

ASSIMILAÇÃO DE PRODUTOS GNSS-METEOROLOGIA NO LETKF: ZTD OU IWV QUAL A MELHOR OPÇÃO?

LUIZ FERNANDO SAPUCCI, DÉREK SCHUBERT VALÉRIO DE SOUZA

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Centro de Previsão de Tempo e Estudos climáticos - CPTEC
Cachoeira Paulista - SP, Brasil.
{luiz.sapucci;derek.schubert}@cptec.inpe.br.

RESUMO – Os produtos GNSS (*Global Navigation Satellite System*) meteorologia são basicamente dois: valores do atraso zenital troposférico (*ZTD-Zenithal Tropospheric Delay*) e valores do vapor d'água integrado na coluna atmosférica (*IWV-Integrated Water Vapor*), os quais têm boas perspectivas para gerar melhorias na Previsão Numérica de Tempo (PNT) com o emprego das redes ativas no Brasil. O Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) é um método de ajustamento de observações que gera uma condição inicial mais adequada para o melhor desempenho do modelo de previsão numérica de tempo. O sistema LETKF é inovador e apresenta vantagens com relação aos métodos variacionais, em especial na simplificação da inclusão de novos sistemas de observações. Entre os valores do ZTD e IWV a opção óbvia é a utilização do primeiro, pois exige menos processamento e não requer observações meteorológicas junto a antena. No entanto, a atual densificação das redes GNSS no Brasil, tem contemplado sensores meteorológicos visando à assimilação operacional de dados, o que faz necessário reavaliar a utilização de valores do IWV ao invés de se utilizar valores do ZTD. O objetivo desse trabalho é discutir os prós e contras da assimilação de cada uma dessas variáveis dentro do processamento por conjunto usando o LETKF.

Palavras chave: GNSS Meteorologia, Assimilação de dados, Atraso Zenital Troposférico, IWV.

ABSTRACT - The meteorological products from GNSS (*Global Navigation Satellite System*) are basically two: zenithal tropospheric delay (ZTD) values and integrated water vapor (IWV) values, which can generate benefits for Numerical Weather Prediction (NWP) with the assimilation of data from active GNSS networks in Brazil. The Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF) is a method of adjustment of observation that generates the most appropriate initial condition for the best performance of the NWP models. The LETKF system is innovative and presents several advantages in comparison with variational methods, in particular in the simplification of the inclusion of new observation systems. The obvious option in the data assimilation of ZTD or IWV values is the first one, because it requires less processing and doesn't require meteorological observations near GNSS antenna. However, meteorological sensors have been installed in the current densification of the GNSS networks in Brazil. The objective is providing humidity measurement of good quality for operational data assimilation, which makes necessary to rethink the utilization of IWV values instead of ZTD values. The objective of this paper is to discuss the pros and cons of the assimilation of these variables using LETKF system.

Key words: GNSS meteorology, Data assimilation, Zenithal Tropospheric Delay, Integrated Water Vapor.

1 INTRODUÇÃO

O *Local Ensemble Transform Kalman Filter* (LETKF) é basicamente um método de ajustamento de observações que tem por objetivo gerar condições iniciais mais adequadas para o melhor desempenho do modelo de previsão numérica de tempo (PNT). A ideia básica é modificar as previsões de curto prazo desse modelo levando-as para os valores observados. Esse processo é denominado na PNT por assimilação de dados. O Sistema

LETKF é inovador e apresenta diversas vantagens com relação aos métodos variacionais, uma vez que estando desconectado do modelo de previsão, é possível incluir novas observações sem complexas implementações.

Nesse contexto os produtos meteorológicos derivados do processamento dos dados GNSS coletados em receptores a superfície (linha de pesquisa conhecida por GNSS meteorologia) podem ser testados nesse sistema sem grandes esforços. São basicamente dois produtos: os valores do atraso zenital troposférico (ZTD-

Zenithal Tropospheric Delay) e os valores do vapor d'água integrado na coluna atmosférica (IWV-Integrated Water Vapor). A diferença básica entre eles é que para a conversão de valores do ZTD em valores do IWV há a necessidade de que valores de pressão atmosférica com qualidade sejam coletados próximos das antenas GNSS. Uma solução para a ausência desses dados é a assimilação dos valores do ZTD, o que é feito atualmente na maioria dos centros de previsão de tempo. No entanto, no Brasil, nos últimos anos, tem-se assistido uma significativa densificação das redes de coleta contínua dos sinais GNSS contemplando sensores meteorológicos visando à assimilação operacional de dados. Dois projetos merecem destaques nesse aspecto: o projeto temático financiado pela Fapesp intitulado "GNSS: investigações e aplicações no posicionamento geodésico, em estudos relacionados com a atmosfera e na agricultura de precisão" (Projeto GNSS-SP) (MONICO, 2006) e o projeto denominado "Sistema Integrado de Posicionamento GNSS para Estudos Geodinâmicos" (Projeto SIPEG) (VITORELLO, 2008) e conta com recursos provenientes de um Instrumento Contratual da Rede Temática de Estudos Geotectônicos CT-PETRO (PETROBRAS) e o INPE. O número total de receptores com estações meteorológicas em implantação deverá ser maior que 100. Esse montante leva a necessidade de se reavaliar a utilização de valores do IWV ao invés de se utilizar valores do ZTD. O objetivo desse trabalho é discutir os prós e contra da assimilação de cada uma dessas variáveis dentro do contexto de processamento por conjunto usando o LETKF. Visando contribuir com a discussão a formulação que as relacionam é apresentada na próxima seção. Detalhes mais relevantes sobre a implementação do operador dos produtos GNSS meteorologia no LETKF são abordados na seção 3. Uma análise dos prós e contra é apresentada na seção 4, enquanto discussão e comentários finais na seção 5.

2 ESTIMATIVAS DO ZTD E IWV A PARTIR DE DADOS GNSS

Utilizando-se as observáveis GNSS: em especial a medida de fase da onda portadora, em todas as frequências atualmente disponíveis, pode-se estimar o atraso zenital troposférico. Todos os erros sistemáticos presentes nas observações GPS são minimizados para se obter os valores do atraso zenital troposférico Monico (2008). O atraso troposférico (ZTD) é igual à soma das componentes: hidrostática (ZHD) e a úmida (ZWD) e pode ser expressa pela seguinte equação:

$$ZTD = ZHD + ZWD = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} k_1 R_h \rho dh + 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} (k_2 \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1}) dh \quad (1)$$

onde $k_1 = (22,1 \pm 2,2) K hPa^{-1}$, $k_2 = (22,1 \pm 2,2) K hPa^{-1}$ e $k_3 = (373900 \pm 1200) K^2 hPa^{-1}$ são constantes da refratividade atmosférica (BEVIS et al., 1994), R_h constante específica para os gases hidrostáticos, ρ é a densidade do ar, e a pressão parcial do vapor d'água e T a temperatura. O atraso zenital troposférico da componente hidrostática pode ser modelado a partir de medidas de pressão atmosférica e da localização aproximada da estação (DAVIS et al., 1985):

$$ZHD = (2,27 \times 10^{-3}) \frac{P_0}{(1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,00028 h_0)}, \quad (2)$$

onde P_0 é a pressão atmosférica medida na superfície em hPa , φ é a latitude da estação e h_0 é a sua altitude geométrica em quilômetros. Subtraindo o valor do ZHD do ZTD obtêm-se os valores do ZWD, com o qual é possível transformar em um valor do IWV usando uma constante de proporcionalidade (Ψ), tal que (BEVIS et al., 1992)

$$IWV = ZWD \Psi, \quad (3)$$

onde o valor do IWV é dado em kg/m^2 , e pode ser definido por:

$$IWV = \int_{h_0}^h \rho_w dh, \quad (4)$$

onde o termo ρ_w é a umidade absoluta. O atraso troposférico deve ser aplicado na equação 3 em unidade métrica. A constante de proporcionalidade Ψ é dada por:

$$\Psi = \frac{10^6}{R_w \left[k_2 + \frac{k_3}{Tm} \right]}, \quad (5)$$

onde $R_w = (461,5181) J kg^{-1} K^{-1}$ é a constante específica para o vapor d'água. O termo Tm é a temperatura média do perfil troposférico em Kelvin (SAPUCCI et al., 2004).

3 OPERADOR DE PRODUTOS GNSS NO LETKF

O LETKF é um sistema cíclico onde os dados observados são utilizados em janelas deslizantes de 6 horas, com horas centrais as 0:00, 6:00, 12:00 e 18:00 UTC, momento em que as análises (condições iniciais) são geradas e o modelo de PNT é disparado para as previsões de mais longo prazo (até 7 dias de previsão). A Figura 1 mostra de forma esquemática os processos envolvidos no LETKF.

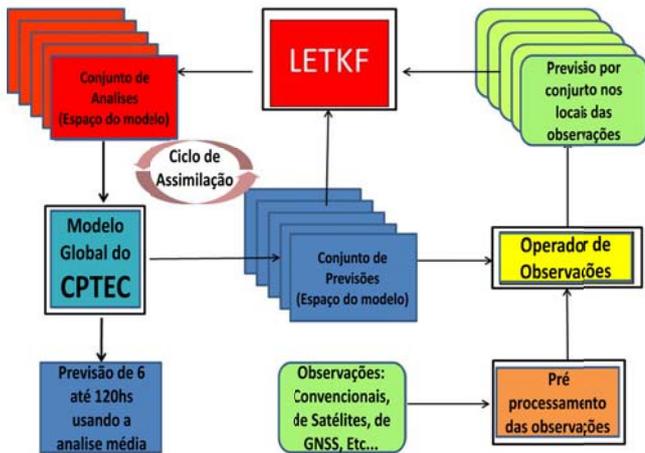


Figura 1 – Esquema ilustrativo dos processos envolvidos na assimilação de dados usando o LETKF.

O operador de observações (caixa amarela na Figura 1) tem por função converter as variáveis prognósticas do modelo (pressão atmosférica, temperatura, umidade e componentes zonal e meridional do vento) em quantidades observadas. As variáveis do modelo estão organizadas em espaço numérico onde toda a atmosfera do globo é representada por valores em um grid regular com diversos níveis verticais. As observações estão distribuídas em uma grade espacialmente irregular. O operador tem a função de fazer as devidas interpolações entre estas duas grades, levando os valores do modelo para o espaço das observações, onde são feitos os ajustes e minimização dos erros no processo de assimilação.

Na formulação do LETKF (descrita em detalhes por Hunt et al. 2007) o operador de observação (H) é aplicado em cada um dos membros do conjunto interpolando suas variáveis para o espaço das observações. Inicialmente, o modelo (M), conjunto de análises (condições iniciais) no tempo n $\{x_{n-1}^{a(i)}; i = 1, 2, \dots, k \text{ members}\}$ e previsões de curto prazo, denominadas background $\{x_n^{b(i)}; i = 1, 2, \dots, k \text{ members}\}$ são definidas, onde:

$$x_n^{b(i)} = Mx_{n-1}^{a(i)}. \quad (6)$$

Com a aplicação do operador obtém-se o conjunto de observações do background:

$$y_n^{b(i)} = H(x_n^{b(i)}), \quad (7)$$

E conseqüentemente, obtém-se a matriz X^b e Y^b da forma:

$$X^b = [x_n^{b(1)} - \bar{x}_n^b, x_n^{b(2)} - \bar{x}_n^b, \dots, x_n^{b(k)} - \bar{x}_n^b] \quad (8)$$

$$Y^b = [y_n^{b(1)} - \bar{y}_n^b, y_n^{b(2)} - \bar{y}_n^b, \dots, y_n^{b(k)} - \bar{y}_n^b]. \quad (9)$$

A solução do LETKF é obtida através da equação:

$$w_n^a = \bar{P}^a Y^{bT} R^{-1} (y_n^o - \bar{y}_n^b) \quad (10)$$

onde (w^a) é o incremento de análise no espaço do conjunto ($k \times 1$), P é a matriz variância-covariância do modelo e R é a matriz variância covariância das observações e y_n^o é o vetor de observações. A análise média (\bar{x}_n^a) é obtida pela equação:

$$\bar{x}_n^a = \bar{x}_n^b + X^b w_n^a. \quad (11)$$

Em termos práticos, os processos envolvidos em um operador de observação podem ser descritos pelos seguintes passos:

- 1: Organiza e declara as variáveis chamando as devidas bibliotecas;
- 2: Faz a leitura dos valores observados a serem assimilados já pré-processados e organizados;
- 3: Identifica a posição da observação lendo os dados das coordenadas ou um índice com informações organizadas em tabelas apropriadas;
- 4: Chama a sub rotina (profile_fg.f90) responsável por interpolar as variáveis do modelo para o espaço das observações;
- 5: Aplica uma metodologia adequada para cada tipo específico de observação, a qual relaciona os valores do modelo com os valores observados;
- 6: Calcula os valores para cada membro de ensemble e suas diferenças de um ensemble médio, no qual a minimização dos resíduos no LETKF é realizada;
- 7: Aplica um controle de qualidade nos dados a serem observados verificando sua consistência com relação os valores do modelo, além de detectar observações com erros grosseiros ou com inconsistência temporal.
- 8: Depois de feitos todos os processos anteriores para todas as observações o operador organiza os resultados em forma de vetores a serem utilizados pelo LETKF juntamente com os demais tipos de observações;

Para a assimilação de valores do ZTD ou valores do IWV todos os passos descritos acima devem ser realizados diferindo para cada tipo de observação apenas a formulação a ser utilizada no passo 5, as quais devem ser:

- **Assimilação de dados ZTD:** utiliza-se os valores do perfil de temperatura, umidade e pressão aplicando-os na equação 1 realizando uma integração numérica a fim de se obter os valores do ZTD para a altura da antena GNSS, de onde se realizou as observações.
- **Assimilação de dados IWV:** No operador os perfis de umidade e temperatura do modelo são convertidos em perfis de umidade absoluta e esses são convertidos em valores do IWV através da integração numérica da equação 4.

4 PROS E CONTRAS DA ASSIMILAÇÃO DO IWV OU ZTD

A assimilação de ambas as variáveis apresenta vantagens e desvantagens. Há alguns fatores que devem ser considerados anteriormente a essa análise, os quais são decisórios para a escolha de uma ou outra variável:

- Disponibilidade de medidas de pressão atmosférica com precisão melhor que 0.3 mbar e na altura da antena GNSS ou com desnível bem conhecido e considerado nos cálculos do IWV. Caso esse pré-requisito não seja atendido a opção óbvia é a assimilação do ZTD;
- Sistema de assimilação que tenha disponível o operador específico para a assimilação de dados de ambas as variáveis, ou que sua inclusão não envolva grandes implementações, como é o caso do LETKF. Quando há a necessidade de implementar de forma muito sofisticada um operador, a melhor opção também é o uso de dados de ZTD.

A tabela 1 apresenta uma comparação das vantagens e desvantagens na assimilação de dados do ZTD e IWV, nas quais pode observar um comportamento em fase, ou seja, o que é desvantagem em uma das opções é uma vantagem na outra oposta.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens da assimilação do ZTD ou do IWV.

| Vantagens do ZTD | Vantagens do IWV |
|--|--|
| -Não requer medidas atmosféricas junto à antena. | - Medida direta da umidade; |
| -Não precisa de modelos de temperatura média (contaminados por erros nas radiossondagens e conjunto inadequado); | -Valores independentes dos perfis do modelo; |
| -Pré-processamento mais simples, não necessitando de conversão para IWV; | -Observações não contaminadas pelas incertezas nas variáveis do modelo; |
| | -Contribuição direta nos campos de umidade; |
| | -Uso eficiente da rede de estações GNSS e meteorológicas em implantação no Brasil; |
| Desvantagens do ZTD | Desvantagem do IWV |
| -Medida que considera também os campos de pressão e temperatura não sendo medida direta da umidade. | -Requer modelos de T_m baseados em medidas de radiossondas; |
| -Modificações na umidade contaminada pelas imperfeições nos campos de pressão e temperatura. | -A necessidade de medidas de pressão junto à antena. |
| -Desperdício das observações meteorológicas de qualidade junto as estações GNSS em implantação no Brasil. | -Passo adicional no pré-processamento na conversão de medidas do ZTD para IWV. |

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

O fato dos projetos citados na introdução terem previsto gastos significativos com a aquisição, instalação e operacionalização das estações meteorológicas junto às antenas GNSS tem conduzido os trabalhos para a assimilação de valores do IWV. Nesse aspecto o presente estudo contribui com o tema ao colocar em discussão os prós e contras a assimilação de cada um dos produtos meteorológicos GNSS. A ideia é investir em soluções para amenizar as desvantagens com a assimilação do IWV e desenvolver metodologias para potencializar as vantagens obtidas nesse processo. Dentre as desvantagens relacionadas à assimilação do IWV a necessidade de modelos de T_m é a mais preponderante, pois o tempo de processamento com a adição da conversão é irrisório na prática e a necessidade de estações meteorológicas já é algo que está sendo tratado. Com relação ao modelo de T_m , encontra-se em desenvolvimento um estudo que visa avaliar adequadamente o impacto da incerteza dos modelos disponíveis a serem aplicados sobre o território brasileiro. Cabe salientar que modelos apropriados para essa região estão disponíveis e apresentam bons resultados (SAPUCCI et al., 2004).

A melhor maneira de avaliar qual é a melhor opção entre assimilar dados de IWV ou ZTD é analisar na prática o impacto gerado pela assimilação de cada uma das variáveis na melhoria das análises e principalmente na produção de previsões mais acertadas. Nesse sentido, encontra-se em desenvolvimento a implementação de um operador no LETKF que contemple tanto a assimilação de observações ZTD como IWV. Os dados a serem utilizados nesse estudo estão sendo gerados pelo Laboratório de Geodésia Espacial da FCT-UNESP dentro do projeto Temático GNSS-SP.

O fato de se estar utilizando um sistema de assimilação relativamente novo e baseado em ensemble, o qual nunca foi utilizado em um ambiente operacional, coloca a importância dessa pesquisa em um patamar diferenciado, pois resultados inéditos podem ser obtidos, os quais podem ser contrários aos obtidos com a utilização de métodos mais convencionais. A assimilação baseada em ensemble busca a solução ponderando os membros mais próximos das observações de uma forma menos dependente do modelo e suas incertezas. A resposta mais provável para a questão apresentada no título desse trabalho será o uso de valores do IWV em estações com dados meteorológicos disponíveis e valores do ZTD em estações onde tais dados não são coletados.

No entanto, o desenvolvimento dessa linha de trabalho contribuirá para que os esforços realizados no aparelhamento da rede não sejam em vão e que os benefícios gerados pelos produtos GNSS para a previsão de tempo sejam otimizados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo FAPESP (Processo número: 2006/04008-2) e ao Instrumento Contratual da Rede Temática de Estudos Geotectônicos CT-PETRO (PETROBRAS) e INPE (processo número 4600289299) pelo apoio financeiro a essa pesquisa.

REFERÊNCIAS

BEVIS, M. G.; SUSINGER, S.; HERRING, T.; ROCKEN, C.; ANTHES, R. A.; WARE, R. H. **GPS Meteorology: Remote of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System**. Journal of Geophysical Research, Vol. 97, No. D14, 1992. 15.787-15.801p.

BEVIS, M. G.; CHISWELL, T. A.; HERRING, R.; ANTHES, C.; ROCKEN, E. R. H. WARE, **GPS Meteorology: Mapping zenith wet delays into precipitable water**. J. Appl. Meteor., 1994. 379-386p.

DAVIS, J. L.; HERRING, T. A.; SHAPIRO I.; ROGERS, A. E.; ELGENED, G. **Geodesy by Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Base Line Length**. Radio Sci., vol. 20, 1985. 1593-1607p.

HUNT, B. R.; E. J. KOSTELICH; I. SZUNYOGH **Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter**. Physica D, 2007. 112-126p.

MONICO, J. F. G. **GNSS: investigações e aplicações no posicionamento geodésico, em estudos relacionados com a atmosfera e na agricultura de precisão**. Projeto FAPESP na modalidade temático. Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, SP, 2006.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2.ed. São Paulo: UNESP, 2008. 476p.

SAPUCCI, L. F; MACHADO, L. A. T.; MONICO, J. F. G. **Modelagem da temperatura média troposférica no Brasil para quantificação do IWV utilizando GPS**. In: Congr. Bras. Met., 13.: 2004, Fortaleza. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. Fortaleza: SBMET, 2004.

VITORELLO, ÍCARO. **Sistema Integrado de Posicionamento GNSS para Estudos Geodinâmicos**. Projeto aprovado e em andamento com recursos da PETROBRAS. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE/MCT. São José dos Campos, 2008.