

ATENUAÇÃO DE ERROS SISTEMÁTICOS NO POSICIONAMENTO RELATIVO GPS UTILIZANDO DADOS DE RECEPTORES DE SIMPLES FREQUÊNCIA

Daniele Barroca Marra Alves¹
João Francisco Galera Monico²
Messias Meneguette Jr.³

¹Universidade Estadual Paulista – UNESP – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas – danibarroca@pos.prudente.unesp.br

²Universidade Estadual Paulista – UNESP – Departamento de Cartografia – galera@prudente.unesp.br

³Universidade Estadual Paulista – UNESP – Departamento de Matemática, Estatística e Computação – messias@prudente.unesp.br

RESUMO

Erros sistemáticos podem ser parametrizados ou eliminados por técnicas apropriadas de observação. No posicionamento com o GPS, para linhas de base de comprimento médio e longo, as principais fontes de erros sistemáticos são a refração troposférica e ionosférica e os erros causados pelas órbitas dos satélites GPS. Mas, para linhas de base curtas, o multicaminho é mais relevante. Esses erros degradam a acurácia do posicionamento realizado com o GPS. Por isso, esse é um problema crítico para aplicações que requerem alta precisão no posicionamento GPS. Recentemente, um método tem sido utilizado para atenuar esses erros: o modelo semiparamétrico e a técnica dos mínimos quadrados com penalidades. Esse método utiliza uma spline cúbica natural para modelar os erros como funções que variam suavemente com o tempo. As funções de erros sistemáticos, ambigüidades e coordenadas de interesse, são estimados simultaneamente. Como resultado, as ambigüidades e coordenadas de interesse são estimadas com melhor confiabilidade e acurácia que no método dos mínimos quadrados convencional. Além disso, a solução requer um menor intervalo de tempo de coleta de dados, minimizando custos. Em todos os testes realizados, foi possível verificar uma considerável melhora na acurácia das coordenadas e na solução das ambigüidades utilizando o MMQ com Penalidades em relação ao MMQ convencional, com um reduzido intervalo de tempo de coleta de dados.

Palavras-chave: Erros Sistemáticos, Mínimos Quadrados com Penalidades, Modelo Semiparamétrico

MITIGATION OF SISTEMATIC ERRORS IN GPS RELATIVE POSITIONING USING SINGLE FREQUENCY RECEIVERS DATA

ABSTRACT

Systematic errors can be modeled or eliminated by appropriate observation techniques. In GPS positioning, for medium and long baselines, the major systematic error source are the ionosphere and troposphere refraction and the GPS satellites orbit errors. But, in short baselines, the multipath is more relevant. These errors degrade the accuracy of the positioning accomplished by GPS. So, this is a critical problem for high precision GPS positioning applications. Recently, a method has been suggested to mitigate these errors: the semiparametric model and the penalised least squares technique. It uses a natural cubic spline to model the errors as a function which varies smoothly in time. The systematic errors functions, ambiguities and station coordinates, are estimated simultaneously. As a result, the ambiguities and the station coordinates are estimated with better reliability and accuracy than the conventional least square method. Besides, the solution requests a shorter data collection interval, minimizing costs. In all accomplished tests, it was possible to verify a considerable improvement in the coordinates accuracy and in the ambiguities resolution using the Penalised Least Squares in relation to the conventional Least Squares, with a reduced data collection time interval.

Keywords: Systematic errors, Penalised Least Squares, Semiparametric Model

1. INTRODUÇÃO

O GPS é um sistema de abrangência global que permite ao usuário, em qualquer local da superfície terrestre, ou próximo a ela, dispor de no mínimo quatro satélites para serem rastreados, sem necessidade de intervisibilidade entre as estações, e independente das condições climáticas. Esse sistema tem como principal objetivo viabilizar a navegação de baixa, média e alta precisão (MONICO, 2000).

Além disso, o GPS tem se tornado uma tecnologia extremamente útil e inovadora para uma série de atividades que necessita de posicionamento. Pode-se citar aquelas relacionadas a Cartografia, Meio Ambiente, Controle de Frota de Veículos, Navegação Aérea e Marítima, Geodinâmica, Agricultura de Precisão, etc. A descrição de novas aplicações é uma constante em literaturas especializadas.

No entanto, as observáveis básicas GPS, que permitem determinar posição, velocidade e tempo, tal como todas as outras observáveis envolvidas nos processos de medidas, estão sujeitas a erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Para obter resultados confiáveis, o modelo matemático estabelecido deve ser válido para a realidade física que se tenta descrever e ser capaz de detectar problemas nas observáveis utilizadas. Dessa forma, todos os tipos de erros envolvidos no processo de medida devem ser considerados.

Erros aleatórios são inevitáveis, sendo, portanto, considerados uma propriedade inerente das observações (GEMAEL, 1994). Erros grosseiros (*outliers*) devem ser eliminados através do processo de controle de qualidade. Um procedimento extensivamente utilizado no campo da Geodésia é denominado *Detection, Identification and Adaptation* (DIA) (TEUNISSEN, 1998b). Erros sistemáticos podem ser parametrizados, isto é, modelados como parâmetros adicionais, ou eliminados por técnicas apropriadas de observação e/ou processamento. Esses erros podem não somente impedir uma confiável resolução de ambigüidades, como também degradar a acurácia dos resultados. Dentre os erros sistemáticos pode-se citar os erros da órbita dos satélites GPS, multicaminho, erros de refração atmosférica (refração troposférica e ionosférica), dentre outros (HOFMAN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 1997).

Para atenuar os efeitos dos erros sistemáticos e para melhorar a confiabilidade da resolução das ambigüidades e da estimativa das coordenadas de interesse, um estudo foi realizado no sentido de se aplicar o método dos Mínimos Quadrados com Penalidades (MMQ com penalidades) (JIA, STEWART e TSAKIRI, 2001), dentro do contexto do modelo semiparamétrico, usando uma spline cúbica natural (GREEN e SILVERMAN, 1994).

No modelo semiparamétrico os erros são modelados como funções que variam suavemente com o tempo. E mais, as funções de erros sistemáticos, ambigüidades e coordenadas de interesse são estimadas simultaneamente. Como resultado, a ambigüidade e as coordenadas de interesse são estimadas com melhor confiança do que com o MMQ convencional. Além disso, a solução requer um menor intervalo de tempo de coleta de dados, minimizando custos (ALVES, 2004).

Nesse artigo, o MMQ com Penalidades e o modelo semiparamétrico foram testados com o objetivo de atenuar erros sistemáticos no posicionamento relativo GPS. Quatro experimentos foram realizados. No primeiro experimento, com uma linha de base curta (2 Km), o multicaminho foi a principal fonte de erro. Mas, nos outros três experimentos, com linhas de base de comprimento médio (18 Km, 52 Km e 102 Km), a refração atmosférica e os erros orbitais foram predominantes. A revisão teórica, resultados e análises são apresentados nesse artigo.

2. ERROS SISTEMÁTICOS

Erros sistemáticos degradam a confiabilidade e acurácia do posicionamento realizado com o GPS. No posicionamento relativo, quando se utilizam as duplas diferenças (DD), o multicaminho é a maior fonte de erros sistemáticos para linhas de base curtas. No entanto, para linhas de base médias e longas, os erros causados pela refração atmosférica e pelas órbitas dos satélites GPS também tem grande destaque, principalmente a refração ionosférica (ALVES, 2003).

Para linhas de base curtas, a aplicação do método relativo (DD) reduz erros, como, por exemplo, do relógio do satélite, da órbita e da atmosfera, menos o de multicaminho. Isto provém do fato de que o multicaminho é um fenômeno altamente localizado. As fontes de multicaminho que afetam o receptor de uma estação de referência não causam, necessariamente, erros em um receptor móvel. Da mesma forma, fontes de multicaminho que afetam o receptor móvel podem não afetar a estação de referência (BRAASCH, 1996).

O multicaminho é causado, principalmente, por reflexões do sinal em superfícies próximas ao receptor, tais como construções, carros, árvores, colinas, etc (MONICO, 2000, p.145). Efeitos secundários são causados por reflexões no próprio satélite e durante a propagação do sinal (HOFMAN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e COLLINS, 1997). O multicaminho causa erros nas medidas de pseudodistância e de fase da onda portadora, dependendo da geometria do cenário envolvendo as antenas, os satélites e os objetos refletoras e da natureza do material reflexivo (FARRET, 2000). Conseqüentemente, a posição do objeto de interesse terá sua precisão e acurácia deterioradas. O erro

causado pelo multicaminho na fase da onda portadora pode chegar a 1/4 do comprimento de onda. Já para a pseudodistância esse erro pode alcançar ± 150 m (RAY, 2000).

Nesse sentido, várias técnicas têm sido desenvolvidas para atenuar o multicaminho. Estas técnicas incluem o uso de antenas especiais, arranjo de várias antenas, estratégia de localização da antena, técnicas de software, etc (BRAASCH, 1996; SEEGER, 2003; SOUZA, 2004). Mas, em geral, essas técnicas são muito difíceis ou de custo elevado.

No que concerne linhas de base de comprimento médio e longo, como as condições atmosféricas da estação base e móvel são diferentes, as DD não atenuam os erros causados pela refração atmosférica e pelas órbitas dos satélites. Assim, outras técnicas devem ser utilizadas para atenuar tais efeitos.

Em se tratando dos erros causados pela refração atmosférica, os erros causados pela troposfera e ionosfera podem ser comparados, mas a variabilidade dos erros da ionosfera é muito maior que da troposfera, e também é mais difícil para se modelar. Os erros da ionosfera podem variar de poucos metros a dezenas de metros, enquanto que na troposfera os erros no zênite estão geralmente entre dois e três metros (KLOBUCHAR, 1996).

A ionosfera é um meio dispersivo para a faixa de frequência do GPS, no qual o índice de refração é função da frequência utilizada. Assim, os usuários de GPS podem utilizar receptores de dupla frequência para tirar vantagem dessa propriedade, eliminando com isso os erros de primeira ordem através da utilização da observável *Ion Free* (KLOBUCHAR, 1996). Porém, usuários de receptores simples frequência não tem essa possibilidade. Além disso, a ionosfera apresenta variações diárias, sazonais, geográficas e de longo período (FORTES, 2002; CAMARGO, 1999), o que dificulta sua modelagem.

A troposfera é um meio não dispersivo, portanto ela não pode ser corrigida utilizando medidas de dupla frequência (SEEGER, 2003). Usualmente, as componentes úmida e hidrostática (seca) expressam a influência da troposfera nas medidas GPS (SAPUCCI, 2001). A componente úmida depende da quantidade de vapor d'água na atmosfera e é difícil de modelar. Mas ela é responsável por apenas 10% da refração troposférica total. Já a componente seca é precisamente descrita (com acurácia de $\pm 1\%$) por modelos. Os erros causados pelas componentes úmida e seca no zênite podem alcançar 0,80 m e 2,3 m, respectivamente aumentando aproximadamente 10 vezes próximo ao horizonte (10° de elevação) (SPILKER Jr., 1996).

No que se refere aos erros causados pela órbita dos satélites GPS, esses erros dependem do tipo de efeméride que é utilizada no ajustamento. Podem ser utilizadas as efemérides transmitidas pelos satélites, com erro de aproximadamente 2 m, ou as efemérides precisas fornecidas pelo *International GPS Service* (IGS), com erro de aproximadamente 10 cm para efemérides fornecidas em tempo real (IGS, 2004). A partir das efemérides são calculadas as posições dos satélites GPS, normalmente, injuncionadas como fixas durante o processo de ajustamento dos dados GPS. Erros nas coordenadas dos satélites se propagam para a posição do usuário.

3. SPLINES CÚBICAS NATURAIS

Para se trabalhar com o ajustamento e interpolação de funções, a aproximação por polinômios é muito conveniente, uma vez que os polinômios têm várias propriedades interessantes, dentre elas a analiticidade, que torna possível calcular as derivadas, de qualquer ordem, dos polinômios. Entretanto, a necessidade de muitas derivadas da função que está sendo aproximada por polinômios pode ser muito restritiva. Uma solução para isso é a utilização de polinômios por partes, pois dessa forma pode-se escapar da analiticidade no intervalo inteiro, permitindo descontinuidades das derivadas de ordem mais elevadas em alguns pontos. Essa característica de "pseudo analiticidade" confere às funções polinomiais por partes, chamadas splines, boas propriedades de aproximação, convergência e estabilidade (CUNHA, 2000).

Embora existam indicações de que funções suaves por partes tenham sido usadas por Euler (1707-1783) e outros autores, no início do século XX, deve-se a R. Courant e I. Shoemberg, respectivamente em 1943 e 1946, a formulação de splines que se usa hoje.

A teoria das splines foi desenvolvida a partir de necessidades práticas de aproximação. A origem do nome spline vem de uma régua elástica, usada em desenhos de engenharia, que pode ser curvada de forma a passar por um dado conjunto de pontos (x_i, y_i) (ROGERS e ADAMS, 1990). A curva definida pela régua pode ser descrita aproximadamente como uma função por partes, cada qual um polinômio cúbico, de tal forma que ela e suas duas primeiras derivadas são sempre contínuas. A terceira derivada, entretanto, pode ter descontinuidade nos pontos x_i (RUGGIERO, 1996). Essas splines mecânicas não são mais utilizadas hoje em dia, mas elas foram muito utilizadas na construção de navios e estradas de ferro.

A definição matemática de uma spline cúbica natural é dada a seguir. Dados os números reais t_1, \dots, t_n em algum intervalo $[a, b]$, satisfazendo $a < t_1 < t_2 < \dots < t_n < b$, uma função g definida sobre $[a, b]$ é uma spline cúbica se valerem as seguintes condições:

- Em cada intervalo $(a, t_1), (t_1, t_2), (t_2, t_3), \dots, (t_n, b)$, g é um polinômio cúbico;

- A primeira e segunda derivadas são contínuas em cada t_i e, portanto, contínuas no intervalo $[a,b]$. Uma spline cúbica sobre um intervalo $[a,b]$ será dita uma spline cúbica natural se as segunda e terceira derivadas são nulas em a e b (GREEN e SILVERMAN, 1994).

A spline cúbica natural é utilizada no MMQ com Penalidades. Para tanto, duas matrizes Q e R , advindas da definição de spline cúbica natural, serão definidas a seguir, pois serão utilizadas posteriormente.

Seja $h_i = t_{i+1} - t_i$ para $i = 1, \dots, n-1$. Seja Q uma matriz $n \times (n-2)$ com entradas q_{ij} , para $i = 1, \dots, n$, dada por (ALVES, 2004):

$$q_{j-1,j} = h_{j-1}^{-1}, q_{jj} = -h_{j-1}^{-1} - h_j^{-1} \text{ e } q_{j+1,j} = h_j^{-1},$$

para $j = 2, \dots, n-1$ e $q_{ij} = 0$ para $|i - j| \geq 2$.

A matriz simétrica R é $(n - 2) \times (n - 2)$ com elementos r_{ij} dada por:

$$r_{ii} = \frac{1}{3}(h_{i-1} + h_i) \quad i = 2, K, n-1$$

$$r_{i,i+1} = r_{i+1,i} = \frac{1}{6}h_i \quad i = 2, K, n-2$$

e $r_{ij} = 0$ para $|i - j| \geq 2$.

4. MODELO SEMIPARAMÉTRICO E MMQ COM PENALIDADES

No modelo semiparamétrico, o cálculo das variáveis é dividido em duas partes: a parte paramétrica e a não-paramétrica. Normalmente, a parte paramétrica é a de interesse do usuário. No caso do GPS, ela pode ser as DD das ambigüidades e as coordenadas da estação. A parte não-paramétrica representa uma combinação de algumas funções de erros que variam suavemente com o tempo.

O vetor semiparamétrico pode ser expresso por (JIA, STEWART e TSAKIRI, 2001; ALVES, 2004):

$$y_i = A_i x + M_i g(t_i) + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, K, n \quad (1)$$

onde:

- $y_i \in \mathbb{R}^m$ são as observações na i -ésima época (DD da fase da onda portadora e/ou da pseudodistância);
- $A_i \in \mathbb{R}^{m \times p}$ é a matriz dos coeficientes da equação (matriz *design*);
- $x \in \mathbb{R}^p$ é o vetor dos parâmetros a ser estimado envolvendo as ambigüidades da fase da onda portadora e as coordenadas de interesse;
- $M_i \in \mathbb{R}^{m \times q}$ é a matriz de incidência (ALVES (2004));
- $g(t_i) \in \mathbb{R}^q$ são as funções de erros;
- t_i é o índice de tempo;
- $\varepsilon_i \in \mathbb{R}^m$ é o vetor dos erros aleatórios na i -ésima época;
- n é o número de épocas;
- m é o número de observações por época;
- q é o número de funções de erros;
- p é o número de parâmetros de interesse a estimar.

A equação (1) contém $m \cdot n$ observações e $q \cdot n + p$ incógnitas. Dois casos podem ser considerados para tal equação. Primeiro, se o número de incógnitas é maior que o número de observações. Neste caso, a equação (1) não pode ser resolvida usando o MMQ convencional. Já no outro caso, mesmo com o número de incógnitas menor que o número de observações, a equação (1) pode não fornecer uma solução estável quando o MMQ convencional é usado, devido ao fato do número de incógnitas ser maior que o usual, pois as funções de erros ($g(t_i)$) também devem ser calculadas.

Para que se obtenha uma solução confiável, injeções adicionais, que correspondem à penalidade do ajustamento devem ser adicionadas. Trata-se do MMQ com penalidades. Dessa forma, a função a ser minimizada é dada por (JIA, STEWART e TSAKIRI, 2001):

$$\sum_{i=1}^n (y_i - A_i x - M_i g(t_i))^T \sum_{i=1}^{-1} (y_i - A_i x - M_i g(t_i)) + \sum_{j=1}^q \alpha_j \int (g_j''(t))^2 dt = \min \quad (2)$$

onde $\sum_{i=1}^{-1}$ é a matriz peso das observações, α_j é o parâmetro suavizador (seção 5) e $g_j''(t)$ é a segunda derivada da j -ésima função em relação ao tempo.

A equação (2) define a forma quadrática penalizada. A primeira parte da equação (2) refere-se a forma quadrática dos resíduos do MMQ, e a segunda parte ao termo de penalidade de aspereza.

Mas, para desenvolver os cálculos computacionalmente, a penalidade de aspereza pode ser expressa por (FESSLER, 1991):

$$\sum_{j=1}^q \alpha_j \int (g_j''(t))^2 dt = ((R^{-1} \otimes I_q) Q^T \otimes I_q) g^T (R \otimes D(\alpha)) ((R^{-1} \otimes I_q) Q^T \otimes I_q) g, \quad (3)$$

onde:

- Q e R são matrizes relacionadas com o índice de tempo t_i (seção 3);
- I_q é a matriz identidade $q \times q$;
- $D(\alpha) = \text{diag}(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_q)$;
- \otimes denota o produto de Kronecker.

Dessa forma, substituindo (3) em (2) e minimizando em relação a x e g , tem-se:

$$A^T(I_n \otimes \Sigma^{-1})Ax + A^T(I_n \otimes \Sigma^{-1})(I_n \otimes M)g = A^T(I_n \otimes \Sigma^{-1})y \quad (4)$$

e

$$\begin{aligned} & (I_n \otimes M^T)(I_n \otimes \Sigma^{-1})Ax + ((I_n \otimes M^T)(I_n \otimes \Sigma^{-1})(I_n \otimes M) + \\ & (Q \otimes D(\alpha))(R^{-1} \otimes I_q)(Q^T \otimes I_q))g = (I_n \otimes M^T)(I_n \otimes \Sigma^{-1})y \end{aligned} \quad (5)$$

sendo:

- $A = (A_1, A_2, \dots, A_n)^T$;
- I_n a matriz identidade $n \times n$;
- $\Sigma^{-1} = \Sigma_1^{-1} = \Sigma_2^{-1} = K = \Sigma_n^{-1}$
- $y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$;
- $g = (g_1^1, g_1^2, K, g_1^q, g_2^1, g_2^2, K, g_2^q, K, g_n^1, g_n^2, K, g_n^q)$.

As equações (4) e (5) podem ser resolvidas pelo método direto (GREEN e SILVERMAN, 1994), ou seja, substituindo a equação (5) em (4). Assim, utilizando o método direto em tais equações e realizando algumas manipulações matemáticas, tem-se:

$$\hat{x} = [A^T(I_n \otimes \Sigma^{-1})A - A^T(I_n \otimes \Sigma^{-1})A_s]^{-1}[A^T(I_n \otimes \Sigma^{-1})y - A^T(I_n \otimes \Sigma^{-1})y_s], \quad (6)$$

onde:

- $A_s = SA$ é a matriz *design* suavizada;
- $y_s = Sy$ é o vetor de observações suavizadas;
- S é a matriz de suavização dada por:

$$S = (I_n \otimes M)((I_n \otimes M^T)(I_n \otimes \Sigma^{-1})(I_n \otimes M) + (Q \otimes D(\alpha))(R^{-1} \otimes I_q)(Q^T \otimes I_q))^{-1} (I_n \otimes M^T)(I_n \otimes \Sigma^{-1}) \quad (7)$$

Além disso, para estimar g , usa-se:

$$\hat{g} = ((I_n \otimes M^T)(I_n \otimes \Sigma^{-1})(I_n \otimes M) + (Q \otimes D(\alpha))(R^{-1} \otimes I_q)(Q^T \otimes I_q))^{-1} (I_n \otimes M^T)(I_n \otimes \Sigma^{-1})(y - A\hat{x}). \quad (8)$$

5. PARÂMETRO SUAVIZADOR

O parâmetro suavizador (α) controla a suavidade da curva ajustada. Existem duas filosofias diferentes para a escolha do parâmetro suavizador. No primeiro procedimento, considera-se a escolha livre do parâmetro suavizador um vantajoso critério. Variando o parâmetro suavizador, algumas características dos dados podem ser exploradas. Mas, se uma única estimativa é desejada, esta pode ser obtida através de uma escolha subjetiva. Já o outro procedimento se opõe ao primeiro pois, nesse caso, a escolha do parâmetro suavizador deve ser automática, isto é, calculado a partir dos dados.

O procedimento automático é essencial em aplicações onde o método é aplicado para um grande número de conjuntos de dados, ou quando esse método é um componente de um processo mais complicado. Portanto, nesse trabalho um método automático é utilizado para escolher o parâmetro suavizador: a validação cruzada generalizada (*Generalized Cross Validation* - GCV). A figura 1 ilustra um caso onde o parâmetro suavizador é escolhido pela GCV.

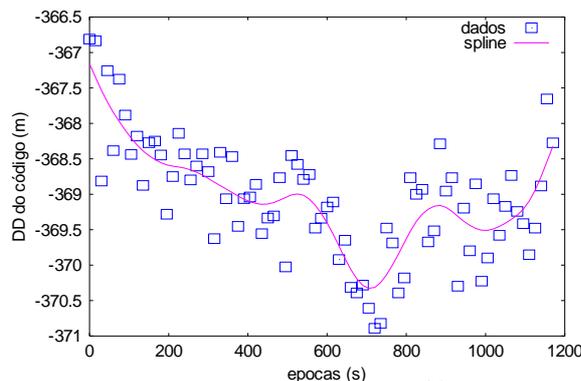


Figura 1 – Spline suavizadora para a DD^{2-15} do código
Fonte: ALVES (2004)

Note que a spline acompanha a tendência dos dados. Pode-se acrescentar que se α , escolhido arbitrariamente, é pequeno, a curva se aproximará de uma interpolação. Caso contrário, se α for muito grande, a curva se aproximará de uma regressão linear. Para mais detalhes consulte Alves (2004).

A função de validação cruzada generalizada é dada por:

$$GCV(\alpha) = \frac{1}{n} \frac{(y - A\hat{x} - (I_n \otimes M)\hat{g})^T (I_n \otimes \Sigma^{-1})(y - A\hat{x} - (I_n \otimes M)\hat{g})}{(m - trH / n)^2},$$

onde:

- $H(\alpha) = S + (I_{nm} - S)A(A^T(I_n \otimes \Sigma^{-1})(I_{nm} - S)A)^{-1}A^T(I_n \otimes \Sigma^{-1})(I_{nm} - S)$;
- n é o número de épocas;
- m é o número de observações por época.

A escolha do parâmetro suavizador na GCV é realizada pela minimização da função GCV em α . Por isso, um método de minimização deve ser utilizado. Nesse trabalho foi utilizado o método *Gold Search* (PRESS et al, 1986).

6. EXPERIMENTOS REALIZADOS E ANÁLISES

Para testar o MMQ com Penalidade e o modelo semiparamétrico, dados de quatro linhas de base, UEPP-TAKI (2 km), UEPP-REGE (18 km), UEPP-VENC (52 km) e UEPP-QUIN (102 km), foram utilizados. Os dados foram coletados nos dias 13 e 20 de setembro de 2003 para a primeira linha de base, e nos dias 1, 17 e 16 de julho de 2003 para as outras três. Nos quatro experimentos, UEPP foi considerada estação A base. UEPP é uma estação permanente da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) (FORTES, 1997), localizada no interior do estado de São Paulo. Ela coleta dados continuamente com um receptor Trimble 4000 SSI (dupla frequência). Nas estações móveis os dados foram coletados com um receptor Trimble 4600 LS de simples frequência e um Astech ZXII de dupla frequência. Mas, nesses experimentos, apenas os dados do receptor de simples frequência foram processados. Os dados do receptor de dupla frequência foram utilizados apenas para estimar as coordenadas verdadeiras para posterior comparação com os resultados obtidos. Em todos os experimentos os dados foram coletados apenas para ângulos de elevação acima de 15° com taxa de coleta de 15 s.

É necessário ressaltar que pesquisadores da FCT/UNESP estão desenvolvendo um software para processamento de dados GPS, chamado GPSeq (MACHADO e MONICO, 2002). O GPSeq foi implementado com o MMQ convencional recursivo (MMQ1), onde as DD da fase da onda portadora e da pseudodistância são as observáveis básicas, mas apenas para em L1. O MMQ com Penalidades (MMQP), desenvolvido pela autora, também foi implementado no GPSeq. Portanto, nesse artigo, os resultados obtidos pelo MMQ1 e o MMQP foram comparados.

Durante o processamento dos dados a taxa de coleta original foi mantida. Efemérides transmitidas foram utilizadas para calcular a posição dos satélites GPS e não foram utilizados modelos ionosféricos ou troposféricos. O método *Least Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment* (LAMBDA) (TEUNISSEN, 1998a) foi utilizado para solucionar as ambigüidades. A validação da ambigüidade foi realizada utilizando o teste *ratio* (TEUNISSEN, 1998a).

O primeiro experimento teve como objetivo principal verificar se o MMQ com Penalidades seria eficiente na atenuação do efeito do multicaminho nos sinais GPS. Por isso, uma linha de base curta foi utilizada, UEPP-TAKI (2 km), onde os efeitos atmosféricos e das órbitas foram atenuados pelas DD. Para tanto, inicialmente, os dados foram coletados próximo a uma superfície refletora (uma carreta), que distava 6 m dos receptores, estava a 1,3 m do chão e tinha 13 m e 2,5 m de comprimento e altura respectivamente (figura 2). Posteriormente, a carreta foi retirada e uma outra coleta de dados foi realizada no mesmo local, considerando o mesmo intervalo de tempo. Esta segunda coleta foi realizada apenas para calcular as coordenadas verdadeiras.



Figura 2 - Coleta de dados com superfície refletora realizada na empresa Takigawa no Município de Presidente Prudente

Foram processados dois subconjuntos de dados com 5 e 10 min respectivamente, com 8 satélites disponíveis. As discrepâncias das coordenadas em relação às coordenadas consideradas verdadeiras para o MMQ1 e o MMQP são ilustradas na figura 3.

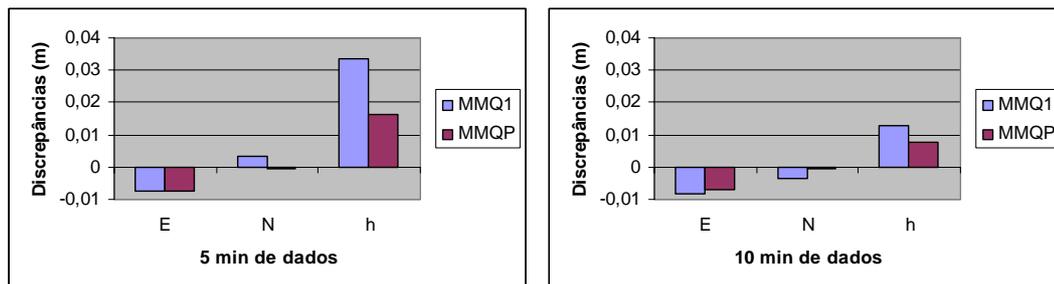


Figura 3 - Discrepâncias em relação às coordenadas consideradas verdadeiras para o experimento UEPP-Takigawa com intervalo de 5 min e 10 min de dados

Note que, para os dois conjuntos de dados, as discrepâncias obtidas pelo modelo semiparamétrico utilizando o MMQP em relação às coordenadas verdadeiras são muito menores do que no MMQ1. Isto se deve, provavelmente, a eficiência do método proposto na mitigação do multicaminho sistemático.

Em relação à solução da ambigüidade, a figura 4 mostra os valores obtidos pelo teste *ratio*.

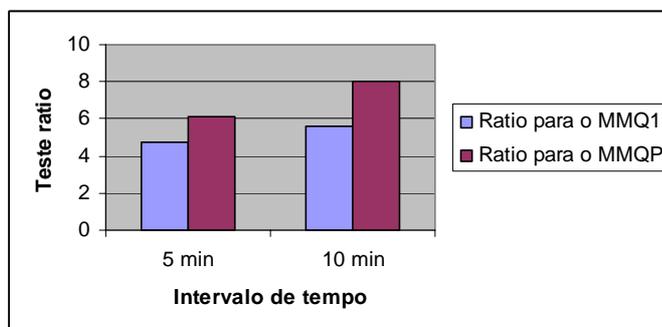


Figura 4 - Teste *ratio* para o experimento UEPP-TAKI com intervalo de 5 min e 10 min de dados

Observando a figura 4 pode-se notar que o MMQP apresenta os maiores valores para o teste *ratio*. Isso indica que a solução possui melhor confiabilidade no MMQP do que no MMQ1. Além disso, para um maior tempo de processamento o valor do teste *ratio* aumentou.

Em se tratando dos outros três experimentos, o objetivo era verificar se o MMQP é eficaz na atenuação dos erros causados pela refração atmosférica e pelas órbitas dos satélites GPS, para linhas de base de comprimento médio. Para tanto, três linhas de base foram utilizadas, UEPP-REGE (18 km), UEPP-VENC (52 km) e UEPP-QUIN (102 km). Dois conjuntos de dados, com 5 e 10 min, foram processados para cada linha de base. Os dados utilizados foram coletados por volta das 14 h local, momento no qual os efeitos causados pela ionosfera são mais relevantes.

É necessário ressaltar que no experimento UEPP-REGE apenas 6 satélites foram rastreados. No entanto, para as outras linhas de base, 7 satélites estavam envolvidos. As figuras 5 e 6 ilustram as discrepâncias em relação as coordenadas consideradas verdadeiras para os experimentos UEPP-REGE e UEPP-VENC respectivamente.

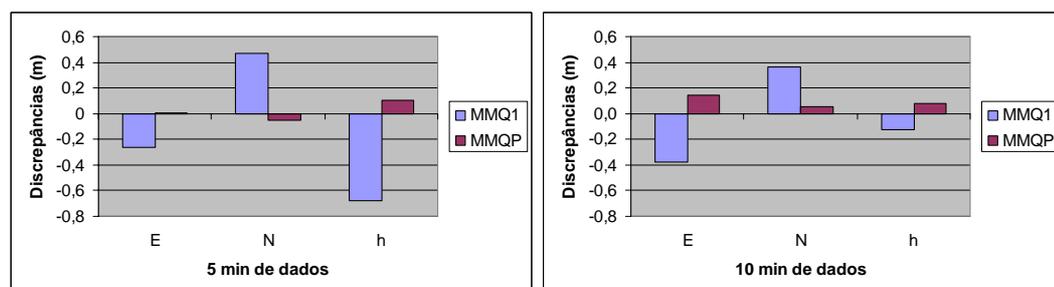


Figura 5 - Discrepâncias em relação às coordenadas consideradas verdadeiras para o experimento UEPP-REGE com intervalo de 5 min e 10 min de dados

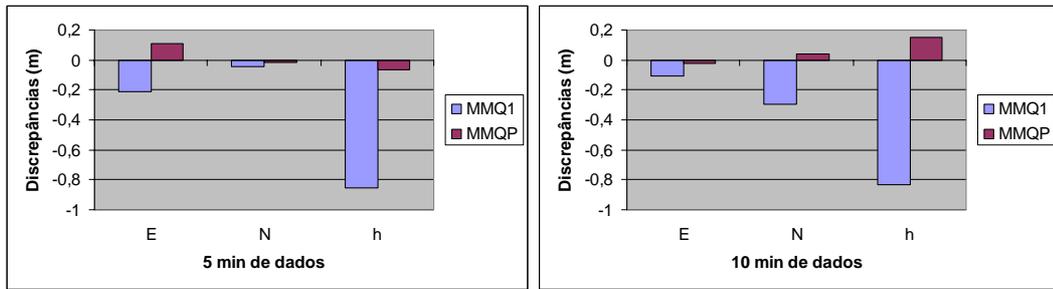


Figura 6 - Discrepâncias em relação às coordenadas consideradas verdadeiras para o experimento UEPP-VENC com intervalo de 5 min e 10 min de dados

É necessário salientar que apenas as coordenadas da estação de Regente foram calculadas utilizando a ambigüidade fixa. Para as demais estações foram utilizados os valores *float* da ambigüidade, devido à pequena confiabilidade na solução (figuras 8 e 9). A figura 7 ilustra as discrepâncias para o experimento UEPP-QUIN.

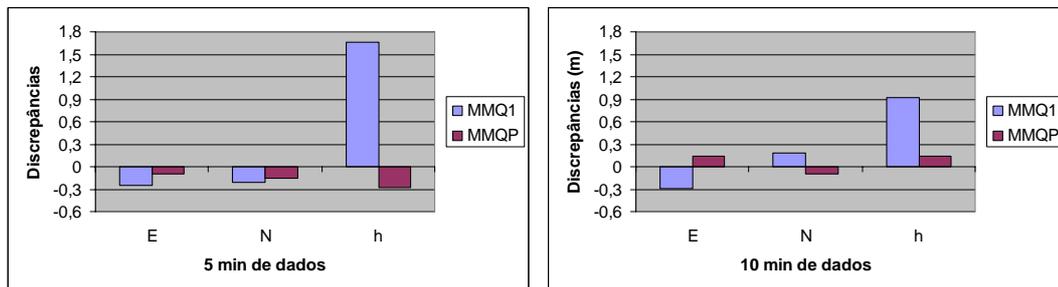


Figura 7 - Discrepâncias em relação às coordenadas consideradas verdadeiras para o experimento UEPP-QUIN com intervalo de 5 min e 10 min de dados

Note que para todos os conjuntos de dados, as discrepâncias obtidas pelo modelo semiparamétrico utilizando o MMQP em relação às coordenadas verdadeiras são muito menores do que no MMQ1, mostrando a eficiência do método proposto para linhas de base de comprimento médio e curto intervalo de tempo de processamento dos dados.

Para analisar a solução da ambigüidade, também foi utilizado o teste *ratio*. As figuras 8 e 9 mostram os resultados.

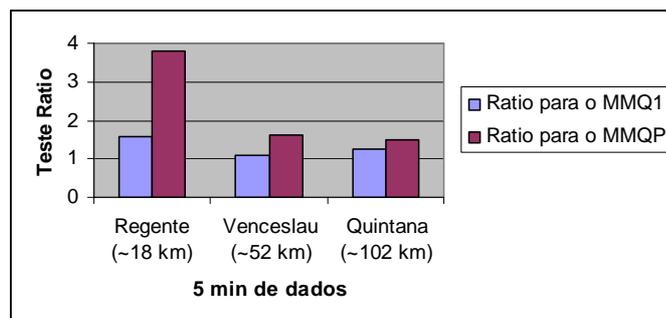


Figura 8 - Teste *ratio* para o experimento UEPP-REGE, UEPP-VENC e UEPP-QUIN com intervalo de 5 min de dados

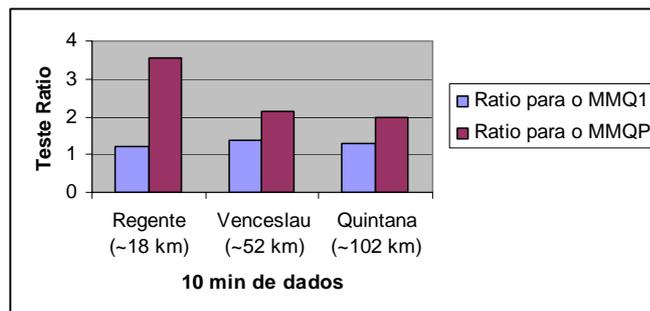


Figura 9 - Teste *ratio* para o experimento UEPP-REGE, UEPP-VENC e UEPP-QUIN com intervalo de 10 min de dados

Note que, como esperado, para as linhas de base mais longas o valor do teste *ratio* diminui em ambos os casos. No entanto, para o método proposto, o seu valor foi sempre maior. Além disso, para 10 min de dados o valor do teste *ratio*, em geral, aumentou.

7. CONCLUSÕES

Neste artigo, o MMQ com Penalidades e o Modelo semiparamétrico foram utilizados para atenuar erros sistemáticos no posicionamento relativo GPS. Para testar esse método, quatro experimentos foram realizados. No primeiro experimento, com uma linha de base curta, o multicaminho foi a principal fonte de erro. Mas, nos outros três experimentos, com linhas de base de comprimento médio, a refração atmosférica e os erros orbitais foram predominantes.

Os resultados mostraram que em todos os experimentos as discrepâncias das coordenadas obtidas pelo MMQ com Penalidades foram menores se comparadas com o MMQ convencional. Além disso, os valores do teste *ratio* foram sempre maiores para o MMQ com Penalidades. Isto indica que a solução obtida pelo método proposto é mais confiável que a do MMQ convencional. Com isso, pode-se concluir que os resultados mostraram que o método proposto é eficiente na mitigação de erros sistemáticos no posicionamento relativo GPS.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, D. B. M. **Método dos Mínimos Quadrados com Penalidades: Aplicação no posicionamento relativo GPS**. 2004. 133f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

_____; MONICO, J. F. G.; MENEGUETTE, M. Atenuação dos efeitos da ionosfera no posicionamento relativo GPS de alta precisão utilizando a técnica dos mínimos quadrados penalizados. In: III COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 2003, Curitiba. **Anais...**, 2003.

BRAASCH, M. S. A Signal Model for GPS, **Navigation**. v. 37, n. 4, p. 363-377, 1991.

CAMARGO, P. O. **Modelo regional da ionosfera para uso em posicionamento com receptores GPS de uma frequência**. 1999. 191f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CUNHA, M. C. **Métodos Numéricos**. 2.ed. Unicamp, 2000. 263p.

FARRET, J. C. **O efeito do multicaminho estático nas medidas da fase das portadoras GPS**. 2000. 132 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésias) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

FESSLER, J. A. Nonparametric Fixed-Interval Smoothing With Vector Splines. In: IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, 1991. **Proceedings...** v.39, p.852-859.

FORTES, L. P. S. **Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC)**. 1997. 152f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Sistemas e Computação) – Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro.

_____. **Optimising the Use of GPS Multi-Reference Stations for Kinematic Positioning**. 2002. 355f. Tese (PhD) – University of Calgary, Calgary.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações Geodésicas**. Curitiba: UFPR, 1994. 319p.

GREEN, P. J.; SILVERMAN, B. W. **Nonparametric Regression and Generalized Linear Models: a roughness penalty approach**. 1.ed. London: Chapman & Hall, 1994. 182p.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS Theory and Practice**. 4 ed. Wien: Springer-Verlage, 1997. 326p.

IGS - International GPS Service . **IGS PRODUCTS**. Disponível em: <<http://igs.cb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>>. Acesso em: 13 jan. 2004.

JIA, M.; STEWART, M.; TSAKIRI, M. Mitigation of Ionospheric Errors by Penalised Least Squares Technique for High Precision Medium Distance GPS Positioning. In: KIS 2001, Banff, Canada. **Proceedings...**, 2001. 1 CDROM.

KLOBUCHAR, J. A. Ionospheric Effects on GPS. In: PARKINSON, B. W.; SPILKER Jr., J. J. **Global Positioning System: Theory and Applications**. Cambridge: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. v.1, p.485-515.

MACHADO, W. C.; MONICO, J. F. G. Utilização do software GPSeq na solução rápida das ambigüidades GPS no posicionamento relativo cinemático de bases curtas. **Pesquisa em Geociências**, Porto Alegre, p.89-99, 2002.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**. 1.ed. São Paulo: Unesp, 2000. 287p.

PRESS, W. H. et al. **Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing**. Cambridge University Press, 1986.

RAY, J. K. **Mitigation of GPS Code and Carrier Phase Multipath Effects Using a Multi-Antenna System**. 2000. 260p. Dissertação (MSc) – University of Calgary, Calgary.

ROGERS, D. F.; ADAMS, J. A. **Mathematical Elements for Computer Graphics**. 2. ed. McGraw-Hill, 1990. 611p.

RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. R. **Cálculo Numérico: Aspectos Teóricos e Computacionais**. 2.ed. São Paulo: MAKRON Books, 1996. 406p.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e a avaliação do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. 2001. 167 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications**. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589p.

SIDC – Solar Influence Data Analysis Center. **Sunspot Index Graphics**. Disponível em: <<http://sidc.oma.be/html/wolfmms.html>>. Acesso em: 23 jun. 2003.

SOUZA, E. M. **Efeito do multicaminho de alta frequência no posicionamento relativo GPS estático: detecção e atenuação utilizando wavelets**. 2004. 141 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

SPILKER Jr., J. J. Tropospheric Effects on GPS. In: PARKINSON, B. W.; SPILKER Jr., J. J. **Global Positioning System: Theory and Applications**. Cambridge: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. v.1, p.517-546.

TEUNISSEN, P. J. G. GPS Carrier Phase Ambiguity Fixing Concepts. In: TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. **GPS for Geodesy**. 2ed. Berlin: Springer Verlage, 1998a, p.271-318.

TEUNISSEN, P. J. G. Quality Control and GPS. In: TEUNISSEN, P. J. G.; KLEUSBERG, A. **GPS for Geodesy**. 2ed. Berlin: Springer Verlage, 1998b, p.271-318.

UNIVERSITY OF LEICESTER. **Ionospheric Physics: The electron concentration profile**. Disponível em: <<http://ion.le.ac.uk/ionosphere/profile.html>>. Acesso em: 23 jun. 2003.

TODD, J. **Survey of Numerical Analysis**. McGraw-Hill Book Company, 1962. 589p.

9. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com recursos financeiros da FAPESP (Processo nº 01/11858-9) mediante atribuição de bolsa de mestrado à primeira autora.