

Localização de Terminais Móveis utilizando Correlação de Assinaturas de Rádio-Frequência

Rafael Saraiva Campos & Lisandro Lovisolo

Abstract—This tutorial presents in detail the main components of radio-frequency fingerprinting methods, also known as DCM (Database Correlation Methods), for mobile station positioning. Those methods can locate legacy terminals, i.e., without any specific location services support. Furthermore, as they are capable of yielding position estimates using measurements from a single reference base station, those methods have a high availability. Those characteristics make DCM suitable alternatives for emergency call positioning in cellular mobile networks and for fallback of more precise methods.

Index Terms—Cellular Mobile Networks, Correlation Database, Radio-Frequency Fingerprints, Radiolocation, Received Signal Strength.

Resumo—Este tutorial apresenta em detalhes os principais componentes dos métodos de localização de terminais móveis utilizando correlação de assinaturas de rádio-frequência, também conhecidos como métodos DCM (*Database Correlation Methods*). Os métodos DCM podem ser utilizados para a localização de terminais legados, i.e., sem nenhum suporte específico a serviços de localização. Além disso, por serem capazes de produzir estimativas de posição a partir de medidas de uma única estação de referência, estes métodos apresentam elevada disponibilidade. Estas características tornam os métodos DCM opções particularmente adequadas para a localização de terminais originários de chamadas de emergência em redes de telefonia móvel celular, podendo atuar também como *fallback* de métodos mais precisos.

Palavras chave—Assinaturas de Rádio-Frequência, Banco de Dados de Correlação, Nível de Sinal Recebido, Rádio-Localização, Redes de Telefonia Móvel Celular.

I. INTRODUÇÃO

A. Localização em Redes de Telefonia Móvel Celular

A localização de terminais em redes de telefonia móvel celular tem sido alvo, nos últimos anos, de crescente interesse das operadoras de serviços de comunicação móvel, de fornecedores de plataformas de *software* e *hardware*, de órgãos reguladores de telecomunicações e dos usuários. Esse interesse tem aumentado com o desenvolvimento de diversas aplicações baseadas na localização dos terminais móveis (MS's - *mobile stations*) nessas redes.

A localização de chamadas para números de emergência - polícia, bombeiros, defesa civil - originadas em MS's celulares constitui a aplicação mais crítica. A possibilidade de localizar uma vítima de sequestro, ou um automóvel acidentado em uma estrada, traz benefícios óbvios, reduzindo o tempo de

resposta das autoridades e aumentando a probabilidade de salvar vidas. T tamanha relevância levou órgãos reguladores de telecomunicações em diversos países a definir requisitos mínimos de disponibilidade e acurácia na localização dos MS's originando chamadas de emergência e que deverão ser atendidos pelas operadoras de telefonia móvel celular.

1) *Serviços Baseados em Localização*: Para as operadoras, a possibilidade de localizar os MS's gera a oportunidade de oferecer serviços de valor agregado baseados em localização. Há uma grande variedade de serviços de localização disponíveis atualmente, que de modo geral podem ser agrupados nas seguintes categorias [1]:

- Localização de chamadas de emergência: localização de chamadas para a polícia, bombeiros, defesa civil, etc. [2] [3] [4] [5];
- Tarifação baseada em posição: define-se uma área doméstica, onde a tarifação do usuário é mais baixa (muitas vezes equivalente à telefonia fixa); ao originar ou receber chamadas fora dessa área, o usuário é tarifado normalmente [6];
- Rastreamento de pessoas e veículos: localização de veículos roubados e de pessoas com necessidades específicas (crianças, idosos e portadores de necessidades especiais) [8] [9], monitoramento de frotas e de força de trabalho [7];
- Serviços de informação baseados em posição: páginas amarelas, propaganda baseada em posição, previsão do tempo na área onde o usuário está localizado, etc. [10];
- Entretenimento: localização de grupos de amigos, jogos, etc. [11].

As operadoras também podem utilizar a informação de localização do MS para otimizar o desempenho da rede, melhorando a eficiência de *handover* e *paging*. Em redes de telefonia móvel celular, o *handover* e o *paging* são procedimentos críticos em termos de consumo de recursos na interface rádio, influenciando diretamente diversos indicadores-chave de desempenho. Assim, o uso de informações de localização do MS para melhorar a eficiência destes procedimentos pode otimizar a capacidade e a qualidade da rede de acesso rádio (RAN - *Radio Access Network*) [12].

2) *Regulamentação da Localização de Chamadas de Emergência*: Nos Estados Unidos da América do Norte, o FCC (*Federal Communications Commission*) especificou requisitos de precisão para o serviço E911 (*Enhanced 911*), destinado a localizar chamadas para o número de emergência 911 originadas de MS's celulares [2]. Na primeira fase, iniciada em 1996, a posição estimada de um MS seria igual

Manuscrito recebido em 15 de fevereiro de 2011; aceito em 15 de março de 2011.

R. S. Campos (rafaelsaraivacampos@gmail.com) e L. Lovisolo (lisandro@uerj.br) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Eletrônica (PEL) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

à localização da BTS. Na segunda fase, iniciada em 2001, os seguintes requisitos de precisão foram definidos:

- Para métodos baseados na rede: 100 metros para 67% das chamadas e 300 metros para 95% das chamadas;
- Para métodos baseados no terminal: 50 metros para 67% das chamadas e 150 metros para 95% das chamadas.

A distinção entre métodos baseados na rede e baseados no terminal é feita na Seção I-B.

A Comunidade Econômica Européia adotou uma regulamentação para a localização de chamadas para o número de emergência pan-europeu 112, definida pelo Grupo de Coordenação do Acesso a Informações de Localização pelos Serviços de Emergência (CGALIES - *Coordination Group on Access to Location Information by Emergency Services*), que atuou de 2000 a 2002. O CGALIES não especificou requisitos de precisão. A localização das chamadas de emergência é obrigatória, com a melhor precisão possível, desde 2003 [3].

Em resposta a estas exigências, órgãos normativos internacionais de padrões de telefonia móvel celular abordaram a questão da localização. O ETSI (*European Telecommunication Standards Institute*) listou uma série de métodos de localização recomendados para redes celulares GSM (*Global System for Mobile Telecommunications*) [13]. Analogamente, o 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) definiu métodos de localização para redes celulares UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) com acesso rádio WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) [14].

B. Métodos Baseados na Rede e o Cenário Brasileiro

Independentemente do padrão de acesso rádio adotado, as redes sem fio dispõem de informações de localização dos terminais registrados. Estas informações são necessárias para permitir o *paging*, roteamento de pacotes e continuidade de chamada durante o *handover*. Por exemplo, em redes celulares GSM, a melhor resolução para a localização de um MS em modo *idle* - i.e., que não está participando de uma chamada - é a região correspondente a uma área de localização (LA - *Location Area*), que é uma zona de *paging* dentro da região atendida por uma controladora de estações rádio-base (BSC - *Base Station Controller*). Para um MS em modo ativo - i.e., conectado, participando de uma chamada - nessa mesma rede, é possível identificar o setor que atende o terminal, e estimar a posição do MS a partir da área geográfica coberta pelo setor. Estas informações podem ser utilizadas por métodos de localização para produzir estimativas de posição mais acuradas, sem a necessidade de modificações nos MS's. Por não exigirem terminais modificados, estes métodos são classificados como métodos baseados na rede e podem atender a 100% da base de assinantes [15]. Já os métodos baseados no terminal ou assistidos pelo terminal exigem terminais modificados.

No Brasil, a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) ainda não exige que operadoras de telefonia móvel celular localizem as chamadas para números de emergência originadas em suas redes. Contudo, tal exigência pode tornar-se realidade num futuro próximo.

Neste cenário, as operadoras deverão ser capazes de estimar a posição de qualquer MS originando uma chamada de emergência.

Dos cerca de 4 bilhões de celulares em uso no mundo atualmente [16], apenas 163 milhões têm receptor GPS (*Global Positioning System*) [17], ou seja, aproximadamente 4% do total de aparelhos. Este percentual médio inclui os países desenvolvidos do hemisfério norte, logo, no Brasil, a penetração de MS's com GPS provavelmente é muito inferior a este valor. Estes dados indicam que, no Brasil, onde aproximadamente 90% dos celulares em uso são GSM [18], é essencial aprimorar métodos baseados na rede para a localização de MS's legados de segunda geração. Contudo, a utilidade dessas soluções não está restrita a este cenário particular. Estes métodos também podem estender a disponibilidade de serviços de localização, produzindo estimativas de posição quando outros mais acurados - como GPS ou GPS Assistido (AGPS - *Assisted GPS*) - estiverem indisponíveis devido a limitações sistêmicas - por exemplo, no interior de edificações ou em áreas urbanas densas, onde a recepção de sinais GPS é muitas vezes inviável [15] [19]. Os métodos de correlação de assinaturas de rádio-frequência (RF), apresentados na Seção I-C, são alternativas que atendem a estes requisitos.

C. Métodos de Correlação de Assinaturas de RF

Os métodos de correlação de assinaturas de RF, também conhecidos como DCM (*Database Correlation Methods*) ou *fingerprinting*, são métodos de localização aplicáveis em qualquer rede sem fio [20]. Embora haja uma grande variedade de tais métodos, todos compartilham os mesmos elementos básicos:

- *Assinatura de RF*: É um conjunto de parâmetros disponíveis na RAN e dependentes da posição do MS, conforme discutido na Seção II-A;
- *Banco de Dados de Correlação*: Assinaturas de RF são coletadas em testes de campo ou geradas com a utilização de modelos matemáticos de simulação de rádio-propagação, sendo então armazenadas em um banco de dados de correlação (CDB - *Correlation Database*). O CDB é diretamente acessado pelo servidor de localização. Cada assinatura de RF armazenada no CDB está associada a uma posição específica. A estrutura do CDB e as técnicas para construí-lo são apresentadas na Seção II-B;
- *Servidor de Localização*: O SMLC (*Serving Mobile Location Center*) é o elemento de rede responsável por receber requisições de localização, consultar o CDB e estimar a posição do MS através da correlação da assinatura de RF medida pelo MS com as assinaturas de RF armazenadas no CDB;
- *Técnicas para Redução do Espaço de Busca no CDB*: O CDB pode ser muito grande e analisar todas as assinaturas de RF nele armazenadas pode ser uma tarefa muito demorada. Portanto, é necessário definir técnicas para reduzir o espaço de busca dentro do CDB, resultando em uma diminuição do tempo requerido para produzir uma estimativa de posição. Duas técnicas para redução do espaço são apresentadas na Seção II-C;

- *Correlação de Assinaturas de RF*: Esta comparação ou correlação pode ser feita através de diferentes técnicas de reconhecimento de padrões, como descrito na Seção II-D.

Qualquer método DCM tem duas fases. A primeira é a fase de treinamento, durante a qual o CDB é construído. A segunda é a fase operacional ou de teste, durante a qual estimativas de posição do MS são produzidas [22].

Diferentemente dos métodos de triangulação (multi-angulação ou multi-lateração), os métodos DCM não se baseiam na pressuposição de condições de linha de visada (LOS - *Line of Sight*) [20]. Além disso, são capazes de produzir uma estimativa de posição com apenas uma célula de referência, ao contrário dos métodos de multi-angulação (ou ângulo de chegada), que requerem no mínimo duas células, e dos métodos de multi-lateração (circular ou hiperbólica), que requerem no mínimo três células para estimar a posição do MS [19]. Portanto, serviços de localização baseados em DCM normalmente têm uma disponibilidade maior do que aqueles baseados em triangulação. Além disso, podem alcançar uma precisão de localização bastante superior aos métodos de triangulação e baseados na identidade da célula, conforme sugerem diversos resultados publicados na literatura [20], [22], [23] e [24].

Um fluxograma simplificado de uma requisição de localização originada pelo MS [13] e utilizando um sistema baseado em DCM é mostrado na Fig. 1. No primeiro passo, o MS envia uma requisição de localização para o SMLC, através da RAN. No segundo passo, a RAN comunica-se com o SMLC, usualmente através de um *gateway*. O SMLC recebe a requisição, contendo a assinatura de RF medida pelo MS. No terceiro passo, o SMLC consulta o CDB, obtendo no quarto passo as assinaturas de RF que serão comparadas com a assinatura de RF medida pelo MS. O SMLC então aplica uma técnica de reconhecimento de padrões para obter a estimativa de posição do MS, que lhe é enviada através da RAN no quinto e sexto passos.

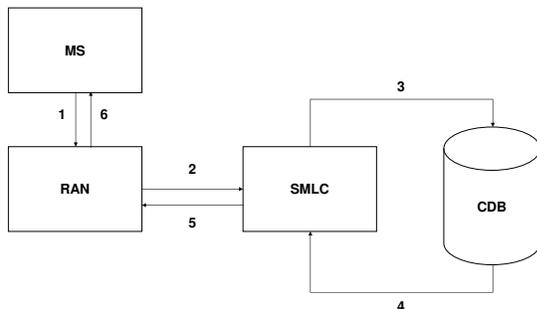


Fig. 1. Fluxograma de Requisição de Localização Originada pelo MS.

II. COMPONENTES PRINCIPAIS DE MÉTODOS DCM

A. Assinaturas de Rádio-Frequência

Tal qual uma impressão digital humana, que traz a identificação única de uma pessoa, espera-se que uma assinatura de RF identifique unicamente uma posição geográfica. Para tal, o número de parâmetros de sinal na assinatura de RF deve ser grande o suficiente para permitir uma correspondência única com uma dada posição. Os parâmetros de sinal selecionados - ou pelo menos suas médias temporais - devem ter baixa variabilidade no tempo em uma dada posição. Porém, estabilidade completa ao longo do tempo não é possível. Embora o uso das médias temporais reduza variações de pequena escala, modificações na RAN - como a ativação de novos setores, substituição de modelos de antenas de transmissão ou recepção, alteração nas potências de transmissão, etc. - podem invalidar o mapeamento prévio entre uma dada assinatura de RF e uma certa posição. Em tais casos, é necessário atualizar o CDB, obtendo novas assinaturas de RF através dos métodos descritos na Seção II-B.2.

Uma grande variedade de parâmetros de sinal pode ser selecionada para compor uma assinatura de RF: nível de sinal recebido (RSS - *Received Signal Strength*) [25], tempo de propagação (RTT - *Round Trip Time*) [23], perfil de retardo de potência calculado por meio da resposta impulsiva do canal [24], ângulo de chegada [26], etc. Idealmente, os parâmetros selecionados devem estar previamente disponíveis na RAN. O uso de parâmetros ordinariamente envolvidos com o gerenciamento de chamadas ou sessões evita a carga adicional na RAN que surge se mensagens e parâmetros específicos para localização são inseridos. Outro benefício dessa abordagem é que nenhuma modificação de *hardware* ou *software* é necessária no MS, tornando possível localizar qualquer MS legado dentro da área de cobertura da rede. Por essas razões, os parâmetros mais frequentemente utilizados são o RSS e o RTT. O MS periodicamente monitora o RSS do canal de controle do setor servidor e das células vizinhas para auxiliar a seleção de células e *handover*. Estes valores de RSS são reportados para a BSC através de relatórios de medidas (NMRs - *Network Measurement Reports*). Apenas os valores de RSS de canais transmitidos com potência constante podem ser inseridos em uma assinatura de RF [25], então o canal de controle, onde o controle de potência não é aplicado, é a escolha mais óbvia.

Uma assinatura de RF pode ser classificada como *assinatura alvo* ou como *assinatura de referência*. Uma assinatura de RF alvo é a assinatura de RF associada ao MS que se deseja localizar, i.e., ela contém parâmetros de sinal medidos pelo MS ou pelos setores de referência. As assinaturas de RF de referência são coletadas ou geradas durante a fase de treinamento e armazenadas no CDB. Ambos os tipos de assinaturas de RF têm a mesma estrutura: todos os parâmetros usados na assinatura alvo também devem estar presentes nas assinaturas de referência. A estrutura das assinaturas de RF alvo utilizada neste trabalho é definida pela matriz $N_a \times 3$:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} CI_1 & RSS_1 & RTT_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ CI_{N_a} & RSS_{N_a} & RTT_{N_a} \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde N_a é o número de setores âncora, CI_i e RSS_i são a

identidade da célula (CI - *Cell Identity*) e RSS medido do i -ésimo setor âncora. RTT_i é o tempo de propagação de ida e volta entre o MS e o i -ésimo setor âncora. As linhas são classificadas em ordem decrescente de RSS, então $RSS_i \geq RSS_j$, se $i \leq j$. Os passos de quantização e as faixas dinâmicas de RSS e RTT, o número máximo de setores âncora e o número de valores de RTT disponíveis são específicos de cada tipo de rede sem fio. Em redes GSM, por exemplo, a assinatura alvo pode conter até sete valores de RSS - correspondentes ao setor servidor e aos seis vizinhos recebidos com maior intensidade - enquanto o valor de RTT está disponível apenas para o setor melhor servidor [27], que usualmente é o setor âncora com o maior valor de RSS. Em redes WCDMA, devido ao suporte ao *soft-handover*, há múltiplos valores de RTT disponíveis para um MS em modo ativo: um valor para cada célula na lista de células ativas (*active set*) [14].

B. Banco de Dados de Correlação

1) *Estrutura do CDB*: Cada elemento do CDB contém uma assinatura de RF de referência e um conjunto único de coordenadas geográficas. A distribuição planar - ou espacial, no caso de localização tridimensional - dessas coordenadas de referência dentro da área de serviço define a estrutura do CDB. A *área de serviço* é a região onde o serviço de localização é oferecido. Neste tutorial, apenas a localização bidimensional é considerada, mas a extensão para o caso tridimensional é direta. Tipicamente, há dois tipos de estrutura que um CDB pode assumir:

- **Grade Uniforme**: Se o CDB é organizado como uma grade uniforme, todas as coordenadas de referência são uniformemente espaçadas. A distância entre coordenadas de referência adjacentes define a resolução do CDB, que deve ser comparável à acurácia média esperada do método de localização [20]. Não é razoável utilizar uma resolução muito pequena, se o erro de localização médio é muito alto. Por outro lado, utilizar uma resolução muito grande pode provocar degradação da precisão do método. A grade uniforme é a estrutura mais adequada para CDBs construídos a partir de modelagem de rádio-propagação.
- **Lista Indexada**: Se o CDB é estruturado como uma lista indexada, a distribuição das coordenadas de referência não segue nenhum padrão regular. Esta estrutura é usualmente adotada em CDBs construídos a partir de medidas de campo [22]. Por exemplo, se o CDB é construído a partir de rotas veiculares de coleta de medidas, o padrão irregular das ruas pode impedir a obtenção de assinaturas de RF uniformemente espaçadas.

2) *Construção do CDB*: Esta seção apresenta as principais alternativas para a construção do CDB, que são: **i)** medidas de campo, **ii)** modelagem de rádio-propagação e **iii)** combinação de modelagem de propagação e medidas de campo, utilizando receptores de referência.

O CDB pode ser inteiramente construído a partir de medidas de campo. A coleta de medidas requer um MS, um *software* de coleta e processamento de medidas feitas pelo MS e um receptor GPS, no caso de medidas *outdoor*. O *software* pode ser executado em um *laptop* ou *palmtop* conectado ao MS,

ou no próprio MS. Periodicamente, parâmetros relacionados à localização, como os listados na equação (1), são coletados pelo *software* e armazenados para posterior processamento. Esses parâmetros são medidos pelo MS ou definidos pela rede e enviados ao MS. Para cada conjunto de parâmetros coletado, a posição do MS é registrada pelo receptor GPS. No caso de medidas *indoor*, pode ser necessário utilizar um mapa com a planta do prédio e registrar as posições de referência do MS manualmente.

O CDB empírico obtido a partir de medidas de campo usualmente permite que os métodos DCM que dele fazem uso atinjam maior precisão. Porém, essa alternativa apresenta uma séria desvantagem, especialmente quando utilizada em redes de área metropolitana. Nessas redes, para manter o CDB atualizado, testes de campo devem ser realizados após qualquer alteração em elementos da RAN. Estas alterações - ativação de novas células, substituição de modelos de antenas, mudança de azimute ou inclinação, alteração da potência de transmissão, etc. - ocorrem frequentemente, especialmente em redes de telefonia móvel celular, tornando a utilização deste tipo de CDB praticamente inviável nessas redes. A degradação da precisão de localização de métodos DCM utilizando CDBs com parâmetros desatualizados em redes celulares foi avaliada em [22] e [29]. Porém, no caso de métodos DCM para localização *indoor*, a utilização de CDBs construídos a partir de medidas pode ser uma opção viável, considerando-se a maior complexidade do ambiente de propagação *indoor* - o que torna mais difícil a modelagem acurada da rádio-propagação - e a menor área a ser coberta pela campanha de coleta de medidas.

A segunda alternativa para construção do CDB é a modelagem de propagação [21]. A principal vantagem desta alternativa é a possibilidade de atualizar o CDB de forma fácil, rápida e barata. Toda vez que ocorrem alterações nos elementos da RAN, a atualização do CDB requer apenas que os modelos de propagação sejam aplicados com os parâmetros atualizados da RAN. Porém, a precisão de localização pode ser pior que aquela obtida com a utilização de CDBs construídos a partir de medidas de campo. Essa degradação da precisão pode ser reduzida através da calibração ou ajuste fino dos modelos de propagação empregados [30].

Há uma grande variedade de modelos matemáticos para a predição de rádio-propagação, mas eles podem ser agrupados em duas classes principais: modelos determinísticos e modelos empíricos. Modelos determinísticos são baseados em técnicas de traçado de trajetória de raios. Eles descrevem a propagação da onda eletromagnética por meio de raios lançados da antena transmissora. Esses raios são refletidos e difratados em elevações do terreno, edificações, paredes e outros obstáculos. A principal desvantagem desses métodos reside na elevada carga de processamento requerida e conseqüentemente no tempo mais longo para execução das predições de cobertura [31]. Modelos empíricos são baseados em extensas campanhas de coleta de medidas de campo que, após análise estatística, fornecem equações parametrizadas de perda de propagação no percurso. Os parâmetros ou coeficientes dessas equações podem ser ajustados, dentro de limites pré-determinados, para melhor representar um ambiente de

propagação particular [32]. Modelos empíricos apresentam uma menor carga de processamento e, embora usualmente sejam menos acurados que os modelos determinísticos, provêm uma acurácia compatível com a acurácia média da maioria dos métodos DCM para localização *outdoor* [23][21].

O modelo de Okumura-Hata [33] provê uma fórmula empírica para a perda de propagação, obtida a partir de extensas medidas em áreas urbanas. Esse modelo é aplicável ao projeto de sistemas operando nas faixas de UHF (*Ultra High Frequency*) e VHF (*Very High Frequency*), sob as seguintes condições: faixa de frequências entre 100 e 1500 MHz, distâncias entre 1 e 20 km, altura da antena da BTS entre 30 e 200 metros, e altura da antena do MS entre 1 e 10 metros. O modelo de Okumura-Hata é largamente utilizado no planejamento de RF de redes celulares.

O modelo de Okumura-Hata não leva em consideração explicitamente a difração sobre o terreno e edificações. Para tal, é necessário representar matricialmente a topografia da área de serviço e aplicar modelos específicos de perda por difração.

A topografia da área de serviço é representada por uma matriz \mathbf{H} denominada modelo de elevação digital (DEM - *Digital Elevation Model*) ou base topográfica digitalizada [34]. Cada elemento $h_{i,j}$ da matriz armazena a altura média do terreno em uma superfície de $r_H \times r_H$ m², denominada *pixel*. O parâmetro r_H é a resolução planar da matriz \mathbf{H} . A matriz \mathbf{H} também pode conter, adicionada à altura do terreno, a altura de edificações. Se a área de serviço cobre uma superfície total de $l \times w$ m², então \mathbf{H} tem $\left[\frac{l}{r_H}\right] \times \left[\frac{w}{r_H}\right]$ elementos.

Para representar a superfície da área de serviço como um plano, dividido em *pixels* uniformemente espaçados, é necessário aplicar um sistema de coordenadas geográficas que use uma projeção cartográfica retangular, como o sistema UTM (*Universal Transverse Mercator*) [35]. Assume-se que o sistema UTM é utilizado e que $h_{1,1}$, o primeiro elemento de \mathbf{H} , está situado no extremo noroeste da área de serviço, conforme ilustrado pela Fig. 2. Se as coordenadas UTM $[x_1 \ y_1]^T$ de $h_{1,1}$ são conhecidas, então as coordenadas de $h_{i,j}$ são dadas por:

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 + r_H (j - 1) \\ y_1 - r_H (i - 1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde $i = 1, 2, \dots, \left[\frac{w}{r_H}\right]$ e $j = 1, 2, \dots, \left[\frac{l}{r_H}\right]$.

O perfil do relevo - incluindo a altura dos prédios, se disponível - entre a k -ésima célula e o *pixel* (i, j) é obtido a partir do DEM. A Fig. 3 mostra o perfil do relevo e a fronteira da primeira Zona de Fresnel [32] em um rádio-enlace.

Após a obtenção do perfil do relevo entre o transmissor e o receptor, as perdas por difração em obstáculos devem ser calculadas por um modelo específico, como Epstein-Peterson, Bullington ou Deygout [32]. A perda de propagação média em dB, calculada pelo modelo de Okumura-Hata, entre a k -ésima célula na área de serviço e o *pixel* (i, j) , acrescida da perda por difração $u_{i,j,k}$, é dada por:

$$L_{i,j,k} = c_1 + c_2 \log_{10}(d_{i,j,k}) + \log_{10}(z_k) [c_3 + c_5 \log_{10}(d_{i,j,k})] + c_4 u_{i,j,k} \quad (3)$$

onde $d_{i,j,k}$ é a distância em metros entre a antena da k -ésima célula e o *pixel* (i, j) . Os coeficientes do modelo dependem da morfologia da região e da frequência de operação do rádio-enlace. Para RANs utilizando a banda de 869-881 MHz, o modelo de Okumura-Hata é aplicado na frequência central de

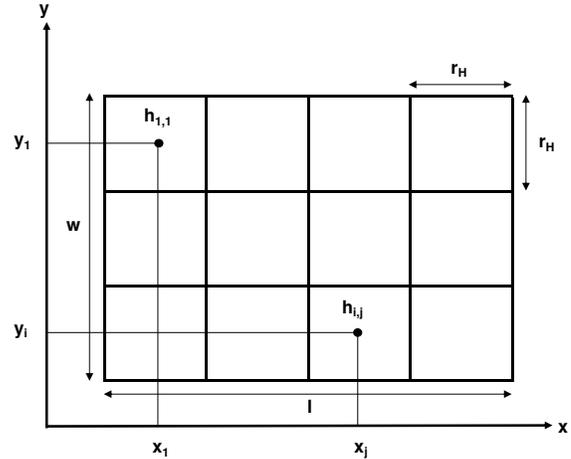


Fig. 2. Superfície da Área de Serviço representada como uma Matriz.

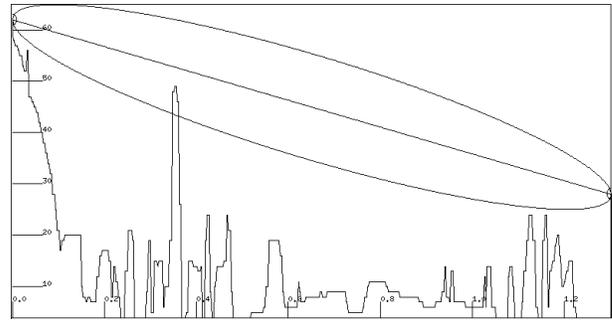


Fig. 3. Perfil do Relevo com Altura de Prédios.

875 MHz. Os valores dos coeficientes são listados na Tab. I. Estes são os valores padrão para áreas urbanas e suburbanas, exceto os valores de c_4 , que foram empiricamente definidos pelos autores em [36].

TABELA I
COEFICIENTES DO MODELO DE OKUMURA-HATA.

Coefficiente	Urbana	Suburbana
c_1	-12,1	-2,2
c_2	-44,9	-44,9
c_3	-5,83	-5,83
c_4	0,5	0,4
c_5	6,55	6,55

O parâmetro z_k na equação (3) é a altura efetiva em metros da antena da k -ésima célula. Sejam B_1 a altura da antena do setor em relação ao nível do solo, B_0 a altura do solo em relação ao nível do mar no local onde está instalada a antena do setor, M_1 a altura da antena do MS em relação ao nível do solo e M_0 a altura do solo em relação ao nível do mar no local onde está situado o MS. Os parâmetros B_0 , B_1 , M_0 e M_1 são indicados na Fig. 4. A altura efetiva da antena da k -ésima célula é dada por [37]:

$$z_k = B_1 + B_0 - (M_1 + M_0), \text{ se } B_0 > M_0 \quad (4)$$

$$z_k = B_1, \text{ se } B_0 < M_0$$

onde assume-se que $M_1 = 1.5$ metros [33].

Os ângulos ϕ (plano vertical) e θ (plano horizontal) entre a antena da k -ésima célula e o *pixel* (i, j) podem ser calculados utilizando trigonometria, uma vez que as coordenadas

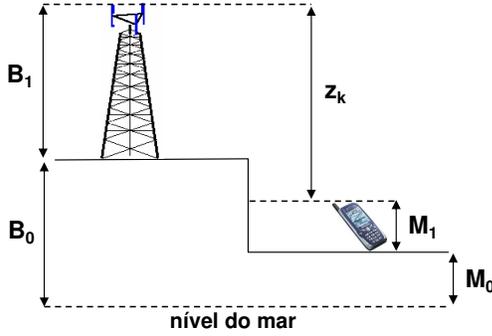


Fig. 4. Cálculo da Altura Efetiva da Antena da BTS.

geográficas espaciais - x , y e z - da antena e do $pixel$ são conhecidas. A potência de transmissão do canal de controle da k -ésima célula é considerada, assim como as perdas em conectores e cabos entre o transmissor e a antena transmissora. Portanto, de posse dos diagramas de radiação vertical e horizontal da antena, é possível estimar a potência isotrópica efetivamente irradiada (EIRP - *Effective Isotropic Radiated Power*) do canal de controle da k -ésima célula na direção do $pixel$ (i, j). Essa direção é definida pelos ângulos ϕ e θ . O RSS em dBm no $pixel$ (i, j) do canal de controle da k -ésima célula é dado por:

$$\text{RSS}_{i,j,k} = \text{EIRP}_{i,j,k} - L_{i,j,k} \quad (5)$$

onde $\text{EIRP}_{i,j,k}$ é a EIRP do canal de controle da k -ésima célula na direção do $pixel$ (i, j) e $L_{i,j,k}$ é a perda de propagação entre a antena da k -ésima célula e o $pixel$ (i, j), dada pela equação (3). Um mapa com os valores previstos de RSS para uma célula é mostrado na Fig. 5. Esse mapa foi gerado utilizando o modelo de Okumura-Hata sobre uma base topográfica digitalizada com resolução planar $r_H = 5$ metros, com altura de prédios sobreposta ao relevo. As perdas adicionais por difração sobre estes obstáculos foram calculadas pelo modelo de Epstein-Peterson [32].

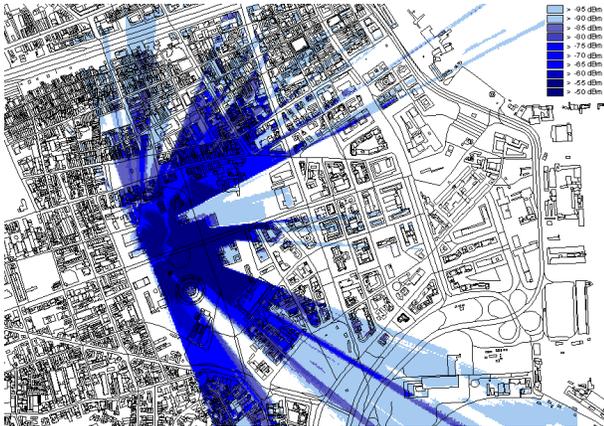


Fig. 5. Mapa de RSS para uma Célula.

Considerando a assinatura de RF definida na equação (1),

não apenas os valores de RSS, mas também os valores de RTT devem ser estimados. O valor de referência de RTT - i.e., contido na assinatura de RF de referência - entre a k -ésima célula e o $pixel$ (i, j) é dado por:

$$\text{RTT}_{i,j,k} = \left\lfloor \frac{2d_{i,j,k}}{cT_s} \right\rfloor \quad (6)$$

onde c é a velocidade da luz no espaço livre em metros por segundo, T_s é o período de símbolo em segundos e $d_{i,j,k}$ é a distância em metros entre a antena da k -ésima célula e o $pixel$ (i, j). A equação (6) assume condições LOS entre a antena e o $pixel$, mas isso raramente se verifica em condições reais, especialmente em áreas urbanas densas. Para melhorar a acurácia do valor estimado do RTT de referência, o atraso adicional de propagação devido à propagação em condições NLOS pode ser modelado como uma variável aleatória. Uma alternativa para essa modelagem é apresentada pelos autores em [23].

A assinatura de RF de referência no $pixel$ (i, j) está completa após $\text{RSS}_{i,j,k}$ e $\text{RTT}_{i,j,k}$ terem sido calculados para $k = 1, 2, \dots, N_{i,j}$, onde $N_{i,j}$ é o número de células cujos valores previstos de RSS estão acima de um limiar na posição do $pixel$ (i, j). Note que $1 \leq N_{i,j} \leq N_c$, onde N_c é o número total de células na área de serviço. A assinatura de RF de referência no $pixel$ (i, j) é definida por:

$$\mathbf{S}_{i,j} = \begin{bmatrix} \text{CI}_{i,j,1} & \text{RSS}_{i,j,1} & \text{RTT}_{i,j,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \text{CI}_{i,j,N_{i,j}} & \text{RSS}_{i,j,N_{i,j}} & \text{RTT}_{i,j,N_{i,j}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde $\text{CI}_{i,j,k}$ é o CI da k -ésima célula cujo sinal é detectado, segundo a predição de cobertura, no $pixel$ (i, j). As linhas são classificadas em ordem decrescente de RSS, i.e., $\text{RSS}_{i,j,k'} \geq \text{RSS}_{i,j,k''}$, se $k' \leq k''$.

O CDB está completo após $\mathbf{S}_{i,j}$ ter sido calculado para todos os $pixels$ na área de serviço - i.e., para $i = 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{w}{r_H} \right\rceil$ e $j = 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{l}{r_H} \right\rceil$. A estrutura do CDB assim obtido é uma grade uniforme, conforme definido na Seção II-B.1.

A resolução planar do CDB deve ser comparável à acurácia média esperada do método de localização [20]. Então, se r_H é muito pequeno, a grade do CDB pode ser sub-amostrada [23]. A matriz resultante terá $\left\lceil \frac{l}{r_S} \right\rceil \times \left\lceil \frac{w}{r_S} \right\rceil$ elementos, onde r_S é a nova resolução planar do CDB. A Fig. 6 mostra um exemplo onde $r_S = 2r_H$. A nova assinatura de RF de referência $\mathbf{S}'_{1,1}$ do primeiro elemento da matriz é obtida pela média dos valores contidos nas assinaturas de RF de referência originais $\mathbf{S}_{1,1}$, $\mathbf{S}_{1,2}$, $\mathbf{S}_{2,1}$ e $\mathbf{S}_{2,2}$. O processo é repetido para todos os $pixels$. Se as coordenadas UTM de $[x_1 \ y_1]^T$ de $\mathbf{S}'_{1,1}$ são conhecidas, então as coordenadas de $\mathbf{S}'_{i,j}$ são dadas por:

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 + r_S(j-1) \\ y_1 - r_S(i-1) \end{bmatrix} \quad (8)$$

onde $i = 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{w}{r_S} \right\rceil$ e $j = 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{l}{r_S} \right\rceil$.

Se o CDB é construído a partir de modelagem de propagação, medidas de campo podem ser utilizadas para um ajuste fino dos modelos de propagação empíricos utilizados. Espera-se que este procedimento melhore a precisão de localização de um método DCM utilizando tal CDB.

Considere que uma rota de calibração é realizada através da área de serviço. Em cada ponto de medição, o RSS de

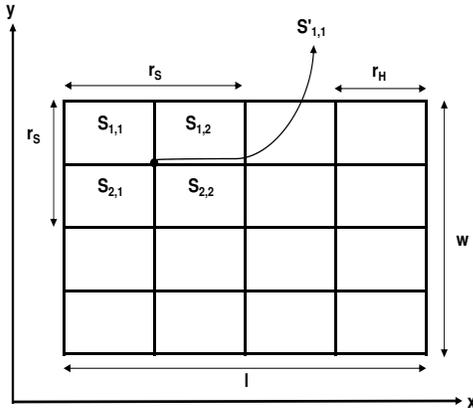


Fig. 6. Sub-amostragem de um CDB estruturado como uma Grade Uniforme.

cada célula detectada é coletado. As coordenadas dos pontos de medição, obtidas com o GPS, também são coletadas, permitindo identificar sobre quais *pixels* do CDB os pontos de medição da rota de calibração estão situados, conforme exemplificado pela Fig. 7(a). Para pontos de medição situados sobre um mesmo *pixel*, um valor médio de RSS por célula é calculado, restando apenas um ponto de medição equivalente por *pixel*. Após esse procedimento, cada ponto de medição é identificado pela 3-upla (i_n, j_n, \mathbf{M}_n) , conforme exemplificado pela Fig. 7(b). O par (i_n, j_n) identifica a *pixel* sobre a qual o n -ésimo ponto de medição está situado. Note que $1 \leq n \leq N_m$, onde N_m é o número de pontos de medição da rota de calibração. A matriz \mathbf{M}_n é o conjunto de valores de RSS médios coletados no n -ésimo ponto de medição, e é definida por:

$$\mathbf{M}_n = \begin{bmatrix} CI_{n,1} & RSS_{n,1} \\ \vdots & \vdots \\ CI_{n,N_n} & RSS_{n,N_n} \end{bmatrix} \quad (9)$$

onde $CI_{n,k}$ e $RSS_{n,k}$ são o CI e RSS da k -ésima célula no n -ésimo ponto de medição. Note que $1 \leq k \leq N_n$, onde N_n é o número de células detectadas no n -ésimo ponto de medição e $1 \leq N_n \leq N_c$. As linhas na matriz \mathbf{M} são classificadas em ordem decrescente de RSS, então $RSS_{n,k'} \geq RSS_{n,k''}$, se $k' \leq k''$.

No n -ésimo ponto da rota de calibração, a diferença entre os valores medido e predito de RSS da k -ésima célula é dada por:

$$b_{n,k} = \mathbf{M}_n(k', 2) - \mathbf{S}'_{i,j}(k'', 2) \quad (10)$$

para

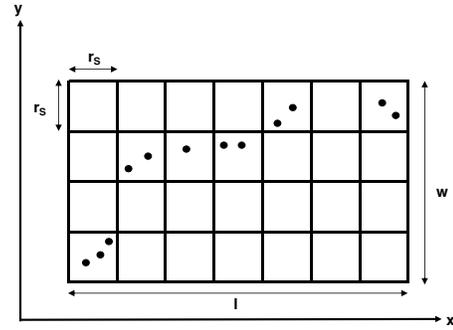
$$\mathbf{M}_n(k', 1) = \mathbf{S}'_{i,j}(k'', 1) = CI_k \quad (11)$$

e

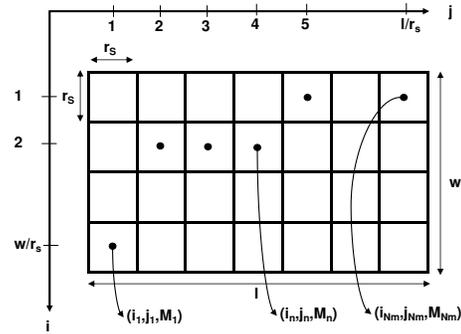
$$(i_n, j_n) = (i, j) \quad (12)$$

Note que $1 \leq k' \leq N_n$, $1 \leq k'' \leq N_{i,j}$, $1 \leq k \leq N_c$ e $1 \leq n \leq N_m$.

Calculando $b_{n,k}$ para todos os pontos da rota de calibração onde a k -ésima célula foi detectada, obtém-se uma matriz coluna \mathbf{B}_k com $N_{m,k}$ linhas. O parâmetro $N_{m,k}$ indica o número de pontos da rota de calibração onde a k -ésima célula foi detectada. Note que $1 \leq N_{m,k} \leq N_m$.



(a) Rota Original



(b) Rota Final

Fig. 7. Rota de Calibração.

A calibração ou ajuste fino do modelo de propagação é feito célula a célula, através da definição de um fator de calibração C_k que é adicionado à perda de propagação - dada pela equação (3) - entre a antena da k -ésima célula e qualquer *pixel* (i, j) na área de serviço. O fator C_k minimiza a soma das diferenças absolutas entre os valores de RSS medidos e preditos da k -ésima célula nos pontos da rota de calibração onde a k -ésima célula foi detectada. O fator C_k em dB pode ser estimado pelo método dos mínimos quadrados, conforme:

$$C_k = \left(\mathbf{V}^T \mathbf{V} \right)^{-1} \mathbf{V}^T \mathbf{B}_k \quad (13)$$

onde \mathbf{V} é uma matriz coluna com $N_{m,k}$ linhas e cujos elementos são todos iguais a um [38].

A terceira alternativa para construção do CDB é a utilização simultânea de assinaturas de referência medidas e preditas. Neste caso, o CDB é dito misto. Primeiro, um CDB estruturado como uma grade uniforme é construído utilizando modelagem de rádio-propagação. Em seguida, medidas de campo são realizadas para coletar assinaturas de RF de referência. Estes pontos de medição podem ser isolados ou localizados ao longo de rotas. Nos *pixels* do CDB onde houver pontos de medição, as assinaturas de referência medidas substituem as assinaturas de referência preditas. Para suavizar discontinuidades entre valores preditos e medidos de RSS, alguma forma de interpolação entre os valores medidos e preditos precisa ser realizada nos *pixels* em torno dos pontos de medição [38].

Espera-se que a inserção de assinaturas de referência medidas no CDB melhore a precisão de localização do MS, especialmente nos *pixels* próximos aos pontos de medição. Porém, as mesmas dificuldades de atualização que atingem os CDBs construídos inteiramente a partir de medidas de campo também afetam os CDBs mistos. Após qualquer alteração na RAN, medidas atualizadas precisam ser obtidas para prevenir degradação da precisão de localização [22]. Se os pontos de medição são obtidos a partir de rotas veiculares, isso significa que novas rotas precisam ser realizadas para a atualização do CDB.

Uma solução alternativa para a atualização dos CDBs mistos é a utilização de receptores de referência denominados *passive listeners* [29]. Estas unidades são MS's posicionados em locais com coordenadas conhecidas. Estes MS's realizam medidas que são enviadas à rede através de NMRs, possibilitando uma atualização automática do CDB misto. É possível aumentar a precisão de localização em uma dada zona por meio da instalação de um número suficientemente alto de receptores de referência nessa zona. Um algoritmo para indicar a distribuição ótima de receptores de referência em uma dada área é proposto em [29].

C. Técnicas para Reduzir o Espaço de Correlação

O espaço de correlação é um sub-conjunto de elementos do CDB cujas assinaturas de referência são comparadas com a assinatura alvo. As coordenadas geográficas dos elementos do espaço de correlação são posições candidatas para a solução do problema de localização do MS. Porém, não é praticável comparar a assinatura alvo com todas as assinaturas de referência armazenadas no CDB, uma vez que isso resultaria em uma elevada carga de processamento e em um longo tempo para produzir uma estimativa de posição. Portanto, alguma técnica deve ser aplicada para reduzir o espaço de correlação sem prejudicar de modo perceptível a precisão de localização.

Duas técnicas de redução do espaço de correlação são apresentadas nessa seção: filtragem determinística do CDB, originalmente proposta pelos autores em [23], e busca otimizada com algoritmos genéticos (GA - *Genetic Algorithms*), originalmente proposta em [39] e modificada pelos autores em [40]. As técnicas de redução do espaço de correlação são apresentadas assumindo que o CDB é estruturado como uma grade uniforme, porém a extensão para o caso de um CDB estruturado como uma lista indexada é direta.

O espaço de correlação original é representado pelo conjunto \mathcal{A} e contém todos os elementos do CDB. Se o CDB é estruturado como uma grade uniforme e a área de serviço cobre uma superfície total de $l \times w$ m², então $\#\mathcal{A} = \left\lceil \frac{l}{r_S} \right\rceil \times \left\lceil \frac{w}{r_S} \right\rceil$, onde r_S é a resolução planar do CDB. O conjunto \mathcal{A} é definido por:

$$\mathcal{A} = \left\{ (x_j, y_i, \mathbf{S}'_{i,j}) \mid i = 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{w}{r_S} \right\rceil \text{ e } j = 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{l}{r_S} \right\rceil \right\} \quad (14)$$

onde $\mathbf{S}'_{i,j}$ é a assinatura de RF de referência no *pixel* (i, j) . As coordenadas geográficas (x_j, y_i) do *pixel* (i, j) são dadas pela equação (8).

O espaço de correlação reduzido \mathcal{D} é um subconjunto de \mathcal{A} . O fator de redução do espaço de correlação pode ser definido

por:

$$\gamma = 1 - \frac{\#\mathcal{D}}{\#\mathcal{A}} \quad (15)$$

onde $\#\mathcal{A}$ e $\#\mathcal{D}$ são o número de elementos no espaço de correlação original (\mathcal{A}) e reduzido (\mathcal{D}), respectivamente. Note que $\mathcal{D} \subset \mathcal{A}$.

1) *Filtragem Determinística*: Essa técnica reduz progressivamente o espaço de correlação, aplicando três passos sucessivos de filtragem sobre os elementos do CDB [23]. A área de serviço é representada na Fig. 8(a), onde a área de melhor servidor de cada célula é mostrada, bem como os vetores representando o arruamento. O mapa da área de serviço inclui todos os elementos do CDB e corresponde ao espaço de correlação original \mathcal{A} .

1) No primeiro passo de filtragem, o espaço de correlação é restrito aos elementos do CDB dentro da área de melhor servidor da célula com o maior valor de RSS na assinatura de RF alvo, obtendo-se:

$$\mathcal{B} = \left\{ (x_j, y_i, \mathbf{S}'_{i,j}) \mid \mathbf{S}'_{i,j} \in \mathcal{A} \text{ e } \mathbf{S}'_{i,j}(1, 1) = \mathbf{F}(1, 1) \right\} \quad (16)$$

onde $\mathbf{S}'_{i,j}(1, 1)$ e $\mathbf{F}(1, 1)$ são o CI do melhor servidor na assinatura de referência e na assinatura alvo, respectivamente. A assinatura de referência é definida pela equação (7). A assinatura alvo é definida pela equação (1). A área de melhor servidor de uma célula, cujo CI é indicado por $\mathbf{F}(1, 1)$, é mostrada na Fig. 8(b). Essa área contém os elementos de \mathcal{B} .

2) No segundo passo de filtragem, o espaço de correlação é restrito aos elementos cujo valor de RTT do melhor servidor é igual ao valor de RTT do melhor servidor na assinatura de RF alvo. O conjunto resultante é definido por:

$$\mathcal{C} = \left\{ (x_j, y_i, \mathbf{S}'_{i,j}) \mid \mathbf{S}'_{i,j} \in \mathcal{B} \text{ e } \mathbf{S}'_{i,j}(1, 3) = \mathbf{F}(1, 3) \right\} \quad (17)$$

onde $\mathbf{S}'_{i,j}(1, 3)$ e $\mathbf{F}(1, 3)$ são os valores de referência e alvo de RTT, respectivamente. A Fig. 8(c) mostra os *pixels* pertencentes a \mathcal{C} . O segundo passo de filtragem é omitido em RANs onde valores de RTT não estão disponíveis, como no caso de redes WiFi.

3) No terceiro passo de filtragem, o espaço de correlação é restrito aos elementos cujas assinaturas de referência contêm as primeiras N células listadas na assinatura alvo \mathbf{F} . Como as linhas de \mathbf{F} são classificadas em ordem decrescente de RSS, essas células têm os N maiores valores de RSS em \mathbf{F} . O conjunto dos CIs das N células com os maiores valores de RSS na assinatura alvo é definido por:

$$\mathcal{I}_{T_N} = \{ \mathbf{F}(1 : N, 1) \mid N \in [1, N_a] \} \quad (18)$$

onde N_a é o número de células âncora em \mathbf{F} . O conjunto de CIs na assinatura de referência no *pixel* (i, j) é definido por:

$$\mathcal{I}_{R,i,j} = \left\{ \mathbf{S}'_{i,j}(1 : N_{i,j}, 1) \mid \mathbf{S}'_{i,j} \in \mathcal{C} \right\} \quad (19)$$

onde $N_{i,j}$ é o número de células em $\mathbf{S}'_{i,j}$. A cardinalidade do conjunto $(\mathcal{I}_{R,i,j} \cap \mathcal{I}_{T_N})$ informa quantas das células na assinatura de referência do *pixel* (i, j) estão entre as N células com os maiores valores de RSS na

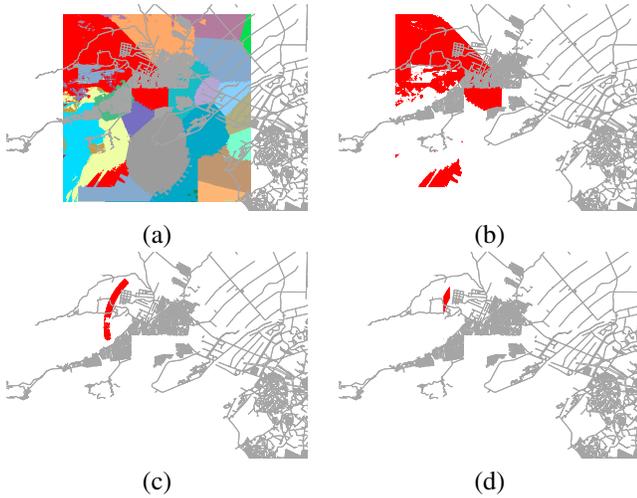


Fig. 8. Redução do Espaço de Correlação com Filtragem Determinística

assinatura alvo. Se $\#(\mathcal{I}_{R,i,j} \cap \mathcal{I}_{T_N}) = 0$, o valor de N é reduzido até que $\#(\mathcal{I}_{R,i,j} \cap \mathcal{I}_{T_N}) > 0$.

No terceiro passo de filtragem, o espaço de correlação é restrito aos *pixels* onde $\#(\mathcal{I}_{R,i,j} \cap \mathcal{I}_{T_N}) = N$. O espaço de correlação reduzido assim obtido é definido por:

$$\mathcal{D} = \left\{ (x_j, y_i, \mathbf{S}'_{i,j}) \mid \mathbf{S}'_{i,j} \in \mathcal{C} \text{ e } \#(\mathcal{I}_{R,i,j} \cap \mathcal{I}_{T_N}) = N \text{ e } N \in [1, N_a] \right\} \quad (20)$$

A Fig. 8(d) mostra os *pixels* pertencentes a \mathcal{D} . Note que $\mathcal{D} \subset \mathcal{C} \subset \mathcal{B} \subset \mathcal{A}$ e que, nesse caso, $\#\mathcal{D} \ll \#\mathcal{A}$, o que significa que a técnica de filtragem determinística do CDB atinge um elevado fator de redução do espaço de correlação [23].

2) *Busca Otimizada utilizando Algoritmos Genéticos*: GA é uma técnica de busca adaptativa baseada nos princípios de seleção natural e reprodução genética [41]. Cada solução candidata é um indivíduo representado por uma sequência numérica denominada cromossomo. Quando o cromossomo é representado em forma binária, cada bit é denominado gene. O conjunto de indivíduos em cada ciclo ou geração é denominado população. Os indivíduos em uma população são modificados e combinados por meio de operadores genéticos - *crossover*, mutação e elitismo - produzindo uma nova população para a geração seguinte. O *crossover* combina segmentos de cromossomos de dois indivíduos, produzindo dois novos indivíduos para a geração seguinte. A mutação é uma alteração aleatória de um ou mais genes de um cromossomo. O elitismo é a clonagem do melhor indivíduo de uma geração no ciclo subsequente [42]. A aptidão de um indivíduo é verificada através de uma função de avaliação. Indivíduos mais aptos têm maior probabilidade de serem selecionados para reprodução (*crossover*). O melhor indivíduo em uma população é aquele que atinge o maior valor na função de avaliação. Este ciclo continua até que um critério de parada - o número máximo de gerações, aptidão do melhor indivíduo, tempo de processamento, etc. - seja atingido. O melhor indivíduo da última geração fornece a solução sub-ótima do problema [41].

Na aplicação proposta de GA para localização, cada indivíduo é um *pixel*. Cada *pixel* tem uma assinatura de RF

de referência, que é usada para avaliar a aptidão do indivíduo. Os passos do algoritmo são:

- 1) Inicializar a população da primeira geração, selecionando aleatoriamente indivíduos pertencentes ao conjunto \mathcal{B} , definido na equação (16);
- 2) Avaliar a aptidão de cada indivíduo da população atual, utilizando uma função de correlação;
- 3) Criar os cromossomos, convertendo as coordenadas dos indivíduos para o formato binário;
- 4) Aplicar operadores genéticos - *crossover*, mutação e elitismo - para criar a nova geração;
- 5) Converter os cromossomos para o formato inteiro;
- 6) Se um critério de parada for atingido, a localização do MS é dada pelas coordenadas do indivíduo mais apto; caso contrário, retorna-se ao passo 2.

O primeiro passo é um aprimoramento da formulação proposta em [39], onde a população inicial é aleatoriamente selecionada dentre os *pixels* pertencentes ao conjunto \mathcal{A} . O aprimoramento, proposto originalmente pelos autores em [40], baseia-se na pressuposição de que a probabilidade do MS estar localizado dentro da área de melhor servidor predita do seu setor servidor é maior do que em quaisquer outros *pixels* na área de serviço. Portanto, durante a inicialização da população da primeira geração, em vez de selecionar aleatoriamente indivíduos por toda a área de serviço, os indivíduos são selecionados aleatoriamente dentre os *pixels* pertencentes ao conjunto \mathcal{B} . Como consequência, a aptidão média da população da primeira geração é maior - i.e., na média, os indivíduos da primeira geração estão mais próximos da localização real do MS - o que significa que, em comparação com o algoritmo proposto em [39], menos gerações são necessárias para atingir a solução sub-ótima.

Se o CDB é estruturado como uma grade uniforme, o comprimento de cada cromossomo é dado pelo número de bits necessário para identificar a posição de um *pixel* - i.e., sua linha e sua coluna no CDB - e é dado por $\left\lceil \left(\log_2 \left\lceil \frac{l}{r_S} \right\rceil + \log_2 \left\lceil \frac{w}{r_S} \right\rceil \right) \right\rceil$, onde $l \times w \text{ m}^2$ é a superfície da área de serviço e r_S é a resolução planar do CDB.

Quanto maior a correlação entre a assinatura de referência de um indivíduo e a assinatura alvo, maior a aptidão desse indivíduo. O indivíduo mais apto de uma geração é aquele que atinge a maior correlação. A correlação é calculada utilizando uma das técnicas apresentadas na Seção II-D.

O ciclo do GA termina quando pelo menos uma das seguintes condições ocorrer: **i)** um número máximo de gerações g_{max} for atingido; **ii)** a aptidão do melhor indivíduo não aumentar mais do que ϵ durante α gerações consecutivas. A segunda condição otimiza o critério de parada comum baseado apenas no número máximo de gerações: se a aptidão do melhor indivíduo atinge um estado estacionário, isto pode significar que o algoritmo atingiu um máximo local e que portanto não há necessidade de avaliar novas gerações [43]. A ocorrência prematura do máximo local pode ser evitada elevando-se a taxa de mutação.

O espaço de correlação reduzido \mathcal{D} contém as coordenadas e as assinaturas de referência de todos os indivíduos de todas as gerações. A cardinalidade deste conjunto é $\#\mathcal{D} = g \times \tau$,

onde g é o número de gerações e τ é o número de indivíduos por geração. Note que $g \leq g_{max}$ e que $\mathcal{D} \subset \mathcal{B} \subset \mathcal{A}$.

D. Correlação de Assinaturas de Rádio-Frequência

Após definir a estrutura da assinatura de RF e do CDB, o espaço de correlação e as técnicas para reduzi-lo, faz-se necessário especificar como as assinaturas de referência contidas em \mathcal{D} são comparadas à assinatura alvo. O objetivo é encontrar a assinatura de referência em \mathcal{D} que tem a maior similaridade ou correlação com a assinatura alvo. A correlação pode ser avaliada através dos valores absolutos de RSS ou através da ordenação dos mesmos. Os valores de RTT não são diretamente utilizados na comparação das assinaturas de referência e alvo, mas são aplicados na redução do espaço de correlação, conforme descrito na Seção II-C.1.

Neste trabalho, a correlação entre as assinaturas de referência e alvo é avaliada através da ordenação e dos valores absolutos de RSS. No primeiro caso, esta avaliação é feita utilizando o coeficiente de correlação de ordem de Spearman [45]. No segundo caso, esta avaliação é feita de duas maneiras: **i**) calculando a distância no espaço N -dimensional de RSS entre as assinaturas de referência e alvo [23] e **ii**) utilizando redes neurais artificiais [44].

Assume-se que o MS está localizado no *pixel* cuja assinatura de referência tenha a maior correlação com a assinatura alvo. Alternativamente, em vez de utilizar apenas o *pixel* com a maior correlação, é possível selecionar os K *pixels* com os maiores valores de correlação. Neste caso a localização estimada do MS é dada pela média aritmética das coordenadas desses K *pixels*. Este método é denominado K vizinhos mais próximos (KNN - K Nearest Neighbors) [46].

1) *Distância no Espaço N -Dimensional de RSS*: A similaridade entre as assinaturas de referência e alvo pode ser definida em função da distância entre as mesmas em um espaço N -dimensional de RSS [47]. Cada dimensão corresponde a uma célula. A distância na k -ésima dimensão é a diferença entre os valores de RSS de referência e alvo da k -ésima célula. A Fig. 9 mostra um exemplo para $N = 3$. A distância euclidiana entre a assinatura alvo (ponto negro) e cada assinatura de referência (pontos brancos) no espaço tridimensional de RSS é indicada pelos comprimentos dos segmentos de reta.

A similaridade ou correlação entre as assinaturas de referência e alvo é inversamente proporcional à distância no espaço N -dimensional de RSS entre essas assinaturas. Esta distância pode ser calculada através de diferentes métricas: distância euclidiana, soma de diferenças absolutas (SAD - *Sum of Absolute Differences*), etc. O uso de diferentes métricas pode produzir estimativas de posição distintas [50].

Duas situações são consideradas quando a distância no espaço N -dimensional de RSS é calculada: **i**) caso particular, aplicado especificamente quando a filtragem determinística é utilizada [23], e **ii**) caso geral, onde um termo de penalidade é introduzido [20].

O caso particular é aplicável quando o espaço de correlação reduzido \mathcal{D} é obtido utilizando filtragem determinística do CDB. O caso particular também é aplicável quando apenas

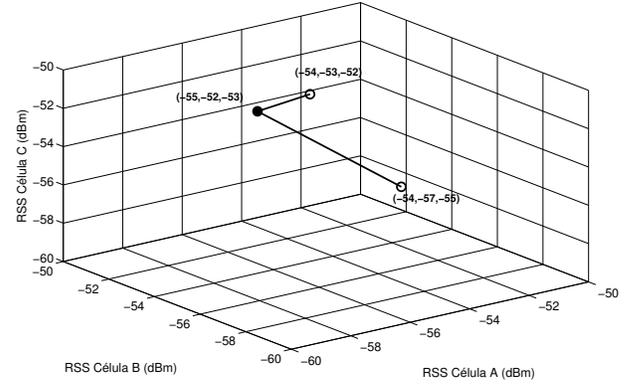


Fig. 9. Distâncias Euclidianas entre as Assinaturas Alvo (ponto negro) e de Referência (pontos brancos) no Espaço 3-dimensional de RSS.

o terceiro passo de filtragem é utilizado, isto é, quando as assinaturas de referência que contêm as primeiras N células listadas na assinatura alvo \mathbf{F} são selecionadas diretamente do conjunto \mathcal{A} , e não do conjunto \mathcal{C} .

Considerando que o CDB é organizado como uma grade uniforme e que $(i, j, \mathbf{S}'_{i,j}) \in \mathcal{D}$, a distância euclidiana entre a assinatura alvo \mathbf{F} e a assinatura de referência $\mathbf{S}'_{i,j}$ no espaço N -dimensional de RSS, no caso particular, é dada por:

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left(\left| \frac{\mathbf{S}'_{i,j}(n_k, 2) - \mathbf{F}(k, 2)}{\delta} \right| \right)^2} \quad (21)$$

onde $\mathbf{S}'_{i,j}(n_k, 1) = \mathbf{F}(k, 1)$ e $n_k \in [1, N_{i,j}]$. O parâmetro $N_{i,j}$ informa o número de linhas em $\mathbf{S}'_{i,j}$. O parâmetro δ representa a inacurácia em dB na medida de RSS, inerente ao MS. A utilização do parâmetro δ na correlação de assinaturas de RF foi originalmente proposta pelos autores em [25]. Note que, na equação (21), qualquer diferença entre valores alvo e de referência de RSS menor que δ é considerada nula. Se o parâmetro δ não for utilizado, a equação (21) torna-se:

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^N (\mathbf{S}'_{i,j}(n_k, 2) - \mathbf{F}(k, 2))^2} \quad (22)$$

No caso geral, a correlação entre as assinaturas de referência e alvo é feita levando em consideração todas as células contidas nas assinaturas, e não apenas as N células com maiores valores de RSS na assinatura alvo, como é feito no caso particular. Um termo de penalidade é inserido para cada célula presente na assinatura alvo e ausente na assinatura de referência [20]. No caso geral com termo de penalidade, a distância euclidiana entre a assinatura alvo \mathbf{F} e a assinatura de referência $\mathbf{S}_{i,j}$ no espaço N -dimensional de RSS é dada por:

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left(\left| \frac{\mathbf{S}'_{i,j}(n_k, 2) - \mathbf{F}(m_k, 2)}{\delta} \right| \right)^2} + 2\beta(N_a - N) \quad (23)$$

onde $\mathbf{S}'_{i,j}(n_k, 1) = \mathbf{F}(m_k, 1)$, $n_k \in [1, N_{i,j}]$ e $m_k \in [1, N_a]$. O parâmetro N_a é o número de células âncora em \mathbf{F} . O parâmetro β é o valor em dB da faixa dinâmica de RSS. Em redes GSM, por exemplo, $\beta = 63$ dB [27]. A equação (23)

difere da formulação apresentada em [20] pela inserção do parâmetro δ .

Na equação (23), o parâmetro N informa quantas células listadas em \mathbf{F} também o são em $\mathbf{S}'_{i,j}$. Ao contrário do que ocorre na equação (21), essas células não têm necessariamente os N maiores valores de RSS em \mathbf{F} . Para cada célula listada em \mathbf{F} e ausente de $\mathbf{S}'_{i,j}$, um termo de penalidade 2β é adicionado. Esse valor é igual ao dobro da máxima diferença possível entre valores de RSS, garantindo que, dadas duas assinaturas de referência, aquela com o maior valor de N estará mais próxima da assinatura alvo, independentemente do valor do primeiro termo na equação (23). Note que, para qualquer assinatura de referência, se $N = N_a$, as equações (21) e (23) fornecem o mesmo resultado. Ou seja, a equação (21) é um caso particular da equação (23).

O cálculo da SAD apresenta menor complexidade computacional, se comparado com o cálculo da distância euclidiana. Se, ao invés da distância euclidiana, a SAD for utilizada, a equação (23) torna-se:

$$d_{i,j} = \sum_{k=1}^N \left| \frac{\mathbf{S}'_{i,j}(n_k, 2) - \mathbf{F}(m_k, 2)}{\delta} \right| + 2\beta(N_a - N) \quad (24)$$

Se o parâmetro δ não for utilizado, a equação (24) torna-se:

$$d_{i,j} = \sum_{k=1}^N \left| \mathbf{S}'_{i,j}(n_k, 2) - \mathbf{F}(m_k, 2) \right| + 2\beta(N_a - N) \quad (25)$$

2) *Redes Neurais Artificiais*: Redes neurais artificiais (ANN - *Artificial Neural Networks*) são sistemas paralelos distribuídos compostos por unidades de processamento denominadas neurônios, que executam funções matemáticas [48]. ANNs são usualmente utilizadas para aproximar funções não lineares e para classificação de padrões [49].

Uma ANN pode ser utilizada para aproximar uma função que representa o mapeamento entre uma assinatura de RF e um par de coordenadas geográficas (x, y) , minimizando o erro quadrático médio (MSE - *Mean Squared Error*). Em [44], foi proposta e testada em redes WiFi uma topologia para uma ANN com tal aplicação, com dois valores de entrada por célula detectada: o primeiro é uma variável booleana indicando se a célula está presente ou não na assinatura de RF; o segundo é o valor de RSS normalizado referente a esta célula. Em redes onde, diferentemente de redes WiFi, há disponibilidade de valores de RTT, pode ser utilizada uma terceira entrada por célula: o valor de RTT normalizado, como mostra a Fig. 10 [50]. Os valores de RSS e RTT são normalizados dentro de uma faixa que depende da função de transferência utilizada nos neurônios.

Apenas uma camada escondida com M neurônios é utilizada. Isto está de acordo com o *teorema da aproximação universal*, que afirma que uma única camada escondida, se corretamente dimensionada, é suficiente para aproximar a maioria das funções não-lineares [51].

Há dois neurônios na camada de saída, já que apenas a localização no plano está sendo considerada. As coordenadas estimadas do MS, fornecidas pela ANN, são normalizadas dentro de uma faixa que depende da função utilizada nos neurônios das camadas escondida e de saída.

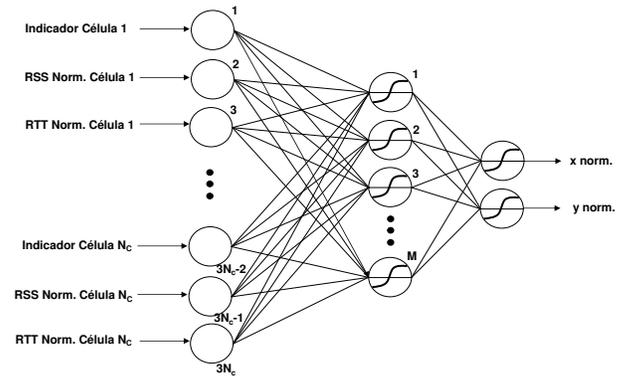


Fig. 10. Representação da Topologia da ANN com Três Entradas por Célula.

Uma topologia alternativa, mais adequada para situações onde apenas um valor de RTT está disponível por assinatura de RF, como em redes GSM, pode ser empregada: duas entradas por célula, como na topologia proposta em [44], e uma entrada adicional para o valor de RTT normalizado. Esta ANN teria $2N_c + 1$ entradas, onde N_c é o número de células na área de serviço [50].

As conexões entre neurônios são chamadas de sinapses e cada uma delas tem um peso numérico. Cada neurônio tem uma entrada adicional denominada *bias* ou polarização, que é um valor numérico que modifica a função de transferência. Os pesos e *biases* são ajustados durante a fase de treinamento. Usualmente, os pesos e *biases* iniciais são aleatoriamente selecionados [48].

Durante o treinamento supervisionado [48], todas as assinaturas de referência armazenadas no CDB são fornecidas à ANN. Para cada entrada $\mathbf{S}'_{i,j}$, a ANN fornece uma saída (\hat{x}_j, \hat{y}_i) , que é comparada à saída alvo (x_j, y_i) . Os pesos e *biases* da rede são iterativamente ajustados de forma a minimizar o MSE entre as saídas fornecidas pela ANN e as saídas alvo. O treinamento termina quando um número máximo de ciclos ou épocas é atingido, ou quando um valor alvo de MSE é alcançado. Após o treinamento supervisionado, a ANN está pronta para receber assinaturas de RF alvo como entradas, fornecendo na saída a localização estimada do MS.

3) *Coefficiente de Correlação de Spearman*: Diferenças nos processos de fabricação de MS's podem afetar a maneira como eles medem valores de RSS. Em consequência disso, em uma mesma posição e no mesmo instante, diferentes MS's podem informar valores de RSS distintos referentes ao sinal recebido de uma mesma célula. Se o CDB é construído a partir de medidas de campo com um certo MS, e outro MS deve ser localizado, tem-se uma condição de operação *cross-device* [22]. A acurácia da localização de um método DCM utilizando esse CDB irá piorar nessa condição. Isso é ainda

mais perceptível quando os MS's são de diferentes modelos ou fornecidos por diferentes fabricantes.

Para minimizar a degradação da acurácia de localização em condições *cross-device*, pode-se utilizar os valores relativos de RSS, i.e., sua ordenação, ao invés do valores absolutos. A ordenação dos valores de RSS de diferentes células é mais robusta às condições *cross-device*, o que significa que, enquanto os valores absolutos de RSS de um conjunto de células podem ser bastante diferentes quando medidos por MS's distintos, a sua ordenação tem maior probabilidade de permanecer a mesma, ou pelo menos, bastante semelhante. Essa observação baseia-se na suposição de que, para uma dada célula, a relação entre a intensidade do sinal captado pelo MS e o valor de RSS informado pelo MS é uma função monotonicamente crescente [52]. Por exemplo, considere dois MS's, MS₁ e MS₂, ambos na mesma posição, e duas BTS, BTS_A e BTS_B. Os sinais dessas BTS chegam a ambos os MS's com intensidades s_A e s_B . Os valores de RSS informados pelo MS₁ são RSS_{1A} e RSS_{1B}. Os valores de RSS informados pelo MS₂ são RSS_{2A} e RSS_{2B}. Se a relação entre a intensidade do sinal captado e o valor informado de RSS é uma função monotonicamente crescente, então, se $s_A > s_B$, RSS_{1A} > RSS_{1B} e RSS_{2A} > RSS_{2B}. Note que, embora os pares de valores (RSS_{1A}, RSS_{1B}) e (RSS_{2A}, RSS_{2B}) possam ser diferentes, se as células detectadas pelos dois MS's forem listadas em ordem decrescente de RSS, obtém-se a mesma sequência: (BTS_A, BTS_B).

A similaridade entre diferentes sequências ou permutações de um mesmo conjunto de células, ordenadas em função de seus respectivos valores de RSS, pode ser numericamente avaliada através do coeficiente de correlação de Spearman [45]. Esse coeficiente pode ser utilizado para calcular a correlação entre a assinatura de RF alvo \mathbf{F} e uma assinatura de RF de referência $\mathbf{S}_{i,j}$. Porém, essas assinaturas não têm necessariamente as mesmas células ou a mesma quantidade de células. Portanto, antes de aplicar o coeficiente de correlação de Spearman, algum processamento é requerido. Por isso, duas matrizes $N_c \times 2$ - \mathbf{V}_F e \mathbf{V}_S - são utilizadas, com valores iniciais definidos por:

$$\mathbf{V}_F(n, 1 : 2) = \mathbf{V}_S(n, 1 : 2) = [\text{CI}_n \ N_c] \quad (26)$$

onde $n = 1, 2, \dots, N_c$. O parâmetro N_c é a quantidade de células na área de serviço e CI_n é o CI da n -ésima célula na área de serviço.

Como as linhas de \mathbf{F} são classificadas em ordem decrescente de RSS, a posição de cada célula na sequência ordenada pelos valores de RSS é o próprio índice da linha correspondente em \mathbf{F} . Esse índice deve ser inserido na segunda coluna da linha correspondente em \mathbf{V}_F , conforme definido por:

$$\mathbf{V}_F(n_k, 2) = k \quad (27)$$

onde

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_F(n_k, 1) &= \mathbf{F}(k, 1) \\ n_k &\in [1, N_c] \\ k &= 1, 2, \dots, N_c \end{aligned} \quad (28)$$

O mesmo procedimento deve ser seguido para $\mathbf{S}'_{i,j}$ e \mathbf{V}_S , conforme definido por:

$$\mathbf{V}_S(n_k, 2) = k \quad (29)$$

onde

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_S(n_k, 1) &= \mathbf{S}_{i,j}(k, 1) \\ n_k &\in [1, N_c] \\ k &= 1, 2, \dots, N_{i,j} \end{aligned} \quad (30)$$

O coeficiente de correlação de Spearman, calculado entre a assinatura alvo e a assinatura de referência no *pixel* (i, j) , é dado por:

$$\rho_{i,j} = \frac{\sum_{n=1}^{N_c} \{[(\mathbf{V}_F(n, 2) - \bar{R}_F)(\mathbf{V}_S(n, 2) - \bar{R}_S)]\}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N_c} \{(\mathbf{V}_F(n, 2) - \bar{R}_F)^2\} \sum_{n=1}^{N_c} \{(\mathbf{V}_S(n, 2) - \bar{R}_S)^2\}}} \quad (31)$$

onde

$$\begin{aligned} \bar{R}_F &= \frac{1}{N_c} \sum_{n=1}^{N_c} \{\mathbf{V}_F(n, 2)\} \\ \bar{R}_S &= \frac{1}{N_c} \sum_{n=1}^{N_c} \{\mathbf{V}_S(n, 2)\} \end{aligned} \quad (32)$$

A distância de Spearman pode ser definida como [45]:

$$d_{i,j} = 1 - \rho_{i,j} \quad (33)$$

III. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Nesta seção são mostrados resultados experimentais obtidos em uma rede GSM 850 MHz em área urbana densa no Centro da cidade do Rio de Janeiro. A avaliação concentra-se em dois pontos: o efeito da utilização de diferentes tipos de CDB (medido, predito e misto) e da filtragem de média móvel na precisão de localização de métodos DCM apresentados neste tutorial. Uma análise mais extensa sobre este teste pode ser encontrada em [23], [25], [36] e [50].

A. Configuração do Método DCM Avaliado

O método DCM avaliado nesta seção tem a seguinte configuração:

- Assinatura de RF: dada pela equação (1), com apenas um valor de RTT;
- Técnica de Redução do Espaço de Busca: Filtragem Determinística;
- Tipo de CDB: medido, predito, calibrado e misto (ver Seção III-D);
- Função de Correlação: Distância Euclidiana no Espaço N -Dimensional de RSS, dada pela equação (21), com $N = 5$, $K = 2$ e $\delta = 6$ dB [27];
- Filtragem: Filtro de Média Móvel com comprimento 20, conforme descrito na Seção III-C.

B. Campanha de Coleta de Assinaturas de RF

O conjunto de teste foi constituído de um telefone GSM legado modelo SAGEM OT298 e um receptor GPS modelo GARMIN, ambos conectados a um *laptop* no interior de um veículo, em cujo topo foi instalada a antena receptora GPS. Foi originada uma chamada e o MS foi mantido em modo dedicado durante a coleta. Todas as mensagens trocadas entre o MS e a BTS servidora foram capturadas pelo *software* TEMS *Investigation* da *Ericsson* e armazenadas para posterior

TABELA II
ROTAS DE COLETA DE ASSINATURAS DE RF.

Parâmetro	Rota 1	Rota 2	Rota 3
Qtd. Assinaturas	4501	1929	8000
Área (km ²)	4,84	-	-
Qtd. Setores Detectados	114	60	114
Densidade de Setores (set./km ²)	23,5	-	-

processamento. As características das rotas de coleta são resumidas na Tab. II [25].

A densidade de setores na Tab. II é calculada assumindo uma distribuição uniforme das células na região de teste, sendo dada pela razão entre o número de setores e a área da superfície coberta pela rota de teste. A Rota 1 é utilizada para coletar assinaturas alvo e testar a precisão de localização. A Rota 2 é parte do trajeto da Rota 1 e é utilizada apenas para calibração de modelos de propagação empíricos, conforme descrito na Seção II-B.2. A Rota 3 segue o trajeto da Rota 1 e é empregada para a construção do CDB baseado em medidas.

Cada assinatura de RF medida é composta pelo código da área de localização (LAC - *Location Area Code*), pelo valor de alinhamento temporal (TA - *Timing Advance*) e pelos valores de RSS das células listadas no NMR. O parâmetro TA corresponde ao RTT em redes GSM. O MS em modo ativo envia um NMR para o setor servidor a cada 480 ms. O NMR contém a identidade e os valores de RSS do setor servidor e de até 6 setores vizinhos. O RSS informado no NMR é quantizado com passo de 1 dB, variando de -110 dBm a -48 dBm [27].

C. Filtragem de Média Móvel

Para um dado MS, há uma forte correlação entre suas localizações nos instantes t_k e $t_k + \Delta t$, desde que o produto da velocidade v do MS e do intervalo de tempo Δt seja pequeno [53]. O filtro de média móvel atua como um filtro passa-baixa, suavizando desvios entre estimativas de localização adjacentes ao longo de uma rota de teste. Utilizando um filtro de comprimento L , as coordenadas estimadas $[\hat{x}_k \ \hat{y}_k]^T$ do MS no instante t_k são dadas pela média aritmética das coordenadas da estimativa atual e das $L - 1$ anteriores, ou seja:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_k \\ \hat{y}_k \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \sum_{u=0}^{L-1} \begin{bmatrix} \hat{x}_{k-u} \\ \hat{y}_{k-u} \end{bmatrix} \quad (34)$$

O valor ótimo de L depende do produto $v \cdot \Delta t$ e das variações de direção e velocidade do MS [53]. Verificou-se experimentalmente que o valor ótimo para a Rota 1 é $L = 20$ [23].

D. Tipos de CDB Testados

Os quatro tipos de CDB apresentados neste tutorial foram testados: medido, predito, calibrado e misto. Com exceção do *CDB medido* obtido a partir das assinaturas de RF coletadas na Rota 3 - que é estruturado como uma lista indexada - os CDBs utilizados no teste são internamente organizados como grades uniformes com resolução planar $r' = 10$ metros.

O *CDB predito* foi obtido a partir dos mapas de RSS predito das células da área de teste. Estes mapas foram gerados com resolução planar $r' = 10$ metros, sobre um DEM com resolução planar $r = 5$ metros, e utilizando o modelo de Okumura-Hata. Os valores dos coeficientes do modelo estão listados na Tab. I. A perda adicional por difração sobre obstáculos do terreno - relevo ou edifícios - foi calculada pelo modelo de Epstein-Peterson [32].

O *CDB calibrado* foi gerado após a correção dos mapas de RSS predito, com a aplicação dos coeficientes de calibração aos modelos de propagação de cada célula. A Rota 2 foi utilizada para realizar a calibração dos modelos de propagação empíricos, de acordo com o procedimento descrito na Seção II-B.2.

O *CDB misto* foi gerado a partir do CDB predito e das medidas coletadas por receptores de referência fixos espalhados pela área de teste [29]. Nos *pixels* do CDB onde há pontos de medição, as assinaturas de referência medidas substituem as assinaturas de referência previstas. Para suavizar descontinuidades entre valores previstos e medidos de RSS, utiliza-se interpolação linear entre os valores medidos e previstos nos *pixels* em torno dos pontos de medição [38].

E. Precisão em Função do Tipo de CDB

A Fig. 11 mostra, para cada tipo de CDB utilizado, a função de distribuição cumulativa (CDF - *Cumulative Distribution Function*) do erro de localização. Conforme esperado, a utilização do CDB medido resulta na melhor precisão, seguido pelo CDB misto. A utilização do CDB calibrado aumenta a precisão em relação ao uso do CDB predito, reduzindo o erro mediano de 98 metros para 78 metros.

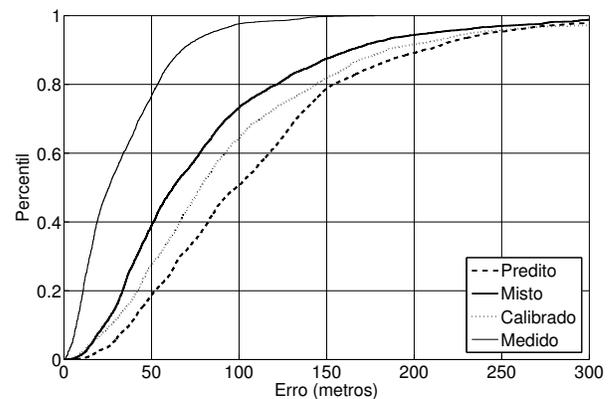


Fig. 11. CDF do Erro de Localização.

A Tab. III mostra os erros de localização obtidos pelo método DCM para os percentis 67% e 95%. Os erros de localização máximos admissíveis pela norma FCC E911 para estes mesmos percentis são 100 metros e 300 metros [2]. Observa-se que o limite para o percentil 95% é atendido em todos os casos. Com os CDB's medido e misto, o limite para o percentil 67% também é atendido. Com o CDB calibrado, o erro para o percentil 67% fica bem próximo do limite E911 para este percentil.

TABELA III
ERROS DE LOCALIZAÇÃO PARA OS PERCENTIS 67% E 95%.

Tipo CDB	67%	95%
Medido	40	83
Misto	87	209
Calibrado	104	233
Predito	128	243

IV. CONCLUSÃO

Este tutorial apresentou em detalhes os métodos de localização utilizando correlação de assinaturas de RF, ou métodos DCM. Por serem baseados na rede e apresentarem elevada disponibilidade, os métodos DCM são alternativas viáveis para a localização de chamadas de emergência em redes de telefonia móvel celular, podendo localizar MS's legados de segunda geração, que constituem a maioria absoluta dos terminais celulares em uso no Brasil atualmente. A avaliação da precisão através de testes em uma rede GSM em área urbana indicou que os métodos DCM podem alcançar os requisitos de precisão especificados pelo FCC para o serviço E911.

REFERÊNCIAS

- [1] *Location Services (LCS); Service description; Stage 1*, ETSI Standard TS 22071 v9.0.0 (2009-12), 2009.
- [2] FCC, "Guidelines for Testing and Verifying the Accuracy of Wireless E911 Location Systems", *OET BULLETIN No.71*, 2000.
- [3] European Commission, "Commission Recommendation 2003/558/EC", *Official Journal of the European Union*, 2003.
- [4] J. M. Zagami et al., "Providing Universal Location Services Using a Wireless E911 Location Network", *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, no. 4, Abril 1998, pp. 66-71.
- [5] M. I. Silventoinen e T. Rantalainen, "Mobile Station Emergency Locating in GSM", in *Proc. of IEEE International Conference on Personal Wireless Communications*, New Delhi, Fevereiro 1996.
- [6] TIM (2010, Março). *TIM Casa* [Online]. Disponível: <http://www.guiadeviagem.locaweb.com.br/tim.casa>.
- [7] AT&T (2010, Março). *TeleNav Track* [Online]. Disponível: <http://www.wireless.att.com/businesscenter/solutions/industry-solutions/vertical-industry/telenav-track.jsp>.
- [8] *People Tracking - A potential breakthrough LBS application*, Northstream Technical Report, 2005.
- [9] Child Locate (2010, Março). *Child Locate* [Online]. Disponível: <http://www.childlocate.co.uk>.
- [10] TomTom (2010, Março). *TomTom Points of Interest* [Online]. Disponível: <http://www.tomtom.com/services>.
- [11] NTT DoComo (2010, Março). *Imadoco Kantan Search* [Online]. Disponível: http://www.nttdocomo.co.jp/english/service/information/imadoco_kantan.
- [12] P. Fournogerakis et al., "Enhanced Handover Performance in Cellular Systems based on Position Location of Mobile Terminals", in *Proc. of IST Mobile Summit*, Barcelona, Setembro 2001.
- [13] *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Location Services (LCS); Functional description; Stage 2*, ETSI Technical Specification 101724 v8.9.0 (2004-06), 2004.
- [14] *UE positioning enhancements*, ETSI Technical Report 25847 v4.0.0 (2001-03), 2001.
- [15] M. A. Spirito e A. G. Mattioli, "Preliminary Experimental Results of a GSM Mobile Phones Positioning System based on Timing Advance", in *Proc. of IEEE 50th Vehicular Technology Conference*, Amsterdam, Setembro 1999.
- [16] INFO Online (2010, Março). *Celulares chegam a 4 bilhões no mundo* [Online]. Disponível: <http://info.abril.com.br/aberto/infonews/012009/06012009-23.shl>.
- [17] TI Inside Online (2010, Março). *Nokia dá passo para popularizar GPS no celular* [Online]. Disponível: <http://www.tiinside.com.br/21/01/2010/nokia-da-passo-para-popularizar-gps-no-celular/ti/163446/news.aspx>.
- [18] ANATEL (2009, Dezembro). *Estatísticas de Celulares no Brasil* [Online]. Disponível: <http://www.teleco.com.br/ncel.aps>.
- [19] H. Liu et al., "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part C: Applications and Reviews*, vol. 37, no. 6, Novembro 2007, pp. 1067-1080.
- [20] H. Laitinen et al., "Database Correlation Method for GSM Location", in *Proc. of IEEE 53rd Vehicular Technology Conference*, Rhodes, Maio 2001.
- [21] D. Zimmermann et al., "Database Correlation for Positioning of Mobile Terminals in Cellular Networks using Wave Propagation Models", in *Proc. of IEEE 60th Vehicular Technology Conference*, Los Angeles, Setembro 2004.
- [22] M. Chen et al., "Practical Metropolitan-Scale Positioning for GSM Phones", in *Proc. of 8th International Conference on Ubiquitous Computing*, Newport Beach, Setembro 2006.
- [23] R. S. Campos e L. Lovisolo, "A Fast Database Correlation Algorithm for Localization of Wireless Network Mobile Nodes using Coverage Prediction and Round Trip Delay", in *Proc. of IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, Barcelona, Abril 2009.
- [24] S. Ahonen e H. Laitinen, "Database correlation method for UMTS location", in *Proc. of IEEE 57th Vehicular Technology Conference*, Jeju, Abril 2003.
- [25] R. S. Campos e L. Lovisolo, "Location Methods for Legacy GSM Handsets using Coverage Prediction", in *Proc. of IEEE 9th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, Recife, Julho 2008.
- [26] G. Manara et al., "Location, Location, Location - Use of Deterministic Propagation Models for Testing Wireless Networks Location Techniques", *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 3, no. 2, Junho 2008, pp. 20-29.
- [27] *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio subsystem link control*, ETSI Technical Specification 100911 v6.2.0 (1998-07), 1998.
- [28] S. Gezici, "A Survey on Wireless Position Estimation", *Wireless Personal Communications: An International Journal*, vol. 44, no. 3, Fevereiro 2008, pp. 263-282.
- [29] M. Al Hallak et al., "Mobile Positioning Technique using Signal Strength Measurement method with the aid of Passive Mobile Listener Grid", in *Proc. of 2nd International Conference on Information and Communication Technologies: from Theory to Applications*, Damascus, Abril 2006.
- [30] E. Aarnæs e S. Holm, "Tuning of Empirical Radio Propagation Models Effect of Location Accuracy", *Wireless Personal Communications*, vol. 4, no. 2-4, Dezembro 2004, pp. 267-281.
- [31] G. Wölfle et al., "Enhanced Localization Technique within Urban and Indoor Environments based on Accurate and Fast Propagation Models", in *Proc. of European Wireless*, Fevereiro 2002.
- [32] M. D. Yacoub, *Foundations of Mobile Radio Engineering*, CRC Press, 1993.
- [33] M. Hata, "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 29, no. 3, Setembro 1980.
- [34] *Digital Topographical Database for Propagation Studies*, ITU-R Recommendation P.1058-1, 1997.
- [35] A. Libault, "Geocartografia", Editora da Universidade de São Paulo, 1975.
- [36] R. S. Campos e L. Lovisolo, "Análise Empírica de Métodos de Localização de Terminais GSM Legados utilizando Predição de Cobertura e Alinhamento Temporal", *Anais do XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Rio de Janeiro, Setembro 2008.
- [37] *PLANET Technical Reference Guide Version DMS 2.0*, MSI Technical Report, 1999.
- [38] J. Zhu e G. D. Durgin, "Indoor/Outdoor Location of Cellular Handsets Based on Received Signal Strength", *Electronic Letters*, vol. 41, no. 1, Janeiro 2005, pp 24-26.
- [39] M. J. Magro e C. J. Debono, "A Genetic Algorithm Approach to User Location Estimation in UMTS Networks", in *Proc. of EUROCON - The International Conference on Computer as a Tool*, Warsaw, Setembro 2007.
- [40] R. S. Campos e L. Lovisolo, "Mobile Station Location using Genetic Algorithm Optimized Radio Frequency Fingerprinting", in *Proc. of IEEE 2010 International Telecommunications Symposium*, Manaus, Setembro 2010.
- [41] P. M. Pardalos et al., "Parallel Search for Combinatorial Optimization: Genetic Algorithms, Simulated Annealing, Tabu Search and GRASP", in *Proc. of the 2nd International Workshop on Parallel Algorithms for Irregularly Structured Problems*, Lyon, Setembro 1995.
- [42] D. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.

- [43] C. Houck et al., "A Genetic Algorithm for Function Optimization: A Matlab Implementation", Technical Report NCSU-IE TR 95-09, 1995.
- [44] M. A. Spirito et al., "WLAN-Based Real Time Vehicle Locating System", in *Proc. of IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, Barcelona, Abril 2009.
- [45] The MathWorks, Inc. (2010, Março). *Pairwise distance between pairs of objects* [Online]. Disponível: <http://www.mathworks.de/access/helpdesk/help/toolbox/stats/pdist.html>.
- [46] T. Seidl e H.-P. Kriegel, "Optimal Multi-Step K-Nearest Neighbor Search", in *Proc. of the 1998 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, Seattle, Junho 1998.
- [47] P. Bahl e V. N. Padmanabhan, "RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System", in *Proc. of 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Tel Aviv, Março 2000.
- [48] S. Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Prentice Hall PTR, 1994.
- [49] C. Takenga et al., "A Hybrid Neural Network-Data Base Correlation Positioning in GSM Network", in *Proc. of IEEE 10th International Conference on Communication Systems*, Singapore, Outubro 2006.
- [50] R. S. Campos, "Localização de Terminais Móveis utilizando Correlação de Assinaturas de Rádio-Frequência", Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Julho 2010.
- [51] K. Hornik, "Approximation Capabilities of Multilayer Feedforward Networks", *Neural Networks Archive*, vol. 4, no. 2, pp. 251-257, 1991.
- [52] J. Krumm et al., "RightSPOT: A Novel Sense of Location for a Smart Personal Object", in *Proc. of UbiComp 2003*, Seattle, Outubro 2003.
- [53] X. Shen et al., "Mobile Location Estimation in CDMA Cellular Networks by Using Fuzzy Logic", in *Proc. of IEEE 52nd Vehicular Technology Conference*, Boston, Setembro 2000.



Rafael Saraiva Campos nasceu em Niterói, RJ, em Maio de 1975. É graduado em Engenharia de Telecomunicações pela UFF (2000), especialista em Sistema de Telecomunicações pela UFRJ (2006) e Mestre em Engenharia Eletrônica pela UERJ (2010). Entre 2000 e 2008, atuou como engenheiro de planejamento de rádio-frequência em redes de telefonia móvel celular na VIVO. Desde 2010 é professor do curso de Telecomunicações do CEFET-RJ em Nova Iguaçu. Áreas de Interesse: redes celulares, rádio-localização e sistemas de inteligência artificial.



Lisandro Lovisolo nasceu em 1974. Concluiu o doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2006. Atualmente é Professor do Departamento de Eletrônica e Telecomunicações da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Além disso participa do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica dessa instituição. Fundou o PROSAICO (Laboratório de PROCESSAMENTO de Sinais, Aplicações Inteligentes e COmunicações). Áreas de interesse: processamento de sinais e comunicações.