

1 Introdução

1.1 Radiolocalização: Histórico e Motivações

Embora os primeiros estudos sobre a localização de terminais móveis tenham sido realizados na década de 70 [1][2], foi a partir de 1996 que este assunto passou a despertar grande interesse por parte da indústria e comunidade acadêmica. Naquele ano a FCC (*Federal Communications Commission*), comissão responsável pela regulamentação das telecomunicações nos Estados Unidos, publicou uma série de regras relativas à localização de usuários de serviços de emergência em terminais de comunicação móvel [3]. Prevista para entrar em vigor a partir de outubro de 2001, a regulamentação exigia que qualquer operadora de sistemas celulares, móvel pessoal, ou sistemas sem-fio especializados nos Estados Unidos, fosse capaz de localizar o usuário e prover esta informação para os serviços de emergência 911. A regulamentação *E911* (*Wireless Enhanced 911*), como foi chamada, passou a exigir um esforço conjunto de agências de segurança pública, operadoras, empresas de tecnologia e fabricantes de equipamentos para comunicações sem-fio.

A adoção do *E911* justificava-se na época pelo fato de que um número considerável de chamadas de emergência eram originadas de terminais móveis (aproximadamente 40 % das chamadas de emergência nos Estados Unidos [4], resultando em um total de dois milhões de chamadas em 1996). A informação de posição para as chamadas de emergência sem-fio permitiria rápida resposta em situações nas quais os usuários dos terminais poderiam estar desorientados ou incapacitados de falar ao telefone.

Originalmente a FCC determinou que a localização deveria ser viabilizada por tecnologias baseadas somente na rede (*network-based*), não exigindo modificação de *hardware* ou *software* dos terminais já em uso. Além disso, para a implementação do programa, foram previstas as seguintes fases progressivas de cobertura e precisão da informação:

– Fase I

As operadoras deveriam reportar a posição e o número do telefone (possibilitando o retorno da ligação em caso de queda da comunicação) com uma precisão da ordem da dimensão de uma célula. O prazo estabelecido para cumprir esta fase seria de 18 meses a partir de 1º de outubro de 1996, ou seja, 1º de abril de 1998.

– Fase II

Cinco anos após 01/10/1996, as operadoras deveriam ser capazes de informar a posição do usuário com uma precisão de 125 m em, no mínimo, 67 % do tempo.

Os requisitos relativos à fase II foram estabelecidos após consenso entre a CTIA (*Cellular Telephone Industries Association*) e os principais desenvolvedores de tecnologia na área de telefonia móvel e localização, refletindo uma estimativa de como estaria o “estado da arte” no ano de 2001. Contudo as regras da FCC foram sendo revisadas com o passar dos anos. A principal mudança diz respeito à inclusão de tecnologias que necessitam modificação dos atuais terminais (*handset-based*).

Atualmente, as exigências para a fase II do *E911* são, em resumo, as seguintes [3]:

– Tecnologias baseadas no terminal (*handset-based*)

- Início da venda e ativação de terminais capazes de serem localizados até 1º de outubro de 2001.
- Até 31 de dezembro de 2002, 100 % dos terminais novos ativados deveriam ser capazes de serem localizados.
- O sistema deve alcançar, até 31 de dezembro de 2005, um grau de penetração de 95 % entre os assinantes de terminais capazes de serem localizados.
- A precisão deve ser de 50 m para 67 % das chamadas e 150 m para 95 % das chamadas.

– Tecnologias baseadas na rede (*network-based*)

- Até 1º de outubro de 2001, ou até 6 meses da solicitação de informação de localização pelo PSAP (*Public Safety Answering Point*)¹, as operadoras deveriam disponibilizar o serviço para 50 % da área de cobertura ou população. Após 18 meses da solicitação do PSAP, 100 % da área de cobertura ou população deve ser atingida.

¹Centrais de Emergência 911 nos Estados Unidos

- A precisão deve ser de 100 m para 67 % das chamadas e 300 m para 95 % das chamadas.

A partir da publicação do *E911*, as pesquisas para o desenvolvimento de tecnologias de radiolocalização se intensificaram de maneira significativa. Pequenas, médias e grandes empresas de comunicações passaram a disputar as melhores soluções para a implementação nos sistemas de 2^a e 3^a gerações. No ambiente acadêmico começaram a surgir várias publicações sobre o tema e a criação de congressos específicos para a discussão das alternativas.

No entanto, se em um primeiro momento a necessidade de se cumprir a determinação da FCC foi o principal incentivo para a pesquisa nesta área, hoje em dia percebe-se que a informação de posição de cada usuário do sistema pode trazer grandes vantagens comerciais e agregar novas possibilidades de uso ao ambiente de comunicações móveis. A aplicação desta tecnologia tem grande potencial nas mais diversas atividades, como por exemplo: na segurança pública, turismo, entretenimento e comércio. Além disso, os benefícios são visualizados também em tarefas de gerência e controle da rede celular. A seguir é apresentada uma lista de algumas das principais aplicações consideradas para esta tecnologia:

- *Tarifação em função da posição*

Diferentes tarifas poderiam ser empregadas conforme o local de uso do terminal. Isto permitiria às operadoras oferecer novos planos de tarifação, tornando o serviço mais atrativo para clientes com um determinado perfil.

- *Controle de frota*

Empresas e órgãos públicos disporiam de meios para o controle e coordenação de suas frotas de veículos dentro de regiões de cobertura do sistema de comunicações.

- *Segurança Pública*

As vantagens nesta área são amplas. Para citar algumas: pessoas sob seqüestro podem ter seu trajeto rastreado até a localização de seu cativo, criminosos que fazem uso de terminais móveis poderiam ter sua localização conhecida com precisão, e a possibilidade de uma coordenação mais eficiente da frota de viaturas policiais para um pronto emprego.

- *Páginas amarelas móvel*

Usuários com um determinado perfil de consumo poderiam ser alertados pelo terminal da proximidade de um supermercado, pizzaria, etc,

podendo receber inclusive informações sobre as promoções do estabelecimento.

– *Gerenciamento e Planejamento da rede*

Várias tarefas de gerenciamento e planejamento da rede celular têm sido estudadas considerando-se o uso da informação de posição do usuário. As principais aplicações neste sentido são o *planejamento*, *handover* e *gerenciamento de mobilidade auxiliados por localização* (do inglês: *location-aided planning* (LAP), *handover* (LAH) e *mobility management* (LAM))[5]. Estas técnicas vão permitir, dentre outros benefícios, que o gerenciamento da rede se adapte temporal e espacialmente à demanda de tráfego, aumentando significativamente a capacidade do sistema.

1.2

Fontes de erro em um sistema de localização

Há vários problemas de engenharia que devem ser solucionados, ou ao menos minimizados, para implementar uma técnica eficiente de radiolocalização em sistemas de comunicações móveis. A seguir é feita uma breve descrição dos principais problemas encontrados, e em que aspecto do desempenho da localização eles têm influência.

1.2.1

Ruído de Medida

Qualquer que seja o parâmetro do sinal medido pela base ou terminal para efetuar a localização deste último, tipicamente admite-se que, a esta medida, está adicionado um fator aleatório, normalmente de média nula, denominado de “ruído de medida”.

Este ruído, na maior parte dos modelos, engloba diversas fontes de imprecisão para a estimativa de posição, sendo as principais mostradas a seguir:

– *Multipercurso*

Em sistemas baseados na medida de tempo de chegada do sinal, a ocorrência de multipercursos provoca erros na estimativa do tempo [6], pois há um espalhamento da potência do sinal recebido, o que dificulta a identificação do exato instante de tempo em que o sinal propagado através do percurso mais curto chegou ao receptor.

– *Ruído de Discretização*

A discretização no tempo do sinal enviado na interface rádio faz com que as medidas de tempo de chegada do sinal fiquem restritas a múltiplos de um período básico (período de sinalização do sistema). A diferença entre o valor real e discretizado é chamado de ruído de discretização, de caráter aleatório, com variância diretamente proporcional ao período de sinalização. Na tecnologia GSM (*Global System for Mobile Communications*), por exemplo, o intervalo entre bits é de $T = 3,69 \mu s$, o que proporciona uma resolução na medida de distância de $c \times T = 1100 m$, onde c é a velocidade da luz. Esta resolução é obviamente muito baixa para qualquer aplicação, forçando o uso de *sobreamostragem* do sinal recebido. Para tecnologias em que o sinal ocupa uma largura de faixa maior, como é o caso do IS-95 e UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), este problema é minimizado. No caso do UMTS, que ocupa uma banda de 3,84 MHz, a incerteza devida à quantização cai para 78 m.

– *Calibração de hardware*

Erros desta natureza podem surgir devido a erros de calibração de matrizes de antenas, ou devido à imprecisão ou ausência de sincronismo de relógios que atuam como base de tempo e frequência em sistemas de localização [7].

As matrizes de antenas, que são normalmente utilizadas para medidas de ângulo, têm respostas que podem variar com o tempo devido a alterações de posição, temperatura, ou ainda devido aos ambientes que as circundam. A disposição física dos elementos de antena pode estar modificada em relação à última calibração, produzindo erros significativos de medida de ângulo.

Para métodos baseados na medida de tempo de propagação do sinal, erros de sincronismo entre bases, ou entre bases e terminal, causam grandes erros na obtenção da posição. O sistema de posicionamento global (GPS) e meios auxiliares, tais como as Unidades de Medida de Localização (LMU) [8], podem ser extremamente úteis para minimizar erros deste tipo.

1.2.2

Audibilidade

Nas tecnologias de localização que utilizam medidas realizadas na interface rádio, é necessário que o terminal consiga estabelecer simultanea-

mente enlaces (diretos e/ou reversos) com mais de uma estação base. Em princípio, para cada enlace, é possível obter uma medida para a estimativa de posição. Em métodos baseados na medida de tempo de propagação do sinal, por exemplo, são necessários no mínimo três bases em contato com o móvel. Com um número maior de medidas disponível, maior é a precisão na determinação da posição do móvel [9]. Na literatura, a esta capacidade de o terminal estabelecer enlaces com mais de uma base simultaneamente se dá o nome de audibilidade ².

Nos sistemas em que os canais alocados são diferenciados por códigos ortogonais, como o CDMA e WCDMA, este problema é mais sentido devido ao rígido controle de potência empregado para combater o efeito “perto-longo” [10]. Se por um lado este controle evita que a interferência co-canal prejudique a comunicação base-terminal, por outro ele dificulta a comunicação entre o terminal e outras bases, além da base de serviço. Este problema é seriamente considerado pelas operadoras para a implementação dos sistemas de localização [11][12].

1.2.3

Distribuição Geométrica das bases

A precisão de sistemas de localização baseados em medidas de distância depende em larga escala das posições relativas entre bases e terminal. Em outras palavras, erros nas medidas de distância podem ter grande reflexo na precisão da estimativa de posição, se o arranjo geométrico de bases e terminal não for apropriado. O parâmetro GDOP (*Geometric Dilution of Precision*) [13] quantifica a precisão da estimativa sob este aspecto.

É recomendável que os roteiros prováveis de deslocamento dos usuários do sistema, relativos às posições das bases, resultem em estimativas de posição com baixo GDOP. Para isto, o critério de GDOP deve ser levado em conta no planejamento do sistema de localização.

1.2.4

Ausência de Linha de Visada (“NLOS”)

A principal e talvez mais conhecida conseqüência da propagação multipercursos é o desvanecimento do sinal, cuja caracterização foi amplamente estudada na literatura e é amiúde considerada para o projeto de receptores de sistemas móveis. Por outro lado, quando a aplicação em questão é

²Tradução livre de *hearability*.

a radiolocalização de terminais, os vários caminhos percorridos pelo sinal tornam relevante um outro tipo de efeito, o chamado *erro de medida por NLOS*.

Conceitualmente é fácil compreender em que situação específica este erro ocorre: a energia do sinal que propaga-se na linha de visada é totalmente bloqueada por algum anteparo, e a medida de tempo (ou ângulo) de propagação do sinal é obtida pela parcela de energia que primeiro chega ao receptor, após sofrer uma ou mais reflexões e/ou difrações.

Encontra-se freqüentemente na literatura a afirmação de que o erro de medida por NLOS é o principal desafio para a implementação de um sistema de radiolocalização em ambientes urbanos [6][12][14][15][16][17]. De fato, em um trabalho experimental com medidas de *tempo de chegada* (do inglês: *Time of Arrival* (ToA)) , Silventoinen et al. [18] verificaram que a média e variância de tais medidas são significativamente alteradas no estado NLOS de propagação. Em métodos que se baseiam na informação de ângulo, embora não se verifique alteração da média das medidas sob o estado NLOS, a variância é aumentada, afetando também de forma determinante a precisão da estimativa da posição [19].

O erro por NLOS é de natureza aleatória e na literatura alguns trabalhos sobre radiolocalização procuram caracterizar estatisticamente este erro. Algumas das hipóteses admitidas são apresentadas na seção 2.5 desta tese.

1.3 Métodos de Radiolocalização

1.3.1 GPS

O Sistema de Posicionamento Global (GPS - *Global Positioning System*) possibilita, em princípio, a determinação da posição, velocidade e tempo em qualquer ponto do globo terrestre. Ele é composto por uma constelação de 24 satélites de baixa órbita (a 20.183,61 km da superfície da Terra), estações de monitoramento, que observam os sinais enviados dos satélites, e estações de controle, que transmitem dados para os satélites.

No caso específico da localização de terminais de comunicações móveis, projeta-se a utilização da tecnologia GPS como parte integrante de uma rede denominada *Assisted-GPS* (A-GPS). A idéia básica desta rede é possibilitar

a coleta das informações de posição disponibilizadas pelo GPS de forma mais rápida e precisa para o sistema de comunicações.

Os principais componentes da rede A-GPS são o terminal móvel com receptor GPS, um servidor A-GPS com receptor (referência) de GPS, que deve “enxergar” os mesmos satélites que o terminal, e a infra-estrutura da rede sem fio, i.e, estações rádio-base e MSC's (*Mobile Switching Center*), como mostra a Figura 1.1.

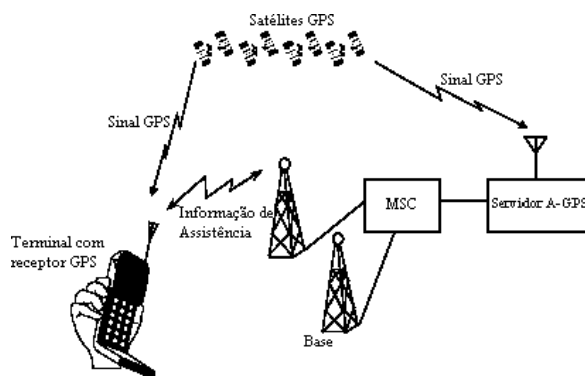


Figura 1.1: Sistema A-GPS.

Em relação ao sistema GPS original, as principais melhorias obtidas com o A-GPS são as seguintes: redução do tempo de aquisição dos sinais, melhoria da sensibilidade do sensor GPS (embutido no terminal) e redução do consumo de energia.

1.3.2 Medida de Potência

A proposta de rádio-localização de terminais sem-fio através da medida de potência do sinal recebido vem de longa data [20][21]. Com base na potência recebida é possível, em princípio, estimar a distância entre móvel (MS) e base (BS), determinando como lugar geométrico para o terminal um círculo com centro na base. Com 3 BS's envolvidas, no mínimo, a intersecção dos círculos resultantes determinam a posição do móvel.

A potência recebida pelo terminal (ou base) em função da posição \mathbf{z} do móvel pode ser expressa por

$$P(\mathbf{z}) = P_{tx} \cdot \rho \cdot A_{CE}(\mathbf{z}) \cdot A_{LE}(\mathbf{z}) \cdot d(\mathbf{z})^{-n} \tag{1-1}$$

onde P_{tx} é a potência transmitida, ρ é o fator que leva em conta as alturas das antenas, frequência de transmissão etc, $A_{CE}(\mathbf{z})$ e $A_{LP}(\mathbf{z})$ são devidos ao desvanecimento de curta e longa escala, respectivamente, e n é o coeficiente

de perda de propagação. O termo $d(\mathbf{z})$ representa a distância entre terminal e base e portanto o parâmetro que se deseja estimar.

A relação entre potência recebida e distância, dada por (1-1), envolve vários efeitos e portanto apresenta uma série de dificuldades para a obtenção da posição do móvel com a precisão requerida. Alguns trabalhos experimentais confirmam o mau desempenho deste método comparado às demais alternativas [22]. Por outro lado, o seu custo é baixo para implementação, uma vez que todos os padrões de 2^a e 3^a geração utilizam terminais que fazem medida de potência para o processo de *handoff*, controle de potência etc .

1.3.3 Ângulo de Chegada (AoA)

Os métodos de localização baseados no parâmetro *ângulo de chegada* (do inglês: *angle of arrival* (AoA)), também denominado de *direção de chegada* (*Direction of Arrival* (DoA)), estimam a posição do terminal móvel através da medição do ângulo de chegada do sinal. Cada medida produz uma linha reta como lugar geométrico da posição do móvel, como mostra a Figura 1.2. Portanto, incorporando-se a medida de 2 bases, no mínimo, é possível obter a estimativa da localização.

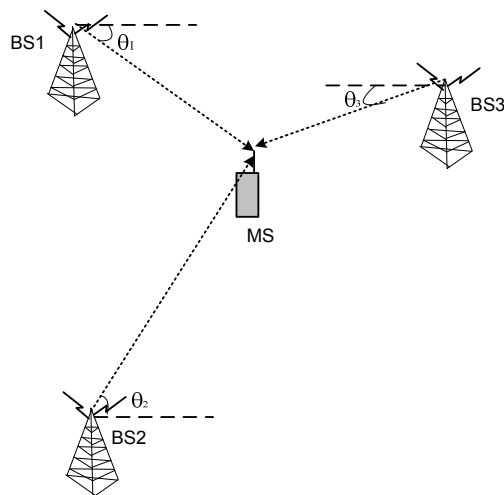


Figura 1.2: Determinação da posição através das medidas nas bases dos ângulos de chegada (AoA) do sinal emitido pelo terminal.

Os ângulos de chegada são normalmente estimados por meio de matrizes de antenas, compostas por diversos *elementos* de antenas. O sinal transmitido é detectado por estes elementos, produzindo diversas versões defasadas do sinal que são combinadas para determinar a direção de

chegada da irradiação. Estes elementos guardam entre si um espaçamento tipicamente menor que $1/2$ comprimento de onda da portadora do sinal recebido, para evitar medidas ambíguas de fase. Matrizes de antenas com grandes aberturas ou que usam técnicas de super-resolução são capazes de obter medidas com grande resolução angular [23].

1.3.4 Tempo de Chegada (ToA)

Na técnica de radiolocalização baseada no parâmetro ToA, a distância entre base e terminal é obtida determinando-se o tempo de propagação do sinal transmitido entre os dois pontos, e multiplicando-se o resultado pela velocidade da luz (c). Geometricamente, obtém-se um círculo como lugar geométrico para o terminal, com centro na base. Três ou mais medidas ToA's determinam a posição, conforme mostra a Figura 1.3.

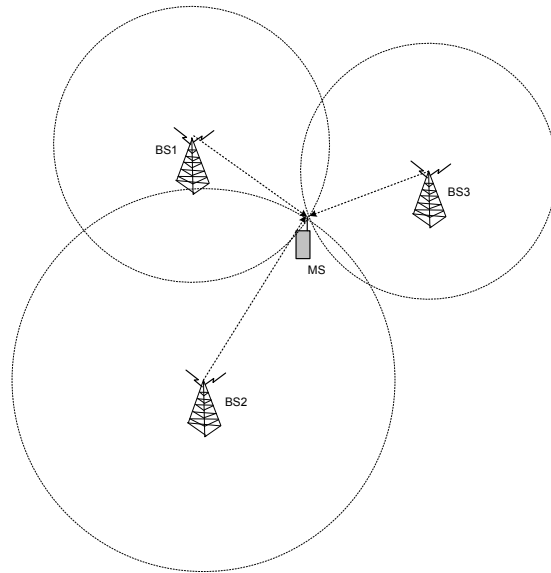


Figura 1.3: Intersecção dos círculos originados das medidas de ToA's.

Ou seja, admitindo-se que τ_m é o tempo de propagação do sinal em linha reta entre a m -ésima base e terminal, pode-se escrever

$$\tau_m = \frac{d_m}{c}, \quad (1-2)$$

onde d_m é a distância correspondente entre base e terminal, cuja relação com as coordenadas (x, y) do móvel é dada por:

$$d_m = \|\mathbf{z} - \mathbf{s}_m\| = \sqrt{(x - X_m)^2 + (y - Y_m)^2}. \quad (1-3)$$

Na expressão acima, $\mathbf{z} = [x, y]^T$ representa as coordenadas do móvel, o vetor $\mathbf{s}_m = [X_m, Y_m]^T$ contém as coordenadas da base e $\|\cdot\|$ representa a distância euclidiana. Com três medidas de ToA disponíveis, as coordenadas do terminal podem ser analiticamente determinadas por³

$$\begin{aligned} x &= \frac{(Y_2 - Y_1)C_3 - (Y_2 - Y_3)C_1}{2[(X_2 - X_3)(Y_2 - Y_1) - (X_2 - X_1)(Y_2 - Y_3)]} \\ y &= \frac{(X_2 - X_1)C_3 - (X_2 - X_3)C_1}{2[(Y_2 - Y_3)(X_2 - X_1) - (Y_2 - Y_1)(X_2 - X_3)]} \end{aligned} \quad (1-4)$$

onde

$$C_1 = X_2^2 + Y_2^2 - X_1^2 - Y_1^2 - d_1^2 - d_2^2 \quad (1-5)$$

$$C_3 = X_2^2 + Y_2^2 - X_3^2 - Y_3^2 - d_3^2 - d_2^2$$

No entanto, esta abordagem *geométrica* do problema não é a mais apropriada quando há erros na medida do parâmetro ToA. Na prática, a metodologia mais apropriada é a abordagem *estatística*, na qual métodos estatísticos de estimação, tais como *máxima verossimilhança* (do inglês: *Maximum Likelihood* (ML)) ou mínimos quadrados (do inglês: *Least Squares* (LS))[24] devem ser empregados. Se o terminal estiver em movimento, é possível ainda estimar \mathbf{z} por algum método de estimação Bayesiana recursivo, como por exemplo, filtro de Kalman estendido ou filtragem por partícula, como apresentado tese.

Sob a abordagem *estatística*, quanto maior o número de bases envolvidas na triangulação, maior é a precisão da estimativa [9][13].

Definição do erro em medidas de ToA

Considera-se um sistema de radiolocalização que realiza medidas de ToA na interface rádio entre o terminal e L bases ($L \geq 3$). Neste caso, admite-se que o vetor de medidas obtido em um dado instante de tempo pode ser escrito da forma

$$\boldsymbol{\tau}^{med} = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\delta} + \mathbf{n} \quad , \quad (1-6)$$

onde:

- $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \dots, \tau_L]$ é o vetor que contém os valores verdadeiros de ToA, ou seja, $\boldsymbol{\tau} = c^{-1}\mathbf{d}$, onde \mathbf{d} é o vetor de distâncias entre o terminal e

³Esta solução não exige que os três círculos se interceptem em um único ponto, pois é resultado da intersecção das duas retas originadas da intersecção dos círculos dois a dois.

as bases, e c é a velocidade da luz;

- $\boldsymbol{\alpha} = \text{diag}([\alpha_1, \dots, \alpha_L])$ é uma matriz diagonal com elementos aleatórios que chaveiam entre os valores 0 e 1 a medida em que o terminal se desloca. Indicam o estado do canal: $\alpha_m = 0 \Rightarrow$ LOS entre terminal e a m -ésima base $\alpha_m = 1 \Rightarrow$ NLOS entre terminal e a m -ésima base.
- $\boldsymbol{\delta}$ é um vetor aleatório cujos elementos têm média positiva e representam a polarização de $\boldsymbol{\tau}^{med}$ provocada pelo erro de NLOS.
- \mathbf{n} é um vetor aleatório de média nula, denominado de *erro de medida* (discutido no item 1.2.1).

O modelo para a medida de ToA expresso pela eq. (1-6) é, de maneira geral, consenso entre diversos autores [6][15][16][17][25] (dentre outros). Também é usualmente admitido que o ruído de medida é governado ao longo do tempo por um processo gaussiano branco discreto no tempo, independente de $\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\delta}$, com matriz covariância diagonal conhecida. Embora não se tenha conhecimento da justificativa teórica para a hipótese de gaussianidade e descorrelação no tempo entre amostras de \mathbf{n} , por uma questão de uniformidade com os demais trabalhos e conveniência matemática, esta hipótese também será considerada nesta tese.

Por sua vez, o erro de NLOS, representado pelo produto $\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\delta}$, depende dos mecanismos de propagação experimentado pelo sinal em um ambiente de edificações e/ou relevos, como mencionado anteriormente. Propostas para a caracterização de $\boldsymbol{\alpha}$ e $\boldsymbol{\delta}$ disponíveis na literatura serão apresentadas no item 2.5 .

1.3.5 Diferença entre Tempos de Chegada (TDoA)

Nos métodos de localização baseados na diferença entre tempos de chegada (TDoA-*Time Difference of Arrival*), comumente denominados de métodos *hiperbólicos*, as medidas obtidas na interface rádio determinam a diferença entre as distâncias do terminal a duas bases. Ou seja, considerando $\tau_{i,j}$ o parâmetro TDoA medido entre o terminal e as bases i e j , a diferença entre as distâncias é dada por

$$d_{i,j} = c\tau_{i,j} = c(\tau_i - \tau_j) = d_i - d_j \quad (1-7)$$

onde τ_i e d_i são respectivamente o ToA e a distância relativos à i -ésima base.

A medida de TDoA produz como lugar geométrico para a posição \mathbf{z} do objeto uma *hipérbole*, com focos dados pelas duas bases, sendo a equação que a define (considerando a estimação em 2-D)

$$d_{i,j} = \sqrt{(x - X_i)^2 + (y - Y_i)^2} - \sqrt{(x - X_j)^2 + (y - Y_j)^2}. \quad (1-8)$$

Para a determinação da posição em duas dimensões, são necessárias 3 bases no mínimo. Neste caso, 2 TDoA's independentes podem ser obtidos, e a localização do móvel é determinada geometricamente pela intersecção entre as 2 hipérbolas resultantes, como mostrado na Figura 1.4.

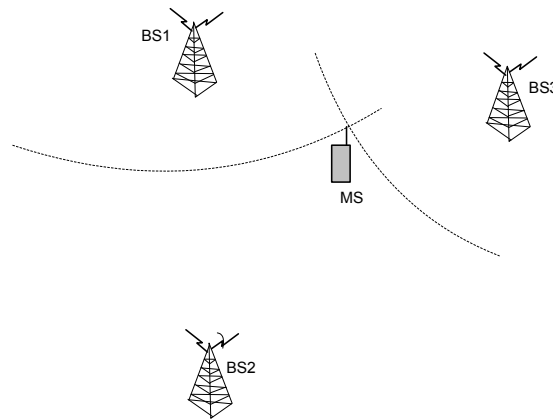


Figura 1.4: Determinação da posição por medida de TDoA.

No caso de três bases envolvidas para a determinação da posição, a solução pode ser dada através das seguintes equações:

$$x = Ad_1 + B \quad (1-9)$$

$$y = Cd_1 + D \quad (1-10)$$

onde d_1 é a distância do móvel à base 1 e é determinada pela seguinte equação de segundo grau

$$(A^2 + C^2 - 1)d_1^2 + 2(AB + CD)d_1 + (B^2 + D^2) = 0. \quad (1-11)$$

Por sua vez, os coeficientes A, B, C e D são calculados por

$$A = \frac{d_{1,2}}{D_{12}} \quad (1-12)$$

$$B = \frac{D_{12}^2 - d_{1,2}^2}{2D_{12}} \quad (1-13)$$

$$C = \frac{d_{1,3} - X_3 A}{y_3} \quad (1-14)$$

$$D = \frac{D_{13}^2 - d_{1,3} - 2X_3 B}{2Y_3} \quad (1-15)$$

onde D_{ij} representa a distância entre as bases i e j . Na solução acima foi considerado, sem perda de generalidade, que a base 1 encontra-se na origem do sistema de coordenadas e que a base 2 está localizada no eixo X .

Esta solução resolve *geometricamente* o problema para 3 bases. No entanto, para um número maior de bases, as várias hipérbolas associadas às equações não se interceptam em um único ponto, pois as medidas obtidas normalmente contêm erros. Considerando que tais erros devem-se ao ruído aditivo de média nula e matriz covariância conhecida, métodos *estatísticos* podem ser utilizados para melhorar a precisão da estimativa. Na literatura existem várias propostas de algoritmos para este fim [9][13][26][27][28][29]. Os mais empregados são os métodos por Série de Taylor (estimação LS iterativa) [13] e o método de Chan [9]. A razão para isto é que estes métodos apresentam o melhor desempenho (menor erro médio quadrático) dentre todos, com complexidade computacional e níveis de precisão semelhantes [9][30].

A possibilidade de ocorrerem duas soluções fisicamente admissíveis para a posição do móvel representa uma limitação dos sistemas hiperbólicos de localização. No Capítulo 6 desta tese é feito um levantamento da dimensão da *região de ambigüidade*, ou seja, a região do plano na qual as soluções por TDoA são ambíguas. Verifica-se que, dependendo da configuração das bases, grande parte da área útil para triangulação (área em que o móvel tem contato com as três bases) pode produzir soluções ambíguas.

A técnica E-OTD (*Enhanced-Observed Time Difference*), que utiliza métodos hiperbólicos de localização para a estimação da posição do terminal, deve ser a alternativa adotada para implementação no GSM de 2ª geração, bem como no padrão UMTS de 3ª geração.

1.4

Organização da Tese

Esta tese consiste de 7 capítulos, que podem ser organizados em 4 grupos como ilustrado pela Figura 1.5.

O primeiro grupo consiste de dois capítulos introdutórios. No Capítulo 1 apresenta-se uma visão geral, sucinta, da tecnologia de radiolocalização

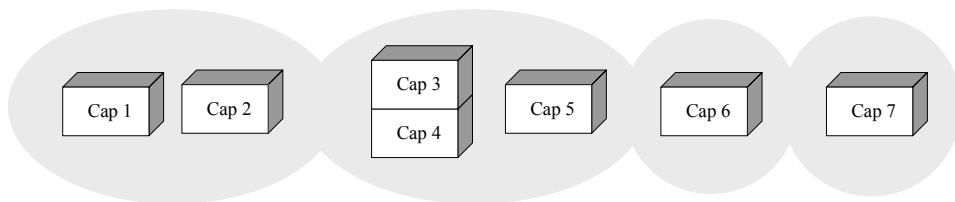


Figura 1.5: Organização da Tese.

de terminais móveis. No Capítulo 2 o canal de propagação em macro-células é abordado através de modelos que o descrevem como um canal linear, variante no tempo e com múltiplos percursos. Especial ênfase é dada aos modelos de espalhamento temporal, os quais são considerados para o desenvolvimento da técnica de mitigação do erro de NLOS apresentada no Capítulo 3. Neste capítulo faz-se ainda um sumário das principais hipóteses admitidas para a caracterização do estado de NLOS do canal de propagação.

No segundo grupo, que inclui os Capítulos 3, 4 e 5, propõe-se alternativas para a estimativa da localização de terminais, sujeitas a medidas de ToA corrompidas por ruído e com erro médio positivo devido ao estado NLOS de propagação.

Nos Capítulos 3 e 4, os erros nas medidas de ToA são identificados e atenuados usando filtro de Kalman e medidas do espalhamento temporal da potência do sinal recebido. Especificamente, no Capítulo 3, é feito um desenvolvimento analítico para determinar um estimador assintoticamente eficiente do erro de NLOS. No Capítulo 4 propõe-se um esquema para a estimativa da posição de um terminal em movimento, no qual a técnica apresentada no capítulo anterior é incluída. Um teste estatístico de hipóteses faz a identificação do estado (LOS/NLOS) do canal. Apresenta-se também neste capítulo resultados de simulação sob diferentes cenários, comparando as técnicas aqui desenvolvidas com a proposta disponível na literatura.

No Capítulo 5 utiliza-se os algoritmos *Kalman estendido* e *filtro de partículas*, ambos com a dimensão do espaço de estados aumentada, para estimar recursivamente a posição e combater a imprecisão das medidas de ToA. Em particular, o esquema de estimação com filtro de partículas é implementado de forma híbrida, particionando-se o vetor de estados para que as variáveis estáticas sejam estimadas analiticamente. Comparativamente, são novas propostas em relação às apresentadas nos Capítulos 3 e 4, porém com a mesma finalidade e sujeitas a cenários de emprego idênticos. Simulações são realizadas para verificar a eficácia dos métodos desenvolvidos.

O terceiro grupo é constituído apenas do Capítulo 6, que apresenta

um desenvolvimento matemático para determinar as regiões do plano de triangulação onde as estimativas de posição, produzidas a partir de medidas de TDoA, são ambíguas. Na região denominada de *área de ambigüidade*, existem duas soluções possíveis, distintas, para a localização do terminal, e sua extensão depende basicamente da posição relativa entre as estações radio-base.

Finalmente, o último grupo corresponde ao Capítulo 7, que apresenta as conclusões da tese e alternativas para trabalhos futuros.

1.5 Contribuições

- O Capítulo 1 compreende um tutorial sobre a tecnologia de radiolocalização de terminais móveis, escrito com base em uma extensa revisão bibliográfica sobre o assunto. Inclui-se um histórico, motivações para implementação, principais métodos de localização e fontes de erro para a estimativa de posição. Ao texto aqui apresentado foram adicionados outros tópicos e o conjunto publicado em
 - A. Guimarães e M. A. Grivet, “Radiolocalização de Terminais de Comunicações Móveis”, *Revista do Instituto Nacional de Telecomunicações*, vol.06, N. 01, Jun 2003, pp. 1-17.
- No Capítulo 3 realiza-se um desenvolvimento matemático para determinar um estimador de mínimos quadrados do erro em medidas de ToA decorrentes da condição NLOS do canal. A estimativa baseia-se na observação do espalhamento da potência média do sinal transmitido, obtida através das derivações (“dedos”) do receptor RAKE. A polarização e o erro médio quadrático do estimador são determinados analiticamente, em função da quantidade N de observações da potência recebida. Para N elevado, prova-se que o estimador é despolarizado e atinge o CRLB. O material deste capítulo será preparado em breve para submissão.
- No Capítulo 4 é proposto um novo esquema de localização baseado em medidas de ToA, o qual utiliza filtros de Kalman para atenuação do ruído e estima o erro de NLOS pela técnica desenvolvida no Capítulo 3. A fim de identificar o estado (LOS/NLOS) em que o canal de propagação se encontra, foi desenvolvido um teste de hipóteses que compara as medidas de ToA com as saídas do filtro de Kalman. Ao contrário de outras propostas disponíveis na literatura [17][25][31][32],

o teste apresentado não requer que as amostras do erro de NLOS sejam mutuamente descorrelacionadas, e também não exige o conhecimento prévio da estatística deste erro. A formulação do teste e a comparação de sua eficácia com outra proposta foram publicadas no seguinte artigo:

- A. Guimarães e M. A. Grivet, “Identification of LOS/NLOS states using TOA filtered estimates”, em *Proc. Int’l Conf. on Telecommun. (ICT’04)*, vol.01, Out. 2004, pp. 1067-1076.

O desempenho do esquema de localização proposto foi verificado por simulações, considerando diferentes cenários para o movimento do terminal e caracterização do erro de NLOS. A eficácia da mitigação do erro de NLOS, quando comparada às propostas de Laurenson et al. [17] e de Tsuji et al. [25], foi comprovada para quase todas as situações consideradas na simulação. Este material será preparado oportunamente para publicação.

- No Capítulo 5 o problema da radiolocalização sujeita à condição NLOS de propagação é novamente analisado, porém sob uma nova abordagem, na qual os algoritmos EKF e PF são implementados para propagar a estimativa da posição recursivamente, com base na regra de Bayes e sob o critério de mínimo erro médio quadrático (MEMQ). Isto é possível devido à inclusão das variáveis de erro de NLOS no vetor de estados a ser estimado. Para o filtro de partículas utiliza-se um interessante esquema híbrido de estimação, no qual um filtro de Kalman fica encarregado de produzir estimativas das variáveis estáticas do problema. A saída deste filtro compõe o vetor-observação para o filtro de partículas, cuja saída realimenta o filtro de Kalman. O esquema com EKF apresentou excelentes resultados porém é extremamente sensível a discrepâncias no modelo considerado para caracterizar o erro de NLOS. A implementação com PF apresenta resultados comparáveis ao EKF sob condições ideais, e é bem mais robusto às imprecisões do modelo. O material deste capítulo será preparado em breve para submissão.
- No Capítulo 6 é feito um estudo das soluções produzidas pelo método hiperbólico de localização. Dadas as posições das bases, faz-se um desenvolvimento matemático para mapear a região de ambigüidade, i.e, a região na qual não é possível determinar uma solução única para as coordenadas do móvel. É feito um cálculo da área desta região, e verifica-se que uma grande parte da área útil de triangulação está

sujeita à duplicidade de soluções. Esta análise revela-se útil para o planejamento de um sistema hiperbólico de localização, pois permite prever em que locais o sistema deve prover informações adicionais para resolver ambigüidades. Este estudo foi publicado no seguinte artigo:

- A. Guimarães e M. A. Grivet, “A Study of Ambiguity in Hyperbolic Mobile Position Location”, em *Proc. IEE European Personal Mobile Communications Conference*, Abr. 2002, pp. 157-161.