

7

Conclusões e desenvolvimentos futuros

7.1

Conclusões

Este trabalho apresentou novas soluções para a determinação da posição de terminais de comunicações móveis com base em medidas de ToA. Nos métodos propostos destaca-se o desenvolvimento de técnicas para a redução dos efeitos do ruído e do erro de NLOS sobre a precisão da estimativa de localização.

Em um dos métodos apresentados, o ruído de medida é reduzido usando filtro de Kalman, e o erro de NLOS estimado por um critério de mínimos quadrados. Esta estimativa é feita a partir da determinação de coeficientes de atenuação do canal em um receptor RAKE, e do conhecimento do modelo de espalhamento temporal do canal, i.e., a fdp f_τ dos valores de atrasos.

No desenvolvimento analítico realizado para a formulação do estimador, os seguintes aspectos devem ser ressaltados:

- A relação entre os coeficientes estimados pelo RAKE e f_τ é estabelecida com base em hipóteses usualmente aceitas para a caracterização estatística de 1ª ordem do canal.
- Admite-se que é possível estimar o valor médio quadrático (estocástico) dos coeficientes por uma média temporal de N medidas consecutivas, dado que o intervalo de tempo entre estas medidas é maior do que o tempo de coerência do canal e o conjunto é obtido em uma área localmente estacionária. Foi obtida uma expressão fechada para o coeficiente de confiança desta estimativa.
- A precisão do estimador WLS desenvolvido para o erro de NLOS é função de N . Demonstra-se que este estimador é despolarizado e seu erro médio quadrático atinge o limite de Crámer-Rao (CRLB) para N

elevado. O valor do CRLB, por sua vez, depende basicamente de N e do número de coeficientes disponibilizados pelo receptor RAKE.

- A determinação da estimativa por mínimos quadrados requer a implementação de um algoritmo de minimização com dimensão $P + 1$, onde P é a quantidade de parâmetros de f_τ . Se houver mais de uma base em NLOS com o terminal, as estimativas dos erros de NLOS são realizadas em separado, conforme mostrado no diagrama da Figura 3.3.

Em outra proposta, a posição do terminal é estimada usando algoritmos bayesianos recursivos. São implementados esquemas de localização baseados no filtro de Kalman estendido e no filtro de partículas, a partir da definição de modelos de evolução no tempo das coordenadas do terminal e do erro de NLOS. O vetor de estados original, que contém as variáveis de interesse, é aumentado para que sejam estabelecidas equações de estado e de medida *canônicas* à aplicação dos algoritmos EBR. O filtro de partículas tem sido freqüentemente empregado em cenários com dinâmica não-linear e não-gaussiana, e, em particular, para o problema de radiolocalização em ambientes com NLOS, foram obtidos resultados promissores nesta tese. Na implementação aqui proposta, o filtro de partículas é utilizado em conjunto com um filtro de Kalman, sendo este último aplicado para estimar as variáveis estáticas do vetor de estados.

Em todos os métodos de localização desenvolvidos admite-se que o estado do canal (LOS ou NLOS) entre terminal e bases possa ser identificado. Demonstrou-se que é possível construir um teste de hipóteses para a detecção de transições entre estes estados, caso sejam usados filtros de Kalman para a filtragem do ruído branco nas medidas obtidas de ToA. O teste é formulado usando o critério de Neyman-Pearson, e não requer decorrelação entre amostras do erro de NLOS, bem como conhecimento da fdp destas amostras. Estas hipóteses são altamente restritivas mas amiúde consideradas na literatura. Conhecendo-se alguns parâmetros associados à arquitetura urbana, o teste pode ser ainda aperfeiçoado para apresentar melhor desempenho sob um enfoque bayesiano.

As simulações realizadas permitiram avaliar o desempenho dos esquemas de localização apresentados nesta tese, e também da técnica aqui denominada de *OnOff*, proposta inicialmente por Laurenson et al. [17] e posteriormente aperfeiçoada por Tsuji et al. em [25]. Com os resultados obtidos sob diferentes cenários de emprego, foi possível apontar virtudes e deficiências das alternativas, principalmente no que se refere à precisão, robustez e esforço computacional. Estas características são resumidas no quadro 7.1.

Tabela 7.1: Características dos esquemas de localização.

Técnica	Pontos Fortes	Pontos Fracos
<u>NEMPS</u>	<ul style="list-style-type: none"> * Elevada robustez ao tipo de trajetória e às variações das propriedades estatísticas do erro de NLOS. * Boa uniformidade dos resultados (baixo σ_{EML}). * Menor degradação de desempenho (comparada à <i>OnOff</i>) quando há erros na identificação do estado do canal. * Boa precisão sob vários cenários de emprego. * Baixa probabilidade de perda de rastreamento. 	<ul style="list-style-type: none"> * Requer o conhecimento do modelo de espalhamento temporal do canal. * Esforço computacional maior que o exigido para <i>OnOff</i>.
<u>EKF</u>	<ul style="list-style-type: none"> * Excelente desempenho quando define-se precisamente a dinâmica das variáveis de estado. * Baixo esforço computacional comparada à <i>NEMPS</i> e PF. 	<ul style="list-style-type: none"> * Depende fortemente de um modelo preciso para a dinâmica dos estados. * Pode perder o rastreamento.
<u>PF</u>	<ul style="list-style-type: none"> * Excelente desempenho quando define-se precisamente a dinâmica das variáveis de estado. * Robustez à imprecisão dos modelos para as variáveis de estado. 	<ul style="list-style-type: none"> * Exige elevado esforço computacional. * Pode perder o rastreamento.
<u>OnOff</u>	<ul style="list-style-type: none"> * Bom desempenho quando a duração média do estado NLOS é relativamente pequena. * Não depende do modelo assumido para o espalhamento temporal do canal. * Exige menor esforço computacional do que a <i>NEMPS</i> 	<ul style="list-style-type: none"> * Muito suscetível às características do erro de NLOS e tipo de trajetória. * Elevada dispersão dos resultados para um dado cenário. * Requer a definição da matriz covariância do ruído de medida no estado de NLOS.

Fica claro que não existe superioridade absoluta de um determinado método sobre os demais. A opção para implementação deve depender do cenário de emprego, da disponibilidade de modelos para o canal e para a dinâmica das variáveis envolvidas, e da capacidade computacional do sistema. Cabe ressaltar, no entanto, que em quase todos os cenários considerados neste trabalho, as técnicas aqui propostas apresentaram precisão superior à técnica *OnOff*.

Outra relevante contribuição desta tese foi determinar a região de ambigüidade em métodos hiperbólicos de localização, i.e., a região na qual as soluções produzidas a partir de medidas de TDoA são ambíguas. Se o terminal estiver nesta região, é necessário uma informação complementar para determinar a solução correta. Foi observado que o tamanho relativo da região de ambigüidade depende da posição das bases. Mesmo considerando um arranjo geométrico favorável, a área de ambigüidade representa uma fração significativa da região possível para triangulação. Este estudo pode ser de grande utilidade no planejamento de sistemas de localização baseados na técnica E-OTD, que utiliza métodos hiperbólicos para a determinação da posição do terminal.

7.2

Desenvolvimentos futuros

Uma possibilidade imediata para a continuidade do trabalho é o desenvolvimento de modelos mais apropriados para a dinâmica de movimento do terminal em um cenário urbano típico. O desafio seria definir matematicamente uma dinâmica mais próxima da realidade, que reflita a alteração em módulo e direção do vetor-velocidade em instantes aleatórios. Ao mesmo tempo, este modelo não deve, a princípio, “carregar” com mais variáveis de estado o problema de estimação, uma vez que isto acarretaria maior esforço computacional, e poderia reduzir a precisão da estimativa das variáveis de interesse.

Outro possível trabalho seria realizar um levantamento das reais propriedades estatísticas do erro de NLOS em cenários urbanos típicos. Na literatura, os artigos sobre radiolocalização que tratam do erro de NLOS escolhem modelos sem aparente fundamento teórico ou empírico para caracterizá-lo. Este levantamento poderia ser feito usando programas de predição de propagação, do tipo *traçado de raios*, e também com base em modelos que relacionam a potência recebida do sinal com parâmetros da arquitetura urbana, como por exemplo, o modelo de Walfisch-Bertoni [81].

O conhecimento da estatística do erro de NLOS para um dado cenário viabilizaria o desenvolvimento de soluções mais eficientes e apropriadas de localização.

Lista-se a seguir outras possíveis contribuições para o aperfeiçoamento das técnicas aqui apresentadas.

NEMPS

- Uso do modelo de espalhamento temporal em conjunto com o modelo de espalhamento angular correspondente do canal. Esta abordagem permitiria, em princípio, melhorar o desempenho do estimador do erro de NLOS. A medida do espalhamento angular pode ser obtida com o uso de matrizes de antena.
- Representação do espalhamento temporal do canal por fdp's empíricas, como por exemplo, a família de distribuições de Johnson [82] (cap. 6). Estas funções representariam aproximações para a fdp *real* de atrasos do canal, e poderiam se ajustar a diferentes modelos de espalhamento.

Teste de hipóteses para identificação do estado do canal

- Implementação de teste de razão de verossimilhança para a detecção NLOS→LOS usando a estimativa do erro de NLOS proporcionada pela técnica *NEMPS*. Seria empregado um teste de hipóteses composto [64], para tentar melhorar o desempenho da solução proposta nesta tese.

PF

- Levantamento da relação *precisão*×*carga computacional* com a variação do valor utilizado para N_s (quantidade de partículas). Seria buscada uma solução de compromisso para N_s , isto é, um valor que proporcione razoável precisão com carga computacional moderada.
- Implementação do filtro de partículas com funções de densidade por importância *sub-ótimas*¹ [83]. No problema de radiolocalização, esta função pode ser obtida pela linearização da equação de medidas por série de Taylor. Com isto pretende-se não somente aumentar a precisão da estimativa, mas principalmente reduzir a degenerescência das partículas para que a reamostragem possa ser utilizada com menos frequência no algoritmo.

¹Funções que são derivadas da função ótima.

- Desenvolvimento de um esquema de identificação do estado do canal para aplicação em conjunto com a técnica PF.