em cada perfil avaliado (apenas o plano vertical é considerado na análise). Neste algoritmo, a abordagem mais simples disponível foi adotada, na qual o obstáculo principal é considerado um “gume-de-faca” e a perda adicional por difração L_d é calculada a partir de:

$$L_d = 20 \log \left(\frac{4,75}{f} \right) \tag{9}$$

onde ν é o parâmetro de Fresnel para o enlace analisado [16].

IV. ANÁLISE DO ALGORITMO

O algoritmo foi implementado em MatLab e avaliado quanto à coerência de seus resultados. Para exemplificar a operação do algoritmo, tomou-se como cenário hipotético a região representada pelas Figs. 1 e 2. Os parâmetros de sistema e demais condições assumidas foram: potência de transmissão do sistema-alvo $P_S = 50$ dBm, potência do bloqueador $P_J = 30$ dBm, altura da antena do sistema-alvo $h_S = 30$ m, altura do bloqueador $h_J = 3$ m, altura da antena de recepção $h_m = 1,5$ m, e frequência de operação $f = 1,85$ GHz. As coordenadas do transmissor do sistema-alvo e do bloqueador estão indicadas nas Figs. 1 e 2 (‘S’ e ‘J’, respectivamente): $x_S = 7,02$ km, $y_S = 0,63$ km, $x_J = 4,23$ km, e $y_J = 5,58$ km.

Com a finalidade de verificar, primeiramente, a influência dos ajustes PP considerados no algoritmo, um enlace particular foi analisado em separado. Por exemplo, a Fig. 3 mostra o decaimento da potência recebida P_r , com a distância (d) ao longo do perfil entre o bloqueador e o transmissor do sistema-alvo com o uso do algoritmo, supondo um movimento do receptor na direção oposta ao transmissor. Estes resultados foram comparados com os obtidos a partir do emprego direto do modelo PA de referência (Hata-COST231), assumindo simplesmente a morfologia do local de recepção, e calculando adicionalmente apenas a perda PP devida à difração. Portanto, as diferenças encontradas nos resultados de ambos os modelos estão associadas apenas ao tratamento distinto dos enlaces em perfis mistos. Os perfis de altimetria e de morfologia para este enlace são mostrados na Fig. 3, para auxiliar a análise. São observadas duas transições de morfologia: a cerca de 1,5 km e a cerca de 4 km. Ambos os modelos consideram estas transições, porém à medida que o receptor se afasta do transmissor, somente com a abordagem de Millington pode-se notar a contribuição cumulativa das morfologias anteriores à perda de percurso.

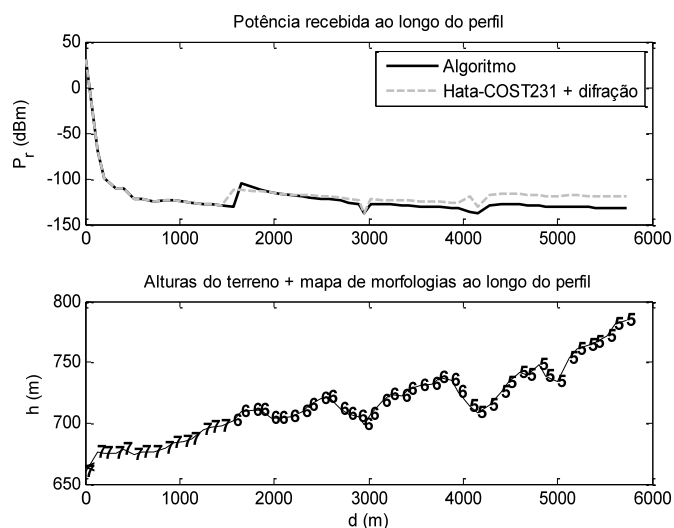


Fig. 3. Potência recebida ao longo do enlace analisado e respectivos perfis de altimetria e morfologia (representada pela numeração de 1 a 7, de acordo com a escala descrita na seção III).

As Figs. 4 e 5 apresentam as distribuições de cobertura da potência recebida pelo sistema-alvo e pelo bloqueador, respectivamente. É possível observar que o sinal recebido torna-se mais forte em locais mais elevados ou em áreas abertas sem vegetação densa (morfologias 1 a 3). A propagação em áreas com vegetação densa atenua significativamente o sinal, como pode ser percebido mais claramente na Fig. 4 (região na qual $2 \text{ km} < x < 4 \text{ km}$ e $y > 8 \text{ km}$, aproximadamente).

A partir das distribuições encontradas para o bloqueador e o sistema-alvo, expostas nas Figs. 4 e 5, o cálculo da relação J/S para toda a região analisada torna-se trivial. Tomando como exemplo o sistema GSM, cujo limite para que o bloqueio possa ser considerado efetivo é $J/S_{min} = -5 \text{ dB}$ [3], [11], a região de cobertura de bloqueio correspondente é representada pelas áreas em branco ao redor do bloqueador **J**

na Fig. 6. Deve-se mencionar que a disposição das variações de altimetria e de morfologia no terreno podem favorecer o bloqueio em regiões não óbvias e que poderiam passar despercebidas. A mancha branca próxima ao limite superior direito da Fig. 6 é um bom exemplo disto. Nesta área, o sinal do sistema-alvo é fortemente atenuado por difração, enquanto o sinal do bloqueador não está sujeito a grandes perdas adicionais PP. Com informações detalhadas sobre o terreno e algoritmos que modelem a propagação considerando esses dados, o planejamento de operações de ataque eletrônico passa a apresentar maior acurácia e confiabilidade, reduzindo os riscos de insucesso da missão.

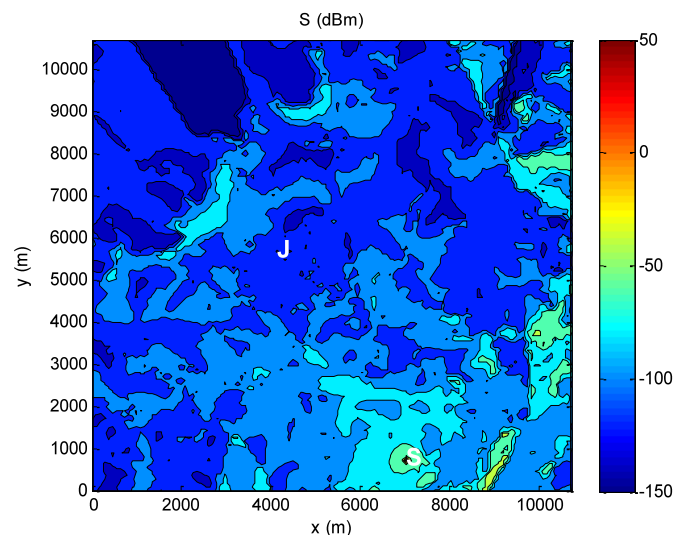


Fig. 4. Distribuição da potência recebida do sistema-alvo (S) no exemplo apresentado.

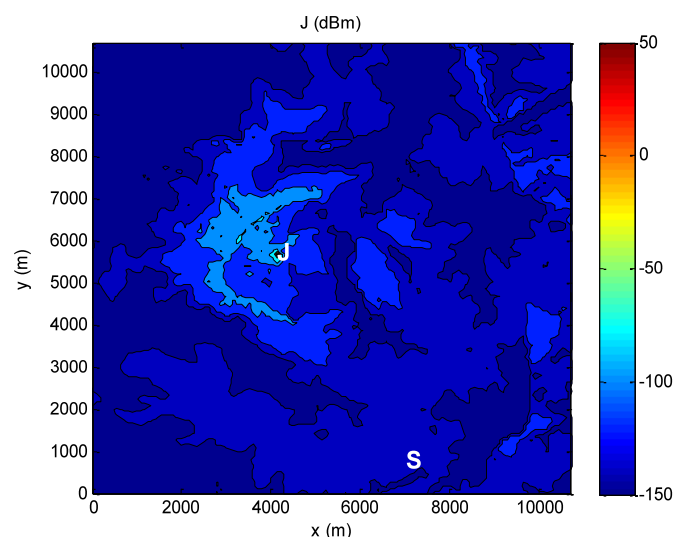


Fig. 5. Distribuição da potência recebida do bloqueador (J) no exemplo apresentado.

V. COMENTÁRIOS FINAIS

Este trabalho descreveu uma ferramenta *site-specific* de predição de perda de percurso, capaz de estimar a cobertura

de bloqueio de sistemas VHF e UHF em áreas urbanas. O algoritmo criado adotou uma abordagem semi-empírica PA com ajustes PP, baseada no uso de informações adquiridas de bases de dados de altimetria e de morfologia, representando o cenário-alvo. A perda de percurso mediana PA foi calculada usando o modelo Hata-COST231.

Os ajustes PP incluíram correções para a propagação em terrenos mistos. O método de Millington foi adotado heurísticamente para incorporar as contribuições cumulativas das diferentes morfologias ao longo de cada percurso. A atenuação por vegetação também foi considerada no algoritmo, particularmente quando as ondas de rádio se propagam por áreas de vegetação densa, que podem ser encontradas em parques urbanos. Em vez de calcular uma simples perda por partição, procedimento típico de algumas ferramentas comerciais, o algoritmo estima a perda adicional a partir de um modelo semi-empírico que depende da frequência e da distância, adequado a parques urbanos tropicais. Perdas por difração provocadas pelas irregularidades do terreno também foram consideradas.

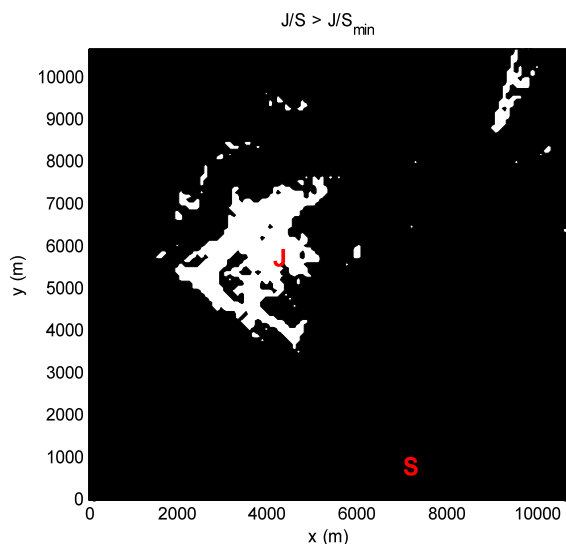


Fig. 6. Área de cobertura de bloqueio no exemplo apresentado.

A área de cobertura para um cenário hipotético foi calculada a partir de uma implementação em MatLab do algoritmo descrito, com o objetivo de averiguar a coerência de seus resultados. Os dados finais indicaram que o algoritmo é capaz de apontar regiões de cobertura não tão óbvias de serem identificadas, uma vez que a predição é baseada em informações detalhadas do terreno. Em geral, apesar de algum tipo de validação ainda ser desejável (por exemplo, por comparação de resultados do algoritmo a medidas em campo), a ferramenta proposta apresenta potencial de aplicação ao planejamento de operações de ataque eletrônico, em função dos recursos adicionais que ela propicia.

REFERÊNCIAS

[1] D. C. Schleher, *Electronic Warfare in the Information Age*, Norwood: Artech House, 1999.

[2] M. R. Frate e M. Ryan, *Electronic Warfare for the Digitized Battlefield*, Norwood: Artech House, 2001.

[3] R. S. Toscano, Bloqueador de Múltiplas Frequências: Concepção do Sistema e Estudo de Caso para Terminais IS-95, dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Ago 2006.

[4] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd Ed, Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2001

[5] H. L. Bertoni, *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*, Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2000.

[6] T. K. Sarkar, Z. Ji, K. Kim, A. Modouri, M. S.-Palma, “A Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 45, no. 3, p. 51–82, Jun 2003.

[7] G. Millington, “Groundwave Propagation over an Inhomogeneous Smooth Earth”, *IEE Proceedings*, vol. 96, p. 53, Mar 1949.

[8] Groundwave Propagation Curves for Frequencies Between 10 kHz and 30 MHz, Rec. UIT-R P.368-7, 1992.

[9] L. Sevgi, “A Mixed-Path Groundwave Field-Strength Prediction Virtual Tool for Digital Radio Broadcast Systems in Medium and Short Wave Bands”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 48, no. 4, p. 19–27, Ago 2006.

[10] M. H. C. Dias, Análise Crítica da Propagação em Microcélulas, dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Jan 1998.

[11] M. Stahlberg, “Radio Jamming Attacks Against Two Popular Mobile Networks”, in *Proceedings of the Helsinki University of Technology - Seminar on Network Security*, p. 1–20, outono 2000 (disponível em <http://www.tml.tkk.fi/Opinnot/Tik-110.501/2000/papers/stahlberg.pdf>, último acesso em 18 Jun 2009).

[12] T. G. Farr, P. A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank, D. Isdorf, “The Shuttle Radar Topography Mission”, *Reviews of Geophysics*, vol. 45, no. RG2004, Mai 2007.

[13] Sítio da missão SRTM em <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm> (último acesso em 18 Jun 2009).

[14] R. M. L. Silva, M. S. Assis, “Previsão da atenuação de propagação em sistemas ponto-área na faixa entre 2 a 15 GHz”, in *MOMAG 2004 - Simpósio Brasileiro de Microondas e Eletromagnetismo*, São Paulo, pp 1–6, Ago 2004.

[15] Attenuation in Vegetation, Rec. UIT-R P.833-6, 2007.

[16] Propagation by Diffraction, Rec. UIT-R P.526-10, 2007.