

Simulações sob condições ideais e não ideais para caracterização do localizador geográfico de plataformas de coleta de dados

CRISTINA TOBLER DE SOUSA¹
RODOLPHO VILHENA DE MORAES¹
HÉLIO KOITI KUGA²

¹ Universidade de Guaratinguetá – DMA/FEG/UNESP
Caixa Postal 205 – 12516-410 - Guaratinguetá - SP, Brasil
cristina@dss.inpe.br, rodolpho@feg.unesp.br;

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
hkk@dem.inpe.br

Abstract. The main goal of this work is to present an investigation over the influence of errors into the geographic location software developed by Sousa (2000) and by Sousa and Kuga (2004). Basically the satellite receives the UHF signals from DCPs (Data Collecting Platforms) and relay such signals to ground reception stations in range. The Doppler shift measurements are computed in the ground station. In the Data Collection Mission Center, the Doppler measurements are sorted and merged to input them to the geographic location software, which provides the DCPs location. This feature is particularly useful for monitoring moving DCPs (drifting buoys in sea or rivers), for animal tracking, for checking if the DCP is still in place, or for insuring that goods reaches the destiny. To enable this kind of analysis a special simulator was developed to produce simulated Doppler measurements according to error simulation cases. A test scenario composed by SCD-2 and NOAA-17 satellite passes, a single DCP (Data Collecting Platform) and a ground receiving station was used. The analyses of error introduced in the simulation covers the following cases: ideal simulated conditions, without any errors; random errors in the Doppler measurements; bias errors in the Doppler measurements; and errors in the satellite ephemeris. The obtained results are quite satisfactory and in the ideal case the results shows compatibility between the simulator and the geographic location software. As a final remark, this paper shows the importance of satellite ephemeris and on board satellite oscillator to get more accurate locations.

Palavras-chave: Geographical location, Satellites, Simulated Doppler shift, Localização geográfica, Satélites, Simulação do desvio Doppler

1. Introdução

Este trabalho mostra a validação, via simulações computacionais, do sistema de localização geográfica através de satélites, desenvolvido no INPE. O princípio do sistema é o seguinte: basicamente o satélite, devidamente instrumentado, recebe sinais na banda UHF de PCDs (Plataforma de Coleta de Dados) e os retransmite para as estações de recepção terrestres dentro do seu alcance. As medidas de desvio Doppler são efetuadas na estação de recepção. No Centro de Missão Coleta de Dados, essas medidas são devidamente agrupadas e pré-tratadas para serem submetidas ao software de localização geográfica, que calcula então a localização da PCD correspondente. Esta característica é bastante útil no monitoramento de PCDs móveis (bóias em rios ou no mar), rastreamento de animais, verificação sobre a remoção ou não da PCD, ou para assegurar que mercadorias alcançaram seu destino.

Dada a crescente demanda por localização de plataformas móveis no Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais (SBCDA) e com o propósito de caracterizar a sensibilidade do localizador geográfico desenvolvido por Sousa (2000) e por Sousa e Kuga (2004) aos diversos erros de medida foi desenvolvido um simulador especial. Este simulador tem a capacidade de gerar diversos arquivos de medidas Doppler a partir de passagens simuladas de satélites e provocar erros controlados nas medidas Doppler, erros de datação e erros nas efemérides dos satélites para ser submetido ao localizador geográfico. Para a análise dos

resultados de localização de plataformas foram utilizados os satélites SCD-2 e o NOAA-17 da série NOAA (CLS, 1989), a estação de recepção de Cuiabá e uma plataforma de coleta de dados.

A partir do conjunto de arquivos simulados, foram feitas análises dos efeitos em condição ideal (sem erros inseridos) e condições não ideais com a inserção de erros propositais para simular as condições reais tanto nas efemérides como nas medidas Doppler e na datação.

As medidas Doppler foram simuladas utilizando a equação de desvio Doppler, as efemérides dos satélites e as localizações geográficas nominais dos transmissores fixos.

Os resultados de localização gerados com dados simulador em condições ideais, ou seja, sem inserção proposital de erros, mostram que há coerência nos dados entre o simulador desenvolvido e o localizador geográfico.

Para verificar a sensibilidade aos erros de medida no localizador geográfico, foram realizadas simulações com inserção de erros aleatórios e tendenciosos nas medidas do desvio Doppler e nas efemérides dos satélites.

Os arquivos de medidas Doppler foram simulados considerando o período de 10 a 19 de Março de 2008, a estação de recepção de Cuiabá, os satélites SCD-2, NOAA-17 e uma plataforma de coleta de dados (PCD 20) localizada no centro do Brasil.

As efemérides no formato *Two Line Elements (TLE)* do satélite SCD-2 foram geradas pelo Centro de Controle de Satélites do INPE em São José dos Campos e a do satélite NOAA-17 foram obtidas da página www.celestrak.com.

A Tabela 1 a seguir apresenta as posições do transmissor de número 20, e da estação de recepção de Cuiabá.

Tabela 1 – Posições de referência da PCD 20 e da estação de recepção.

	Latitude (graus)	Longitude (graus)
PCD 20	-12.1200	310.1100
Estação de Cuiabá	-15.5550	303.9302

Os resultados e análises são apresentados em quatro etapas:

- 1) Sem erro nas efemérides, sem erro nas medidas de desvio Doppler e na datação;
- 2) Com erros aleatórios no desvio Doppler;
- 3) Com erros tendenciosos no desvio Doppler;
- 4) Com erros nas efemérides dos satélites;

Para a simulação das medidas de desvio Doppler foram consideradas duas taxas de amostragem: 600 medidas Doppler por passagem e 7 medidas Doppler por passagem.

2. Metodologia

A metodologia utilizada para caracterizar o localizador geográfico consistiu em construir um simulador baseado no algoritmo de localização geográfica de transmissores, desenvolvido por Sousa (2000).

O simulador foi implementado em Fortran (Visual Fortran) para geração dos diversos arquivos de teste. Estes arquivos de entrada para o localizador geográfico incluem as efemérides dos satélites no formato TLE, os erros inseridos propositalmente nas efemérides do satélite, nas medidas Doppler, na datação, data inicial e final de simulação, a taxa de transmissão, bem como as posições da plataforma e da estação de recepção.

O arquivo de saída possui todas as medidas de desvio Doppler simuladas, durante as passagens do satélite, no intervalo de tempo especificado, geradas a partir das posições da plataforma e dos satélites.

O algoritmo processa os dados de entrada durante a passagem do satélite no intervalo de tempo, e simula o valor do desvio Doppler de todos os sinais de frequência recebidos através do satélite.

Utilizou-se a equação do desvio Doppler, Resnick (1968), para simular o sinal de frequência recebido:

$$Doppler = -\frac{(f_t * \dot{\rho})}{c} + \sigma \quad (1)$$

onde $\dot{\rho}$ é a velocidade do satélite relativa ao transmissor, f_t é a frequência transmitida, c é a velocidade da luz e σ é o erro inserido nas medidas Doppler. Inseriram-se erros aleatórios e/ou sistemáticos. Nos erros aleatórios utilizou-se uma distribuição normal padrão (média nula e variância unitária) nas medidas Doppler.

Foram inseridos erros de 10 km no movimento médio do satélite (revoluções/dia), para verificar como a precisão nas efemérides do satélite impacta a precisão da localização.

O gerador de efemérides de satélites utiliza o modelo NORAD SPG8 em Hoots e Roehrich (1980) e Vilhena de Moraes et al. (2006) para calcular a órbita do satélite no instante da medida de desvio Doppler.

3. Resultados e Discussão

3.1. Sem erros inseridos – condições ideais

Os resultados sob condições ideais, sem erro nas efemérides, sem erro nas medidas Doppler e sem erro na datação, estão apresentados na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2 – Condições ideais

Satélite	Número de medidas por passagem	Erro médio das localizações (m)±desvio padrão
SCD-2	600	0,07±0,03
	7	0,3±0,1
NOAA-17	600	0,06±0,02
	7	0,2±0,1

Nas colunas do erro médio das localizações apresentam-se as médias aritméticas dos erros das localizações geográficas em relação à posição verdadeira do transmissor, no período de 10 dias.

Na Tabela 2 anterior observa-se que o erro médio da localização e a dispersão em relação ao número de medidas das passagens, tanto usando o satélite SCD-2 como o satélite NOAA-17, com taxa de 600 transmissões por passagem, encontra-se em torno de 10^{-4} km e 10^{-5} km, evidenciando que o localizador desenvolvido por Sousa (2000) e por Sousa e Kuga (2004), usando dados que simulam condições ideais, fornece resultados precisos.

Os arquivos com alta amostragem, ou seja, 600 medidas Doppler por passagem, equivalente a uma medida a cada segundo, produziram resultados uma ordem de grandeza mais precisa do que os de baixa amostragem (uma medida Doppler a cada 90 segundos), ou seja, uma quantidade maior de medidas implica em resultado estatístico melhor.

3.2. Com erros aleatórios nas medidas Doppler

Nesta seção são apresentados os resultados e análises de arquivos simulados sob condições não ideais, onde foram inseridos propositalmente erros nas medidas Doppler.

Com a finalidade de se verificar o efeito de erros inseridos nas medidas Doppler, o estimador de “bias” foi desligado. Desta forma, o localizador assumiu que não existe “bias” nas medidas Doppler.

Erros aleatórios de 1 Hz, 10 Hz e 100 Hz foram inseridos usando uma distribuição normal padrão (média nula e variância unitária) nas medidas Doppler. Os resultados estão apresentados na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 - Erros aleatórios nas medidas Doppler

Satélite	Número de medidas por passagem	Erros Aleatórios nas medidas Doppler simuladas (Hz)	Localizações processadas	Erro médio das localizações (km) \pm desvio padrão	Erro máximo das localizações (km)	Erro mínimo das localizações (km)
SCD-2	600	1	79	0,04 \pm 0,06	0,09	0,01
	7	1	81	0,39 \pm 0,10	0,69	0,02
	600	10	77	0,23 \pm 0,05	0,71	0,00
	7	10	78	2,43 \pm 1,84	6,86	0,14
	600	100	77	2,53 \pm 1,81	8,72	0,12
	7	100	82	24,59 \pm 11,46	30,18	0,41
NOAA-17	600	1	35	0,06 \pm 0,06	0,06	0,01
	7	1	31	0,47 \pm 0,14	0,70	0,02
	600	10	35	0,16 \pm 0,02	0,96	0,02
	7	10	30	3,58 \pm 1,60	7,20	0,15
	600	100	35	1,69 \pm 0,31	8,53	0,02
	7	100	31	37,86 \pm 20,07	41,98	1,17

A Tabela 3 mostra que o erro médio das localizações aumentou na medida em que o erro aleatório inserido nas medidas Doppler também aumentou, como esperado.

Nos resultados obtidos observa-se que o erro médio foi menor ou maior ao considerar a quantidade de amostras por passagem. Para baixa amostragem (7), os erros foram maiores do que para alta amostragem (600), cerca de uma ordem de grandeza.

As colunas referentes ao erro máximo e mínimo de todas as localizações para cada erro inserido indicam que os máximos e mínimos erros absolutos aumentam consideravelmente quando a taxa de amostragem é menor. Estes resultados permitem avaliar quais os valores máximos e mínimos que este tipo de erro aleatório nas medidas Doppler pode causar.

3.3. Com erros tendenciosos nas medidas Doppler

Nesta seção são apresentados os resultados e análises do efeito de erros sistemáticos inseridos nas medidas Doppler simuladas. Para a simulação utilizaram-se os satélites SCD-2 e o NOAA-15 e 17, onde foram inseridos erros tendenciosos de 1 Hz, 10 Hz e 100 Hz. Os resultados gerados estão apresentados na Tabela 4 a seguir.

Tabela 4 - Erros tendenciosos nas medidas Doppler

Satélite	Número de medidas por passagem	Erros Tendenciosos nas medidas Doppler simuladas (Hz)	Localizações processadas	Erro médio das localizações (km) \pm desvio padrão	Erro máximo das localizações (km)	Erro mínimo das localizações (km)
SCD-2	600	1	77	0,25 \pm 0,05	0,68	0,13
	7	1	82	0,30 \pm 0,08	0,91	0,13
	600	10	77	2,46 \pm 0,21	5,04	0,31
	7	10	84	2,87 \pm 0,46	7,13	0,96
	600	100	77	23,82 \pm 8,74	26,43	4,87
	7	100	83	26,14 \pm 9,80	34,44	6,48
NOAA-17	600	1	35	0,31 \pm 0,06	0,83	0,13
	7	1	31	0,48 \pm 0,07	0,89	0,12
	600	10	35	2,49 \pm 0,39	3,97	0,36
	7	10	32	3,64 \pm 0,52	7,73	0,48
	600	100	35	27,75 \pm 7,81	23,12	3,68
	7	100	31	28,23 \pm 8,71	31,83	5,13

Observando a Tabela 4 verifica-se que, devido ao erro inserido nas medidas Doppler ser tendencioso e não de natureza aleatória, os resultados permaneceram na mesma ordem de grandeza, tanto para alta como baixa amostragem. Desta forma, conclui-se que erros tendenciosos introduzem um nível de erro que depende em menor grau da taxa de amostragem.

3.4. Com erros de efemérides, com e sem erros de observação

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para a localização de transmissores ao serem inseridos erros de 10 km nas efemérides dos satélites. Esta análise foi realizada para verificar como a precisão nas efemérides, impacta na precisão da localização. Conjuntamente, foram incluídos erros de observação (ou medidas Doppler) de 10 Hz aleatórios e/ou tendenciosos.

Os resultados considerando erros nas efemérides, e adicionando ou não erros de observação estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Erros de efemérides e de observação

Satélite	Número de medidas por passagem	Erros nas efemérides do satélite (km)	Erros Aleatórios nas medidas Doppler simuladas (Hz)	Localizações processadas	Erro médio das localizações (km) \pm desvio padrão
SCD-2	600	10	Nenhum	71	8,53 \pm 0,11
	7	10	“	82	8,83 \pm 0,18
	600	10	10 aleatórios	71	8,74 \pm 0,18
	7	10	“	82	9,64 \pm 0,14
	600	10	10 tendenciosos	71	10,60 \pm 0,38
	7	10	“	82	11,17 \pm 0,21
	600	10	10 aleatórios + 10 tendenciosos	71	10,63 \pm 0,24
	7	10	“	33	11,99 \pm 0,31
	7	10	“	30	9,91 \pm 0,25
	600	10	10 tendenciosos	33	10,89 \pm 0,41

NOAA-17	600	10	Nenhum	35	8,57±0,11
	7	10	“	33	8,70±0,19
	600	10	10 aleatórios	35	8,67±0,15
	7	10	“	31	9,11±0,31
	600	10	10 tendenciosos	35	10,44±0,22
	7	10	“	31	11,02±0,28
	600	10	10 aleatórios + 10 tendenciosos	35	10,45±0,14
	7	10	“	30	11,10±0,36

Observando a Tabela 5, verifica-se que as localizações obtidas, tanto usando o SCD-2 como o NOAA-17, naturalmente apresentaram os maiores erros ao se inserirem todos os tipos de erros simultaneamente.

Pode-se notar que a contribuição maior ao erro foi devida aos erros inseridos nas efemérides.

Os erros aleatórios são filtrados pelo algoritmo de mínimos quadrados e produzem imprecisão marginal.

Já os erros sistemáticos (“bias”) se traduzem em maior imprecisão final, e os níveis de erros adicionados são semelhantes aos obtidos na Tabela 4 dos erros tendenciosos.

Pode-se concluir que, a precisão nos elementos “Two-Line Elements” (efemérides) produz impacto direto na precisão da localização, ou seja, 10 km de erro nas efemérides resultam em erros na localização da mesma ordem de grandeza. Logo para os satélites analisados, pode-se inferir que precisões da ordem de 1-2 quilômetros só poderão ser obtidas se os erros nas efemérides forem inferiores a 2 km e os erros aleatórios e tendenciosos menores que 10 Hz, em condições de baixa taxa de amostragem.

4. Conclusões

Observando o caso onde as frequências recebidas pelos satélites são simuladas sob condições ideais, ou seja, sem inserção proposital de erros, pode-se concluir que o localizador desenvolvido está operando adequadamente.

Quanto às diferenças entre os resultados das simulações com os erros aleatórios e os tendenciosos, pode-se concluir, conforme as Tabelas apresentadas, que os erros aleatórios são filtrados. Eles produzem localizações cuja média do erro tende a zero, principalmente para alta taxa de amostragem (600 medidas). A média dos erros de localização mantém certa coerência e proporcionalidade; assim, para alta amostragem, erros aleatórios de 1 Hz, 10 Hz e 100 Hz produzem erros de 0,02 km, 0,2 km e 2 km, respectivamente. Para 7 amostras obtiveram-se resultados igualmente consistentes: erros aleatórios de 1 Hz, 10 Hz e 100 Hz produzem erros de 0,2 km, 2 km e 20km, respectivamente.

Os resultados da simulação com erros tendenciosos, por sua vez, produzem erros que degradam igualmente a localização em ambas as amostragens (600 e 7).

Estes resultados eram esperados devido às características intrínsecas dos erros considerados. Pode-se concluir, que quanto menor o erro apresentado nas medidas Doppler, menor o erro de localização em relação à posição verdadeira, principalmente para alta taxa de amostragem. A inclusão de erros tendenciosos prejudica em maior grau os resultados de localização do que os erros aleatórios.

A localização com tendências nas medidas Doppler foi calculada sem estimar-se a deriva nas medidas. Entretanto, estas tendências podem ser retiradas, se suas estimativas forem realizadas no processo de localização.

Observando-se os resultados das Tabelas, ao inserir erros de efemérides, conclui-se que é fundamental minimizá-los, pois o localizador não consegue compensá-los. Os erros na

localização causados pelas efemérides dos satélites são aproximadamente iguais em magnitude aos erros na localização dos transmissores.

Agradecimentos

Os autores desse trabalho agradecem a FAPESP (processo N° 2005/04497-0) pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográficas

Collection and Location System (CLS). Service Argos: guide to the Argos System. Toulouse: Sept., 1989. v. 1.

Hoots, F. R.; Roehrich, R. L. **Models for propagation of NORAD element sets**, Aerospace Defense Command, Peterson, AFB, Co., Spacetrack no. 3, Dec., 1980.

RESNICK, R. **Introdução à relatividade especial**. New York, Wiley, 1968.

Sousa, C. T. **Geolocalização de transmissores com satélites usando desvio Doppler em tempo quase real**. 2000.. (INPE-8391-TDI/771). Dissertação (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2003.

Sousa, C. T., Kuga, H. K. Comparing INPE and Argos Geo-Location Algorithms Accuracies with Argos System Real Data. In: Kuga, H. K. (Org.). **Advances in Space Dynamics, Celestial Mechanics and Astronautics**. São José dos Campos, 2004. v. 4, p. 283-289.

Vilhena de Moraes, R.; Silva A. and Kuga, H. K., Low Cost Orbit Determination Using Gps. **Proceedings of the 5th International Conference on Mathematical Problems in Engineering and Aerospace Sciences**, Seenith Sivasundaram. Cambridge Scientific Publishers, 2007. p. 495-502. ISBN 1-904868-48-7. p. 495-502, 2006.