

MÉTODO ALTERNATIVO PARA DETECÇÃO E ATENUAÇÃO DO MULTICAMINHO NAS MEDIDAS DA FASE DAS PORTADORAS GPS EM AMBIENTES ESTÁTICOS

*An Alternative Method for Detecting and Making the Multipath for Measures with
the Help of GPS in Static Environments*

Julio Cesar Farret¹

Camil Gemael²

José Bittencourt de Andrade³

Lúcia Valéria Ramos de Arruda⁴

¹Professor do Departamento de Engenharia Rural
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, RS – BR

²Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
Universidade Federal do Paraná
Curitiba, PR – BR

³Engefoto – Engenharia e Aerolevantamentos S.A.
Curitiba, PR – BR

⁴Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná
Curitiba, PR – BR

Resumo

O multicaminho atua na fase da onda portadora causando erros na distância receptor-satélite medida e fornecendo medidas de fase alteradas. Talvez por isso, o multicaminho continue sendo a maior fonte de erro nos posicionamentos de alta precisão, tanto cinemáticos como estáticos. Melhoras têm havido somente para o multicaminho de alta frequência, geralmente de menor intensidade, provocado por objetos distantes da antena. Usando a alta correlação espacial no multicaminho que afeta antenas próximas, busca-se uma avaliação do mesmo pela introdução do fator tempo nas medidas, usando o pressuposto da baixa variação da geometria do cenário em intervalos curtos de tempo. Usou-se medidas de simples diferença de

fase da portadora L1 entre duas antenas próximas no espaço e no tempo, para alimentar um filtro estimador de parâmetros do multicaminho, a partir dos quais pode-se chegar a uma estimativa e atenuação do mesmo. Analisou-se o multicaminho nas antenas em relação a dois satélites com diferentes azimutes e elevações e em dias consecutivos, mas com a mesma geometria nos cenários em relação aos satélites. A alta repetibilidade diária do sinal foi usada para verificar se tratava realmente de um sinal de multicaminho. Alguns resultados ultrapassaram 60% de eficiência, comparando-se o sinal medido com o calculado.

Abstract

Multipath affects the carrier phase causing error in the measured receiver-satellite distance and carrier phase. Maybe for these reasons, multipath remains a major source of error in both, static and kinematic high accuracy positioning. Improvements have occurred only in the high frequency multipath, which has less intensity, provoked by objects farther away from the antenna. This paper presents a methodology aimed at evaluating multipath by introducing a temporal factor in the measurements. The assumption is that the geometry has a slow variation in a short period of time. L1 single difference carrier phase measurements that have been collected by two closely spaced antennas are used. These observables feed a filter that estimates multipath parameters, which are used for multipath mitigation. Multipath was analysed considering two satellites at different azimuth and elevation angles over consecutive days using the same geometry. The high daily repeatability was used to ascertain the presence of multipath. Some results have shown that the efficiency of the method is better than 60%, i.e., the percentage between the estimated multipath vis-à-vis the measured one.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos certos grupos de usuários têm preconizado o multicaminho como uma limitação crucial para suas aplicações, incluindo levantamentos GPS e o emergente "Wide Area Augmentation System" - WAAS. O multicaminho na fase da portadora GPS é a maior fonte de erro em posicionamentos estáticos e cinemáticos de alta precisão (Ray, 1999). Existem relativamente poucos trabalhos mostrando claramente a atenuação do multicaminho na fase da portadora a nível de receptor. Isto parece demonstrar que a atenuação dos efeitos do multicaminho nas medidas da fase da portadora apresenta-se como um problema substancialmente mais difícil do que nas medidas de pseudodistância (Weill, 1997). Alguns aspectos geométricos da reflexão em combinação com uma configuração especial de antenas foi explorado pela primeira vez por Becker et al. (1994), para rastrear e detectar o sinal com multicaminho em ambiente simulado. Um melhor uso deste aspecto foi feito por Ray & Cannon (1998) e Ray (1999), usando um conjunto de seis antenas ligadas à três receptores controlados por um oscilador externo de rubídio, e também em ambiente de multicaminho simulado. Os resultados são animadores, mais em

termos de detecção, do que de correção dos efeitos. Talvez os aspectos mais negativos desta metodologia sejam as grandes limitações de material (alto custo e difícil acesso) e de operacionalidade (a nível de fabricante de receptores), o que a limita a ambientes de pesquisa. O problema do multicaminho na fase da portadora permanece um desafio (Ray, 1999).

2 OBJETIVOS

Pretende-se mostrar a viabilidade de utilização da alta correlação de sinais em antenas próximas em intervalos curtos de tempo, para identificar e atenuar os efeitos do multicaminho nas medidas da fase das portadoras GPS, que se trata de um problema que ainda merece atenção. Desta forma, o presente trabalho busca alternativas que levem em conta a praticidade, precisão e economicidade, aproveitando-se a mesma linha geral de conceitos do trabalho com várias antenas, mas direcionando a linha da pesquisa para o trabalho com duas antenas, o que exige um amparo matemático diferente. Busca-se, ainda, dar um primeiro passo para o estudo do multicaminho no Brasil.

3 METODOLOGIA

O processamento dos sinais deve ser feito através de um único relógio, para eliminar os erros comuns nas medidas de tempo. Isto foi feito usando-se um receptor com capacidade para receber sinais de duas antenas. Utilizaram-se no experimento duas antenas modelo 501 acopladas a um receptor BeeLine, ambos cedidos pela fabricante, a empresa NovAtel, de Calgary, Canadá. O cenário do experimento foi o terraço do prédio do Departamento de Geodésia e Engenharia Geomática da Universidade de New Brunswick, em Fredericton, também no Canadá, com as antenas em um suporte rígido de metal com 1,30 m de altura do piso do terraço. Fez-se determinação das coordenadas precisas dos centros de fase das antenas e da geometria entre elas através de um levantamento relativo de mais de 3 horas usando-se como base um receptor Ashtech Z12 posicionado sobre um marco da Rede Geodésica Canadense e processado num programa comercial da empresa Trimble, no Laboratório de Pesquisas Geodésicas da Universidade de New Brunswick. Seus centros de fase distaram 11,431554 cm um do outro e a linha entre as antenas, designadas de 0 e 1, apresentou um azimute de $301^{\circ}36'47,872602''$. As rotinas para automatização dos procedimentos da pesquisa foram elaborados na versão 5.1.0.421 do pacote Matlab em computadores do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. Utilizaram-se os satélites 23 e 26 nos dias 19 e 20 de junho de 2000 (com horários de início e fim das sessões indicados nas figuras 5 e 6) mantendo-se uma defasagem de 3 minutos e 56 segundos (medidos em Tempo Universal Coordenado - UTC) entre as mesmas para coincidência da geometria do cenário. A figura 1 mostra um esquema do experimento projetado para o presente trabalho.

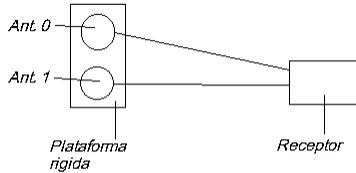


FIGURA 1 – Esquema do experimento com duas antenas em um único receptor. Fonte: O Autor.

4 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

4.1 O MODELO PARA O SINAL COM MULTICAMINHO

Segundo Braasch (1996), o sinal rastreado pelo receptor é dado pela seguinte expressão:

$$s(t) = d(t) c(t) A \sum_{i=0}^n \alpha_i \cos(2\pi f_L t + \theta_0 + \frac{2\pi d_i}{\lambda}) \tag{1}$$

onde:

$s(t)$ = Sinal composto (sinal direto + sinal refletido);

$d(t)$ = Segmentos dos dados de navegação superimpostos no sinal;

$c(t)$ = Código C/A;

A = Amplitude do sinal da portadora;

α_i = Coeficientes do sinal direto e refletido correspondendo, na prática, a um sinal direto e um ou mais sinais refletidos ($0 \leq \alpha \leq 1$);

f_L = Frequência da portadora (Hz);

d_i = Atraso no caminho do sinal em relação ao sinal direto;

λ = Comprimento de onda do sinal GPS (m);

θ_0 = Fase inicial (rad).

Na equação (1) os termos d_i e α_i variam no tempo. O sinal direto tem índice zero ($i=0$), não havendo atraso em relação ao sinal direto ($d_0=0$) e o coeficiente de reflexão terá valor máximo ($\alpha=1$). Para o rastreo deste sinal, uma portadora local é gerada no receptor e controlada numericamente por um oscilador, sendo comparada com a fase e a frequência do sinal que chega. Segundo Parkinson et al. (1996), desprezando-se o efeito dos segmentos dos dados de navegação, este discriminador tem a seguinte saída:

$$\Psi = \arctg \left[\frac{\sum_{i=0}^n R(\tau - \delta_i) \alpha_i \sin(\psi + \frac{2\pi d_i}{\lambda})}{\sum_{i=0}^n R(\tau - \delta_i) \alpha_i \cos(\psi + \frac{2\pi d_i}{\lambda})} \right] \tag{2}$$

onde:

Ψ = Medida da fase da portadora (rad);

$R(\tau)$ = Função de auto-correlação;

δ_i = Atraso do sinal com multicaminho (s);

ψ = Verdadeira fase da portadora (rad).

Não havendo sinal refletido tem-se $\alpha_0 = 1$, $\alpha_1, \dots, \alpha_n = 0$ e $\delta_0 = 0$, logo, $\Psi = \psi$, fazendo com que a fase medida seja a fase imune ao multicaminho. Havendo sinal refletido, a expressão $\Delta\Psi = \Psi - \psi$ representa o erro na medida da fase da portadora devido ao multicaminho, ou seja, a diferença entre esses dois sinais.

4.2 MODELO PARA O ERRO DEVIDO AO MULTICAMINHO NAS MEDIDAS DA FASE DA PORTADORA

Vários pesquisadores descrevem o efeito do multicaminho na fase da portadora (Nee – 1995, Braasch - 1996 e Ray - 1999). É possível assumir um único refletor virtual com parâmetros (coeficiente de reflexão e posição) que variam com o tempo e que represente todos os objetos refletores nas proximidades da antena. A expressão da variação desses parâmetros com o tempo representa o erro devido ao multicaminho em uma determinada antena (Ray & Cannon, 1998) é:

$$\Delta\Psi = \arctg \left[\frac{R(\tau - \delta)\alpha \sin \gamma}{R(\tau) + R(\tau - \delta)\alpha \cos \gamma} \right] \quad (3)$$

onde:

$\Delta\Psi$ = Erro devido ao multicaminho (rad);

R = Função de auto-correlação;

τ = Atraso do sinal direto em relação ao código gerado no receptor (s);

δ = Atraso do sinal com multicaminho em relação ao sinal direto (s);

α = Coeficiente de reflexão;

γ = Fase do sinal refletido (rad).

A equação (3) mostra que são três os parâmetros do multicaminho: coeficiente de reflexão, fase do sinal refletido e atraso do sinal composto. Esta equação fica normalizada dividindo-se o seu numerador e o seu denominador por $R(\tau)$, surgindo a expressão $\alpha R(\tau - \delta)/R(\tau)$ que, designada por α_0 , dá origem a:

$$\Delta\Psi = \arctg \left\{ \frac{\alpha_0 \sin \gamma}{1 + \alpha_0 \cos \gamma} \right\} \quad (4)$$

A equação (4) relaciona o erro na fase da portadora devido ao multicaminho com a potência (ou amplitude, representada pelo coeficiente de reflexão e atraso devido ao caminho) e a fase do sinal refletido. Observa-se que esta simplificação corresponde a uma combinação de dois parâmetros do multicaminho, isto é, coeficiente de reflexão e atraso no caminho, originando um único parâmetro, chamado coeficiente modificado de reflexão, α_0 , diminuindo para dois o número de parâmetros do multicaminho. O erro devido ao multicaminho tem alta dependência da localização espacial relativa entre os objetos, especialmente antena e objeto refletor. Segundo Parkinson et al. (1996), Wellenhof (1994) & Seeber (1993), 1/4 do comprimento de

onda da portadora é um valor máximo para o erro devido ao multicaminho na fase. Desta forma, com as duas antenas estando muito próximas, o multicaminho afeta cada uma delas de forma similar, isto é, com alta correlação.

4.2.1 Sobre o coeficiente de reflexão

Estando as antenas próximas e, com a mesma orientação relativa, pode-se afirmar que uma eventual amplificação ou atenuação do sinal que chega de uma determinada direção é a mesma para ambas as antenas e, com isso, o coeficiente de reflexão também será o mesmo.

4.2.2 A variação do centro de fase da antena

As antenas estando muito próximas e com a mesma orientação relativa, este efeito é removido. É por este motivo, juntamente com a necessidade de se evitar variações nos parâmetros do multicaminho por motivos de movimento entre as antenas, que as mesmas são montadas sobre uma plataforma rígida.

4.2.3 Formulação matemática do erro

As considerações anteriores podem ser exploradas para, usando a equação para o erro devido ao multicaminho em uma antena em particular (4), calcular a diferença no erro da fase da portadora entre as duas antenas próximas, sendo uma delas usada como antena de referência em relação a outra, para cujos índices adotou-se "0" e "1", respectivamente. Esta expressão é formada simplesmente efetuando-se a subtração entre a expressão (4) com índices para a antena 0 e a mesma com índices para a antena 1, formando a expressão (5):

$$\Delta \Psi_{\text{of}} = \Delta \Psi_{\text{sen } \gamma_0} - \Delta \Psi_{\text{sen } \gamma_1} = \left[\frac{\alpha_0 \sin(\gamma_0 - \gamma_1)}{1 + \alpha_0 \cos \gamma_0 - \alpha_0 \cos \gamma_1 + \alpha_0^2 \cos(\gamma_0 - \gamma_1)} \right] \quad (5)$$

onde:

$\Delta \Psi_{01}$ = Diferença em erro devido ao multicaminho entre as antenas 0 e 1 (rad);

$\Delta \Psi_0$ = Erro devido ao multicaminho na antena 0 (rad);

$\Delta \Psi_1$ = Erro devido ao multicaminho na antena 1 (rad);

α_0 = Coeficiente de reflexão modificado para ambas as antenas;

γ_0 = Fase do sinal refletido na antena de referência (rad);

γ_1 = Fase do sinal refletido na antena que não a de referência (rad).

4.3 ESTIMAÇÃO DA FASE DO SINAL REFLETIDO

Para a fase do sinal refletido (γ), que aparece na equação (5) com índices 0 e 1, não vale o dito para o coeficiente de reflexão (mesmo valor para ambas as antenas), pois a fase deste sinal é altamente relacionada com o atraso no caminho satélite-receptor. Um atraso no caminho de 10 cm, por exemplo, causa uma variação de 180° na fase da portadora L1. Do ponto de vista geométrico, o sinal que sai de um satélite e chega a duas antenas próximas podem ser considerados paralelos, devido a grande distância satélite-receptor em comparação com a distância entre as antenas. Na

figura 2, recorre-se à descrição desta perspectiva geométrica para deduzir a expressão para a fase do sinal refletido. Pela observação desta figura nota-se que uma frente de onda plana e perpendicular à linha de visão (linha de propagação do sinal satélite-receptor) pode ser considerada como tendo a mesma fase da portadora para ambas as antenas. Após a reflexão na superfície refletora os sinais incidentes permanecem paralelos, e a propagação da fase tem lugar através do avanço da frente de onda. Assim, a fase do sinal refletido nos centros de fase das duas antenas próximas é função da direção (azimute e elevação) deste sinal e da geometria entre elas. Calculou-se esta direção através de levantamento de precisão apropriado (ver item 3).

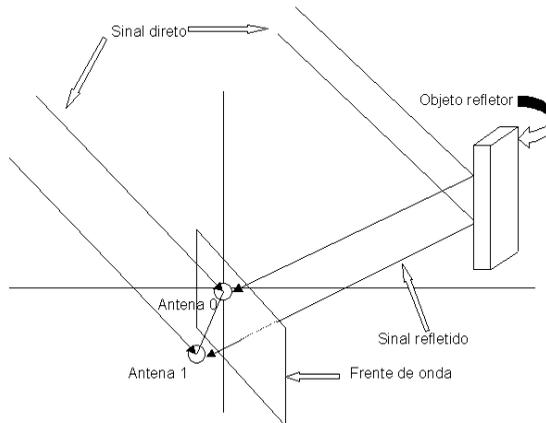


FIGURA 2 – Relação entre os erros devidos ao multicaminho nas duas antenas, correlacionados através da direção do sinal e da geometria (conhecida) entre as antenas. Fonte: RAY, J. K.; CANNON, M. E. Mitigation of Static Carrier Phase Multipath Effects Using Multiple Closely-Spaced Antennas. In ION GPS-98, Nashville, 1998. NOTA: Trabalhado pelo autor.

Assim, pode-se escrever a expressão para a fase da portadora na antena 1:

$$\lambda_1 = \gamma_0 + \frac{2\pi a_{01} \cos(\varphi_0 - \phi_{01}) \cos \theta_0}{\lambda} \quad (6)$$

onde

γ_0 = Fase do sinal na antena 0;

a_{01} = Distância entre as antenas 0 e 1;

φ_0 = Azimute do sinal refletido;

ϕ_{01} = Azimute do vetor formado pelos centros de fase das antenas 0 e 1;

θ_0 = Elevação do sinal refletido.

Com a expressão (6) conhece-se o valor da fase da portadora na antena de referência e da direção do sinal refletido a partir da mesma (uma vez que a geometria entre as antenas pode ser conhecida) e, a partir daí, calcula-se a fase da portadora na antena 1, reduzindo o número de incógnitas do sistema. Esses parâmetros do sinal refletido, portanto, devem ser estimados de algum modo.

4.3.1 - Estimação dos parâmetros do sinal refletido

Para efetiva estimação do multicaminho nas medidas da fase da portadora, todos os sinais com multicaminho que chegam à antena devem ser considerados. Pela metodologia aqui proposta os parâmetros do multicaminho são resultantes de todas as fontes reflexivas, calculando-se o efeito total do multicaminho. Para estimar esses parâmetros optou-se pelo uso do EKF (Brown & Hwang, 1992; Zhang, 1996; Oki Technical Review, 1999; Deutschmann - NASA, 1999). O vetor de estado contém os parâmetros a serem estimados pelo EKF: coeficiente de reflexão para ambas as antenas (α_0), fase do sinal refletido (γ_0), azimute do sinal refletido (φ_0) e elevação do sinal refletido (θ_0), todos na antena de referência. Os dois primeiros estão relacionados com a equação (5) e os dois últimos o estão com a equação (6).

4.3.2 - O vetor de medidas (observações) para o EKF

A observável utilizada para atualizar o vetor de estado é originada da simples diferença de fase entre antenas, por estar livre de erros devido ao atraso atmosférico, erros orbitais do satélite e erros do relógio do satélite. A expressão para as medidas é a seguinte (Ray, 1999, apud Lachapelle, 1997):

$$\Delta \Phi_{01} = \Delta \rho_{01} + \Delta N_{01} \lambda + c \Delta t_{01} + \Delta \varepsilon_{\varphi_{01}} + \Delta \varepsilon_{MP_{01}} \quad (7)$$

onde:

$\Delta \Phi$ = Medida de simples diferença de fase entre as antenas 0 e 1 (m);

$\Delta \rho$ = Diferença de distância devido à separação espacial entre as antenas (m);

ΔN = Diferença de ambigüidades inteiras;

$c \Delta t$ = Diferença no erro do relógio do receptor (m);

$\Delta \varepsilon_{\varphi}$ = Diferença no ruído da fase da portadora (m);

$\Delta \varepsilon_{MP}$ = Diferença no erro devido ao multicaminho na fase da portadora (m).

Os sinais oriundos das antenas foram processadas por um mesmo receptor (e, portanto, por um mesmo relógio). A diferença de distância devido à separação espacial entre as antenas (figura 3) é conhecida, logo, ela pode ser eliminada da equação (8) subtraindo-se o seu valor da simples diferença de fase medida entre as antenas (figura 4).

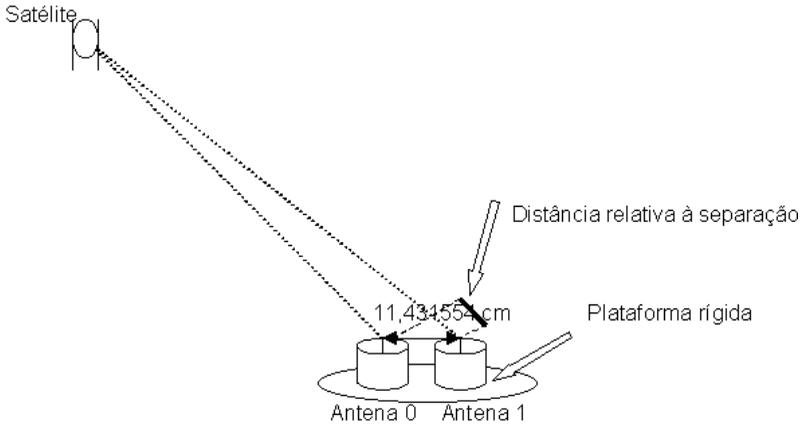


FIGURA 3 – Diferença de fase entre as antenas devido à separação espacial entre elas. fonte: O autor.

Além disso, como o erro devido ao multicaminho é menor que $1/4$ de ciclo, a diferença de fase devido à ambigüidade inteira relativa pode ser removida. Estas considerações permitem a formulação de uma nova expressão para a simples diferença de fase (chamada simples diferença de fase residual), e que representa somente a diferença de multicaminho e ruído da portadora (inerente ao receptor) entre as antenas. Assim, o vetor de observações fica formado pelas fases residuais em quatro instantes separados de um segundo menos a distância devido à separação espacial entre as antenas, ou seja, a cada quatro segundos tem-se um novo vetor de medidas.

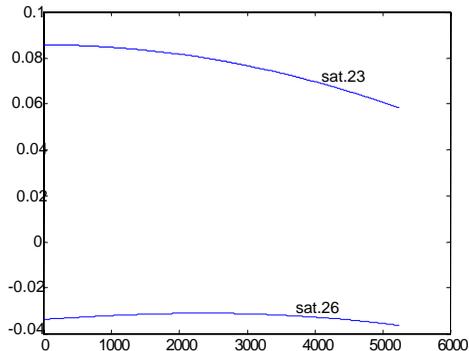


FIGURA 4 – Distância devido à separação espacial entre as antenas, em metros (eixo x em número de épocas transcorridas). Fonte: O autor

Designando-se o vetor de medidas por z , este vetor fica:

$$z = [\Delta\Psi'_{01-1}, \Delta\Psi'_{01-2}, \Delta\Psi'_{01-3}, \Delta\Psi'_{01-4}]^T,$$

onde os índices 1, 2, 3 e 4 indicam as quatro épocas com um segundo de intervalo em que as medidas foram feitas.

Este é um ponto crucial em relação à pesquisa com várias antenas, ou seja, o uso de quatro medidas da fase da portadora em épocas separadas de um segundo, somente é possível com o pressuposto de que a variação angular do satélite no espaço de tempo de quatro segundos (que é de 2 minutos de arco) não é significativa. As figuras 5 e 6 mostram os valores que formam o vetor de medidas para os satélites 23 e 26 em sessões nos dias 19 e 20 de junho de 2000, mostrando o número de épocas transcorridas e os horários de início e fim das sessões em Tempo Universal Coordenado – UTC, onde pode-se observar a diferença de horário de 3min36sewg. Para observar a repetibilidade diária destes sinais, recorreu-se ao coeficiente de correlação fornecido em rotina pronta a partir do pacote Matlab.

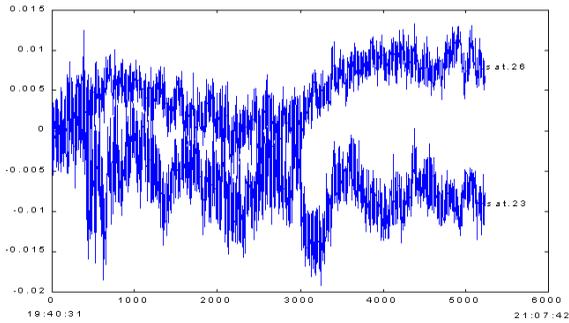


FIGURA 5 – Diferença de multicaminho entre as antenas, em metros, para o dia 19 de junho de 2000.

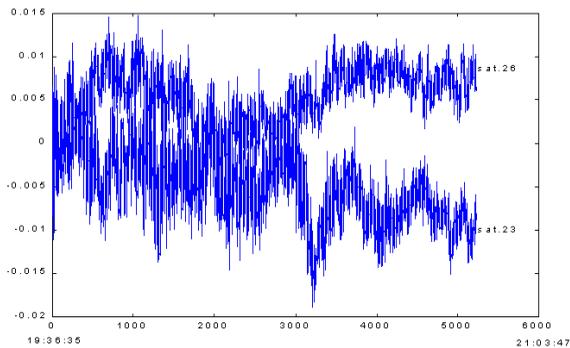


FIGURA 6 – Diferença de multicaminho entre as antenas, em metros, para o dia 20 de junho de 2000. FONTE: O autor.

A repetibilidade média entre os dois dias foi de 56% para o satélite 23 e de 70% para o satélite 26, com valores próximos a 1,5 cm de multicaminho, em ambos os casos.

4.3.3 Vinculação das medidas com o vetor de estado

Para formular uma expressão em que todas as medidas fiquem em função dos parâmetros de estado, substitui-se a equação (6) na equação (5), derivando-se a equação a mesma em relação a cada um dos quatro parâmetros para cada uma das quatro observações.

4.3.4 A codificação do EKF

Procedeu-se a automatização do EKF e demais rotinas necessárias à demonstração e verificação de viabilidade da metodologia proposta, no sistema Matlab, com busca das observações da fase da portadora nos arquivos RINEX e mecanismos de "loop" para o processamento automático do filtro a cada novo conjunto de observações. É exigido um EKF para cada satélite rastreado.

4.4 CÁLCULO DO ERRO DEVIDO AO MULTICAMINHO

Uma vez obtidos os parâmetros do sinal refletido, através do filtro, usam-se as equações (6) e (4) para calcular a fase do sinal refletido e o erro devido ao multicaminho em cada uma das antenas.

4.5 O USO DAS DIFERENÇAS DE FASE CORRIGIDAS DO EFEITO DO MULTICAMINHO COMO VERIFICAÇÃO

As estimativas das diferenças no erro devido ao multicaminho calculado entre as antenas subtraídas do sinal originalmente medido, fornecem um sinal cujo percentual de suavização, comparados através do desvio-padrão, permitiu verificar a eficiência do método proposto na identificação e atenuação do multicaminho.

6 RESULTADOS

As figuras a seguir mostram os resultados do trabalho. A figura 8 mostra a diferença entre o multicaminho calculado para cada antena para o satélite 23 no dia 19 de junho de 2000. Na figura 9 este valor aparece subtraído do sinal medido, originando um sinal cujo percentual de suavização, medido através do desvio-padrão, fornece a eficiência do método em detectar o multicaminho.

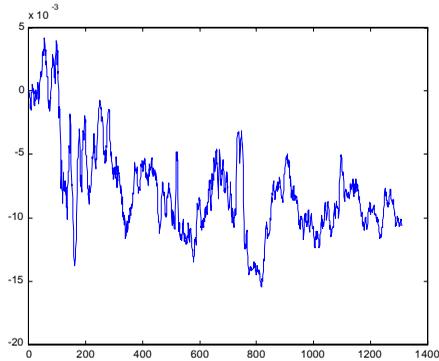


FIGURA 8 – Diferença entre os erros devidos ao multicaminho calculados para cada antena em relação ao satélite 23 dia 19 de junho de 2000

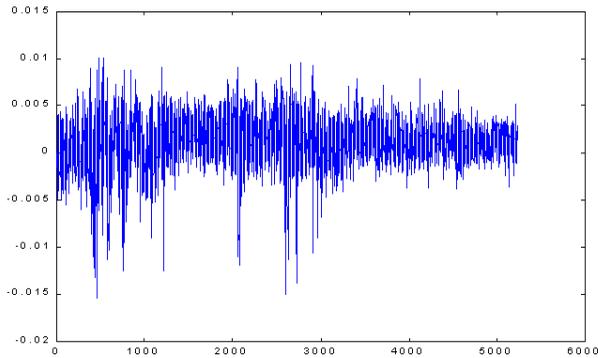


FIGURA 9 – Sinal suavizado (multicaminho medido menos o calculado), em metros, para o satélite 23 no dia 19 de junho de 2000 (eixo x em número de épocas transcorridas) FONTE: O autor

A eficiência média calculada para os dois dias ficou em 67% para este satélite 23.

7 - CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com o método apresentado neste trabalho, mostram a grande validade do aproveitamento da alta correlação de sinais em antenas próximas em curtos intervalos de tempo, para a identificação, e conseqüente atenuação, do multicaminho estático, partindo do pressuposto da pequena variação da geometria espacial do cenário durante os intervalos de tomadas das medidas alimentadoras do EKF. Esta metodologia pode ser usada não somente como uma alternativa prática e econômica para gerar medidas de fase mais precisas, especialmente para usuários

finais, como também para o modelamento do multicaminho em um determinado ambiente, bem como auxiliar na pesquisa deste fenômeno. A única limitação que o método parece apresentar é o fato de somente ser válido para ambientes estritamente estáticos, ou seja, havendo dinâmica entre as antenas e os objetos refletoras, os resultados podem não ser satisfatórios.

10 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BECKER, D.; THIEL, K.H.; HARTL, P. A Special Method of Managing Multipath Effects. In ION GPS-94, Salt Lake City, 1994.
- BRAASCH, M.S. Multipath Effects, Global Positioning Systems: Theory and Applications. American Institute of Aeronautics and Astronautics, vol. 1, 1996.
- BROWN, R.G.; HWANG, P.Y.C. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering. 2. ed. New York : John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- DEUTSCHMANN, Julie; BAR - ITZHACK, Itzhack (<http://fdd.gsfc.nasa.gov/gmod/papdeut/abstr.html>) Attitude and Trajectory Estimation Using Earth Magnetic Field Data - Extended Kalman Filter Algorithm. 29 de setembro de 1999.
- NEE, V. The Multipath Estimating Delay Lock Loop: Approaching Theoretical Accuracy Limits. In IEEE PLANS, Las Vegas, 1995.
- OKI ELECTRIC INDUSTRY Co., Ltd. (www.obd.com/oki/otr/html/nf/otr-159-06-2.html) Extended Kalman Filter and Its Problems. Julho de 1999.
- PARKINSON, B.W. et al. Global Positioning System: Theory and Applications. 3. ed. vol. I. Washington, DC : American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1996.
- RAY, J. K.; CANNON, M. E. Mitigation of Static Carrier Phase Multipath Effects Using Multiple Closely-Spaced Antennas. In ION GPS-98, Nashville, 1998.
- RAY, J. Use of Multiple Antennas to Mitigate Carrier Phase Multipath in Reference Stations. In ION GPS-99, Nashville, 1999.
- SEEBER, G. Satellite Geodesy - Foundations, Methods and Applications. New York : Walter Gruyter, 1993.
- WEILL, L.R. Conquering Multipath: The GPS Accuracy Battle. GPS World, abril, p. 59-66, 1997.
- WELLENHOF, B.H.; LICHTENEGGER, H. Global Positioning System Theory and Practice. 3. ed. New York : Springer-Verlag Wien, 1994.
- WELLS, D. et al Guide to GPS Positioning. Fredericton : Canadian GPS Associates, 1987.
- ZHANG, Zhenyou (www-sop.inria.fr/robotvis/personnel/zzhang/Publis/Tutorial-Estim/node16.html) Extended Kalman Filter. 6 de fevereiro de 1996.

(Recebido em 10/10/00. Aceito para publicação em 30/11/00.)