

Efeitos de Multicaminhamento em Levantamentos Utilizando GPS Aplicados ao Cadastro Técnico Urbano

Mauro Issamu Ishikawa¹
Otavio Yassuo Itame²

UNESP/FCT - Depto. de Cartografia
19100-900 Presidente Prudente SP

¹ ✉ mauro@prudente.unesp.br

² ✉ itame@prudente.unesp.br

Conteúdo	1 Introdução 2 Multicaminhamento 2.1 Introdução 2.2 O Problema de Multicaminhamento 2.3 Características do Multicaminhamento 2.4. Técnicas de Suavização de Multicaminhamento 2.4.1 Procedimentos de Campo 2.4.2 Procedimentos no Processamento dos Dados 2.4.2.1 Esquema para suavizar a portadora 3 Conclusões 4 Referências Bibliográficas
-----------------	--

Resumo : Ferramenta cada vez mais popular, o GPS vem se consolidando como um sistema padrão para georeferenciamento em todo o mundo. Suas aplicações são cada vez mais numerosas, tendo como limite a criatividade do usuário. Entretanto, as observáveis GPS, tal como todas as outras envolvidas nos processos de medidas, estão sujeitas aos erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Para obter resultados confiáveis, o modelo matemático estabelecido deve ser válido e capaz de detectar problemas. Desta forma, as fontes de erros envolvidas no processo de medidas devem ser bem conhecidas. Uma fonte de distorções sobre o sinal transmitido, quando do uso do sistema GPS aplicado ao cadastro técnico urbano, é o efeito de multicaminhamento, resultando da reflexão indesejada do sinal por obstáculos próximos a antena receptora. Este é o assunto que será abordado em nosso trabalho, alguns dos métodos e modelos matemáticos utilizados para minimizá-los serão discutidos.

Palavras chave : Palavras chaves: Multicaminhamento, GPS

Abstract : Tool more and more popular, GPS comes if consolidating all over the world as a standard system for georeferenced. Its applications are more and more numerous, tends as limit the user's creativity. However, you observed them GPS, just as all the another involved us process of measures, they are subject to the aleatory, systematic and rude mistakes. To obtain reliable results, the established mathematical model should be valid and capable of detecting problems. This way, the sources of mistakes involved in the process of measures should be very well-known. A distorts source on the transmitted sign, when of the use of the system GPS applied to the urban cadastre, is the multipath effect, resulting of the reflection improper of the sign for close obstacles the receiving antenna. This is the subject that will be approached in our work, some of the methods and mathematical models used to minimize them they will be discussed.

Keywords : Keywords: Multipath, GPS

1 Introdução

Ferramenta cada vez mais popular, o GPS vem se consolidando como um sistema padrão para georeferenciamento em todo o mundo. Suas aplicações são cada vez mais numerosas, tendo como limite a criatividade do usuário. Entretanto, as observáveis GPS, tal como todas as outras envolvidas nos processos de medidas, estão sujeitas aos erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Para obter resultados confiáveis, o modelo matemático estabelecido deve ser válido e capaz de detectar problemas. Desta forma, as fontes de erros envolvidas no processo de medidas devem ser bem conhecidas.

Em virtude de suas características estratégicas, o sistema é submetido a algumas restrições para distinguir a exatidão alcançável por usuários civis e militares. O serviço disponível para a comunidade civil é o SPS (*Standard Positioning Service*), enquanto que para o uso militar existe o PPS (*Precise Positioning Service*). Para os usuários do SPS, a exatidão horizontal esperada está dentro de 10 m, enquanto que para os usuários do PPS, estes valores estão entre 10 e 20 m (Monico 1998). Desta forma, não há garantia para o usuário civil que, ao ligar seu equipamento por poucos segundos, o erro em suas coordenadas seja inferior a 100m, considerando o uso de um único equipamento. Se estivesse trabalhando no modo diferencial (posicionamento relativo) a exatidão poderia ser muito melhor.

A exatidão do posicionamento com GPS é muito influenciada por dois fatores (Seeber 1993), a exatidão com que a medida da distância até o satélite é determinada, representada pela *User Equivalent Range Error* (UERE), ou do desvio padrão associado a tal medida e a configuração geométrica dos satélites utilizados face à posição do observador. De uma maneira genérica, um número *Dilution Of Precision* (DOP) quantifica a influência da geometria instantânea do conjunto de satélites acima do horizonte livre do

observador. Dessa maneira, no posicionamento instantâneo com um único rastreador, a exatidão obtida será tanto pior quanto maior for o valor do DOP no instante da determinação.

Uma outra limitação sobre o GPS são os efeitos atmosféricos, que são devidos principalmente às influências da ionosfera e da troposfera. O reflexo do efeito ionosférico nas pseudo-distâncias podem variar entre 1 e 100m e é função da posição, tempo e frequência utilizada. Seeber (1993) chama atenção para o fato de que os satélites do GPS orbitam além do limite da ionosfera (1000 Km), mais precisamente na plasmosfera, sendo portanto o efeito resultante uma combinação de ambas as camadas ou seja, da plasmosfera e da ionosfera. O efeito da troposfera, diferente do caso ionosférico, independe da frequência utilizada e não é correlacionado com a distância entre as estações. Por esse motivo o atraso gerado pela refração troposférica nos sinais rastreados é crítico para as determinações com GPS, notadamente em relação à altimetria.

Outra fonte de distorções sobre o sinal transmitido é o efeito de multicaminhamento, resultado da reflexão indesejada do sinal por obstáculos próximos à antena receptora. Pode afetar tanto a propagação de códigos quanto portadoras, sendo duas vezes maior no código P que na portadora (Seeber 1993). Em situações mais desfavoráveis, a ocorrência de multicaminhamento pode gerar até a perda de sintonia do sinal e *cycles-slips*. Este é o assunto que será abordado em nosso trabalho, alguns dos métodos e modelos utilizados para minimizá-los serão mencionados a seguir.

2 Multicaminhamento

2.1 Introdução

A rápida evolução das aplicações de GPS produziu um grande espectro de exigências no desempenho dos receptores, particularmente em relação à exatidão do posicionamento. Para usuários comuns, receptores de navegação, com exatidão horizontal dentro de dezenas de metros basta. No outro extremo, os usuários com receptores de levantamentos de qualidade podem requerer exatidão tridimensional ao nível do centímetro e em alguns casos, ao nível do milímetro. A busca por altas exatidões, exigiu um maior entendimento das fontes dos erros no posicionamento GPS e de como reduzi-los ou eliminá-los.

O posicionamento relativo reduz grandemente as influências atmosféricas, orbitais e erros de relógio dos satélites. Além disso, na última década observou-se um grande progresso, na redução de erros que ocorriam dentro do próprio receptor GPS. De fato, erros nas operações dos receptores com sinais GPS ideais tem sido reduzidos a limites próximos dos teóricos.

Como resultado, os projetistas reconhecem que esforços adicionais devem ser feitos no sentido de reduzir os erros na propagação de multicaminhamento e que não podem ser removidos através de uma operação diferencial. Nos últimos anos, certos grupos de usuários reconheceram isto como particularmente crítico para suas aplicações, incluindo levantamentos por GPS e no *Wide Area Augmentation System* (WAAS) que está surgindo e que é destinado a auxiliar a comunidade aeronáutica.

2.2 O Problema de Multicaminhamento

Todos os receptores GPS calculam suas posições determinando a pseudo-distância, da antena para pelo menos quatro satélites, cujas posições são calculadas através dos dados das efemérides transmitidas. Este conjunto de pseudo-distâncias (depois de serem corrigidos do erro do relógio do satélite, da refração atmosférica e assim sucessivamente) determinam o ponto onde a antena do receptor está posicionado. O receptor determina estas pseudo-distâncias, multiplicando o tempo de propagação do sinal de cada satélite, resultante do processo de correlação, pela velocidade da luz. O tempo de propagação é o retardo entre a chegada de uma transição particular do código, gerado no satélite, e a réplica do mesmo, gerada no receptor. O receptor realiza esta média usando a técnica de correlação do código. Nos levantamentos, os receptores de precisão também usam a informação do tempo de propagação transmitido pelo sinal da fase da portadora para obter maior exatidão, embora inicialmente ambíguas, mede distâncias.

O sinal de cada satélite percorre um caminho direto até a antena do receptor, permitindo a unidade determinar a distância ao satélite com bastante exatidão. Entretanto, o solo e outros objetos refletem facilmente os sinais GPS, resultando frequentemente em um ou mais caminhos refletidos, que serão sempre mais longos que o caminho direto, como mostra a Figura 1. Estes sinais que percorrem os caminhos refletidos e que se sobrepõem aos sinais de caminho direto na antena, possuem um tempo mais longo de propagação, podendo distorcer significativamente o sinal em amplitude e fase.

Nos receptores que utilizam somente o código C/A, o sinal que percorre um caminho refletido produz um erro de posicionamento que pode ser de dez metros ou mais (Weill 1997). Os receptores de alta precisão, por outro lado, utilizam a medida de código e fase da portadora empregando-se da técnica de posicionamento relativo, de modo a alcançar as mais altas exatidões. Inicialmente ambíguas, estes medidores baseados na fase da portadora, iniciam como um grid dos possíveis valores que devem ser procurados e testados, para encontrar um correto que dará a verdadeira posição do receptor. A medida exata do código ajuda solucionar a ambigüidade limitando a procura numa região e medindo-se a fase exatamente diminui o número de possíveis valores na região. Até mesmo pequenos erros de medidas em fase, induzidas por multicaminhamento, podem incapacitar este processo, resultando em posições menos exatas.

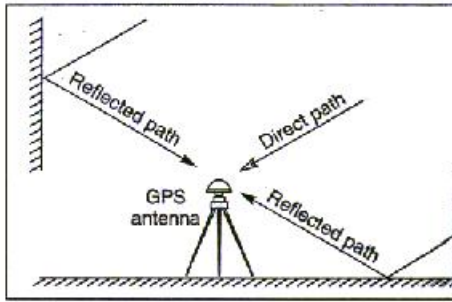


Figura 1. Geometria da reflexão de multicaminham ento

Fig. 1

A propagação de multicaminhamento pode ser dividida em duas classes: estático e dinâmico. Para um receptor estacionário, a geometria de propagação altera lentamente, tornando os parâmetros de multicaminhamento constantes durante vários minutos. Mas em aplicações móveis, um receptor pode sofrer rápidas oscilações em frações de segundo.

2.3 Características do Multicaminhamento

Segundo Moelker (1997) a propagação de multicaminhamento pode ser classificada em três categorias: reflexão especular, difração e multicaminhamento difuso. Estes podem ser brevemente descritos como:

- a. Reflexão especular : multicaminhamento especular requer uma superfície lisa como refletora, para gerar uma onda refletida somente com diferença de fase e normalmente com amplitude menor que a original e com atraso.
- b. Difração : multicaminhamento proveniente de bordas e cantos de construções.
- c. Multicaminhamento difuso : reflexões provenientes de superfícies rugosas. Têm fase, amplitude e polarização aleatórias.

2.4. Técnicas de Suavização de Multicaminhamento

Várias técnicas de redução de multicaminhamento tentam tirar proveito da geometria de propagação do sinal de uma maneira ou outra (Weill 1997). Estes métodos incluem o uso de antenas especiais (como o tipo *choke-ring*), processamento espacial com multiantenas, antenas com localizações estratégicas e observação do sinal por longo tempo para deduzir parâmetros de multicaminhamento, facilitado pela mudança da geometria de reflexão. Estes métodos tentam reduzir a força do sinal no caminho refletido, enquanto preservam o sinal no caminho direto - em outras palavras, tentar isolar o sinal no caminho direto.

2.4.1 Procedimentos de Campo

a) Antenas especiais

Uma forma simples de suavização de multicaminhamento é usar um disco metálico no plano horizontal e a base da antena GPS centrada. Os desenvolvedores desta técnica teorizaram que o disco ou plano de terra estendido (conforme figura 2), protegeria a antena de quaisquer sinais que chegassem por debaixo da antena, tais como aqueles refletidos no solo.

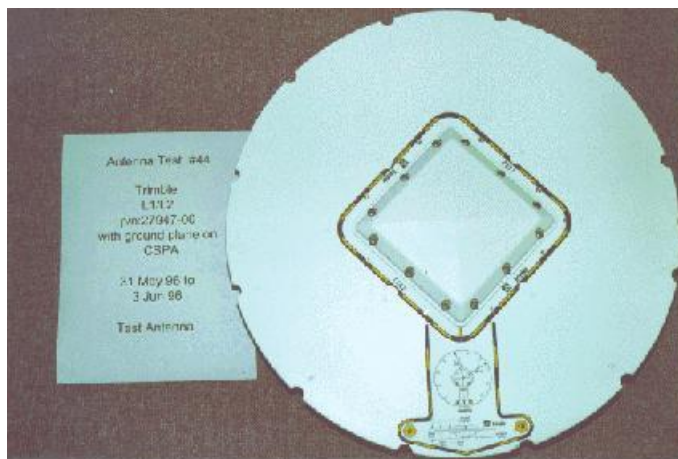


Figura 2. Antena Trimble tipo plano de terra

Fig. 2

Porém, este esquema não teve um desempenho como esperado, por causa das características sutis das ondas eletromagnéticas. Quando um sinal da onda chega à extremidade do disco por debaixo, induz as ondas a se deslocarem horizontalmente na superfície do lado de cima do disco até o centro da antena, comprometendo assim a utilidade do disco. Além disso, nem todos os sinais de multicaminhamento chegam por baixo da antena, tornando este método ineficaz em tais casos. Para eliminar ondas de superfície, o plano de terra pode ser substituído por uma antena tipo *choke-ring* (conforme Figura 3), é essencialmente um plano de terra que contém uma série de círculos concêntricos com depressões de um quarto de comprimento de onda. Estas depressões atuam como linhas de transmissão curtas junto ao final e seus topos apresentam uma alta impedância (quociente entre a amplitude de uma tensão alternada e a amplitude da corrente que ela provoca em um circuito) na frequência do sinal GPS. Então, ondas de superfície não tem forma, assim a antena ganha uma importância na proteção de reflexões do solo e de sinais de multicaminhamento que chegam de direções aproximadamente horizontais.

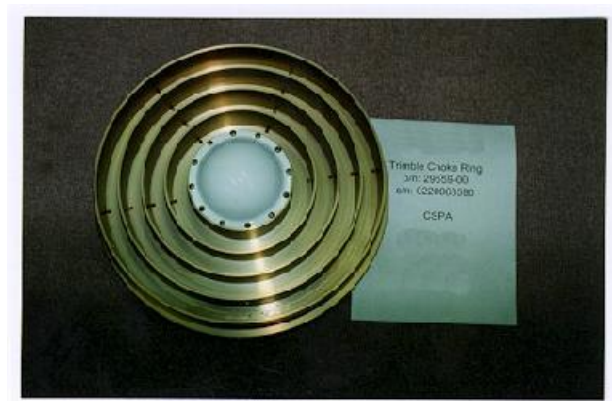


Figura 3. Antena Trimble tipo Choke-Ring

Fig. 3

A desvantagem da antena *choke-ring* está relacionado com o seu tamanho, peso e preço. O mais importante, o *choke-ring* ainda não suaviza efetivamente sinais de multicaminhamento que chega de cima e da horizontal, como pode ser testado de uma reflexão lateral de uma construção alta. Todavia, tais antenas tem sido submetidas em aplicações onde reflexões do solo provêm a fonte de multicaminhamento dominante, particularmente em levantamentos.

Uma antena GPS projetada para sinais polarizados circularmente à direita (RHCP) transmitidos por satélites GPS, poderão prover algum grau de imunidade para sinais de multicaminhamento resultante de reflexão. Teoricamente, um sinal RHCP fica polarizado circularmente à esquerda (LHCP) em reflexão de uma superfície condutora ideal e a antena de RHCP não é suscetível a este sinal LHCP.

Os usuários também podem reduzir os efeitos de multicaminhamento empregando multiantenas, que recebem simultaneamente sinais GPS de diferentes pontos. Como a geometria de multicaminhamento varia em diferentes localizações, os sinais GPS

adulterados pelo multicaminhamento geralmente terá diferentes características em cada antena. Os usuários podem utilizar uma forma de processamento de sinal chamado de processamento espacial, de modo a explorar estas diferenças e isolar um sinal desejado que percorreu um caminho direto. Em alguns casos, o uso de multiantenas pode ser considerado como criando um padrão de antena direcional para os sinais de caminho direto, mas não para sinais de multicaminhamento que chegam de outras direções.

b) Estratégia de Localização da Antena

Os usuários podem reduzir em muito os efeitos de multicaminhamento instalando a antena onde terá menos probabilidade de receber sinais refletidos. Por exemplo, posicionar um ponto perto de um objeto potencialmente refletivo, poderia ser feito determinando a posição de um ponto próximo, livre dos efeitos de multicaminhamento e calcular a posição desejada inicial utilizando-se de técnicas de medição de distâncias e/ou medidas de ângulos aplicados na topografia.

c) Observação do Sinal por Longo Tempo

Se um receptor rastreia um sinal por um longo tempo, por mais de uma hora, pode ter a vantagem de verificar a mudança da geometria das reflexões no caminho refletido, causada pelo movimento angular dos satélites GPS. Esta mudança do movimento ocasiona um atraso entre os caminhos de propagação direta e refletida, causando variações mensuráveis no sinal recebido.

Algumas aproximações removem as componentes do caminho refletido, identificado pelas variações do nível do sinal ou pela proporção do ruído do sinal, causada por auxílio de fase alternadas e cancelamento. Como requerem observações do sinal por um longo tempo, estas técnicas são especializadas e provavelmente impraticáveis para a maioria das aplicações.

Uma técnica que pode ser usada para caracterizar multicaminhamento com precisão em um local fixo, como numa estação base num posicionamento relativo, é observar os mesmos satélites de um dia para o outro, verificando os padrões de medidas na pseudo-distância ou fase, aproximadamente por quatro minutos a menos ao dia por causa do período do dia sideral dos satélites.

2.4.2 Procedimentos no Processamento dos Dados

Embora muitos usuários podem obter vantagens das técnicas acima, há todavia, não obstante, erros de multicaminhamento nas medições. Melhoras adicionais podem ser obtidas pelo esquema de processamento dos dados. Existem um grande variedade de técnicas de suavização com emprego de esquemas de processamento dos dados. Suavização de portadora oferece vantagens pelo fato de que erros típicos de medida de fase da portadora são negligenciáveis comparado ao código de multicaminhamento. A combinação ótima da medida da fase da portadora e do código podem eficientemente reduzir o código do multicaminhamento para o nível de centímetro e são largamente usados.

Outros esquemas tem sido investigados para suavizar o multicaminhamento. Métodos típicos são focalizados na determinação da vantagem da medida de SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), repetibilidade de multicaminhamento em estações de referência terrestre ou uso de receptores múltiplos para cancelar o multicaminhamento com correlação espacial. Melhorias no desempenho são limitadas e há dificuldade para garantir um desempenho seguro em aplicações práticas.

Análise detalhada da técnica de suavização da portadora são munidas para obter uma combinação ótima da medida do código e da portadora. Além disso, iniciando do mecanismo físico e análise espectral do erro de multicaminhamento em GPS, uma estratégia de suavização de multicaminhamento baseado na decomposição espectral, é proposta para obter vantagem do SNR e repetibilidade (Dai 1997).

2.4.2.1 Esquema para suavizar a portadora

As medidas de pseudo-distância pela dupla frequência e fase da portadora são:

$$\tau_{L1} = \rho + I_{L1} + M\varepsilon_{\tau 1}$$

$$\tau_{L2} = \rho + \gamma I_{L1} + M\varepsilon_{\tau 2}$$

$$\phi_{L1} = \rho - I_{L1} + N\lambda_1 + M\varepsilon_{\phi 1}$$

$$\phi_{L2} = \rho - \gamma I_{L1} + N\lambda_2 + M\varepsilon_{\phi 2}$$

A medida da ionosfera livre pode ser obtida pela combinação da medida de dupla frequência:

$$\tau_c = \frac{\gamma\tau_{L1} - \tau_{L2}}{\gamma - 1} = \rho + M\varepsilon_{c,\tau} \quad (1)$$

$$\phi_c = \frac{\gamma\phi_{L1} - \phi_{L2}}{\gamma - 1} = \rho + N\lambda_c + M\varepsilon_{c,\phi} \quad (2)$$

$$\phi_c - \tau_c = N\lambda_c + \Delta M \varepsilon_c \quad (3)$$

A medida de distância com ruído, embora a fase da portadora é precisa, mas influenciada devido à ambigüidade inteira. Assim o chamado esquema de suavização da portadora representa meios para obter vantagens de ambos.

A maior parte da explanação intuitiva para combinação de ambas as medições é mostrada na Figura 4, onde um filtro passa-baixo (LPF) e um filtro passa-alto (HPF) são conceitualmente usados do ponto de vista da "filtragem complementar".

Fundamentalmente, todas as estratégias de suavização da portadora são baseadas na utilização de diferentes estruturas de filtros, passa-baixo e passa-alto.

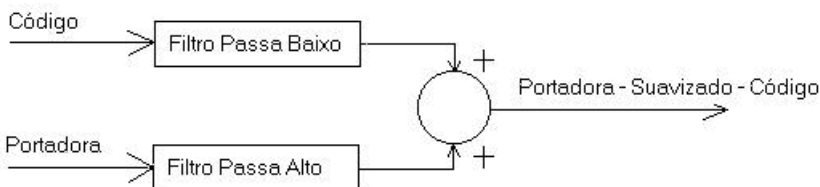


Figura 4 : Esquema de diagrama de bloco da combinação código - portadora

Figura 4

a) Filtro de Hatch

É um dos mais conhecidos e simples esquemas de suavização.

O desempenho deste varia com o tempo constante (movendo a largura média da janela). Os erros aleatórios são incluídos no ruído do receptor e componentes do multicaminhamento. Erros sistemáticos são introduzidos pelo efeito de alteração na ionosfera. Obviamente, sua remoção é necessária para obter ótimo rendimento.

O filtro Hatch é um eficiente esquema de suavização da portadora. Infelizmente informações do erro da covariância, que é crítico para geração do algoritmo da correção do DGPS não é definido.

b) Modelamento Estocástico de Multicaminhamento e Esquemas de Filtragem

O ponto crítico da combinação do código e portadora é para resolver a ambigüidade inteira da portadora. Infelizmente, os erros nas observáveis da portadora são degradados pelos ruídos no receptor e multicaminhamento, que são limitados por bandas, média diferente de zero e variação com a elevação, ângulo azimutal e medição de SNR. É bem conhecido que a eficiência de qualquer esquema de filtragem depende da natureza das perturbações, da dinâmica do processo e modelos de erro. Aqui, são investigados diferentes esquemas de filtragem implementados para modelos de multicaminhamento estocástico diferentes, para resolver o mesmo problema de estimação de erros para desempenho e comparação da integridade.

b.1 Mínimos Quadrados Recursivo (RLS)

O método RLS é um caso especial do filtro de Kalman. O RLS atua como um estimador de probabilidade máxima (mle), se as perturbações são gaussianas brancas e média zero e o erro na covariância diminuir muito rapidamente e firme. O multicaminhamento é uma típica perturbação colorida, assim a covariância destina-se a ser dado por RLS, pequena queda do ponto de vista da integridade devido à suposição incorreta no modelo da perturbação.

b.2. Filtro de Kalman (KF)

O sistema estabelecido inclui suavização da portadora, que é modelado por uma constante arbitrária, aumentado com o modelo de multicaminhamento: um prévio tempo invariante segundo o modelo de Gauss-Markov ou modelo auto regressivo. Diferente do caso do RLS, um filtro de Kalman com modelo de multicaminhamento acima fornece uma definição mais razoável do intervalo de confiança. Obviamente, um conhecimento estatístico melhor da perturbação do sistema é crítico para ambos, integridade e desempenho.

b.3. Filtro de Kalman Extendido (EKF)

Uma versão ampliada pode ser implementada pelo uso do Filtro de Kalman Extendido (EKF), que faz o efeito dinâmico na avaliação do erro de multicaminhamento. Num EKF os parâmetros do modelo são adaptados e orientados simultaneamente. O EKF provê excelente rendimento quando o processo e modelos de perturbações na medição são razoavelmente fechados para sistema físicos. O desempenho é comparável com os resultados de KF com limite de covariância mais conservativo, que é desejável do ponto de vista da integridade, mas pode ser também conservativo e numericamente menos robusto para suportar suficiente disponibilidade.

3 Conclusões

Nos estudos realizados pode-se constatar que o efeito de multicaminhamento é uma fonte de erro que não deve ser ignorada, em

função de sua influência nos resultados de um levantamento.

Existe uma variedade de modelos matemáticos e de procedimentos de campo que auxiliam a minimizar o efeito de multicaminhamento. Uma outra alternativa, seria a de realizar observações por um longo período de tempo, associadas com posicionamento de antenas em locais adequados, para evitar que sinais refletidos e refratados interfiram nos sinais diretos provenientes dos satélites, bem como dotadas de *choke-ring*.

Ainda que pouco transparente, os efeitos descritos estão presentes nas determinações com GPS e devem ser, sempre que possível, considerados e tratados adequadamente.

4 Referências Bibliográficas

Braasch, M. S. *Multipath Effects, Global Positioning System : Theory and Applications*, Volume I, Washington, 1995.

Dai, D.; Walter, T.; Comp, C. J.; Tsai, Y. J.; Ko, P. Y. *High Integrity Multipath Mitigation Techniques for Ground Reference Stations*, Proceedings of ION GPS-97, Kansas City, september 16-19, 1997.

Monico, J. F.G. *Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS : Descrição, Fundamentos e Aplicações*, Notas de Aula, FCT, UNESP, Presidente Prudente, 1998.

Moelker, D. *Multiple Antennas for Advanced GNSS – Multipath Mitigation and Multipath Direction Finding*, Proceedings of ION GPS-97, Kansas City, September 16-19, 1997.

Seeber, G. *Satellite Geodesy : foundations, methods and applications*, New-York : Walter de Gruyter, Berlin, 1993.

Weill, L. R. *Conquering Multipath The GPS Accuracy Battle*, GPS World, April 1998.