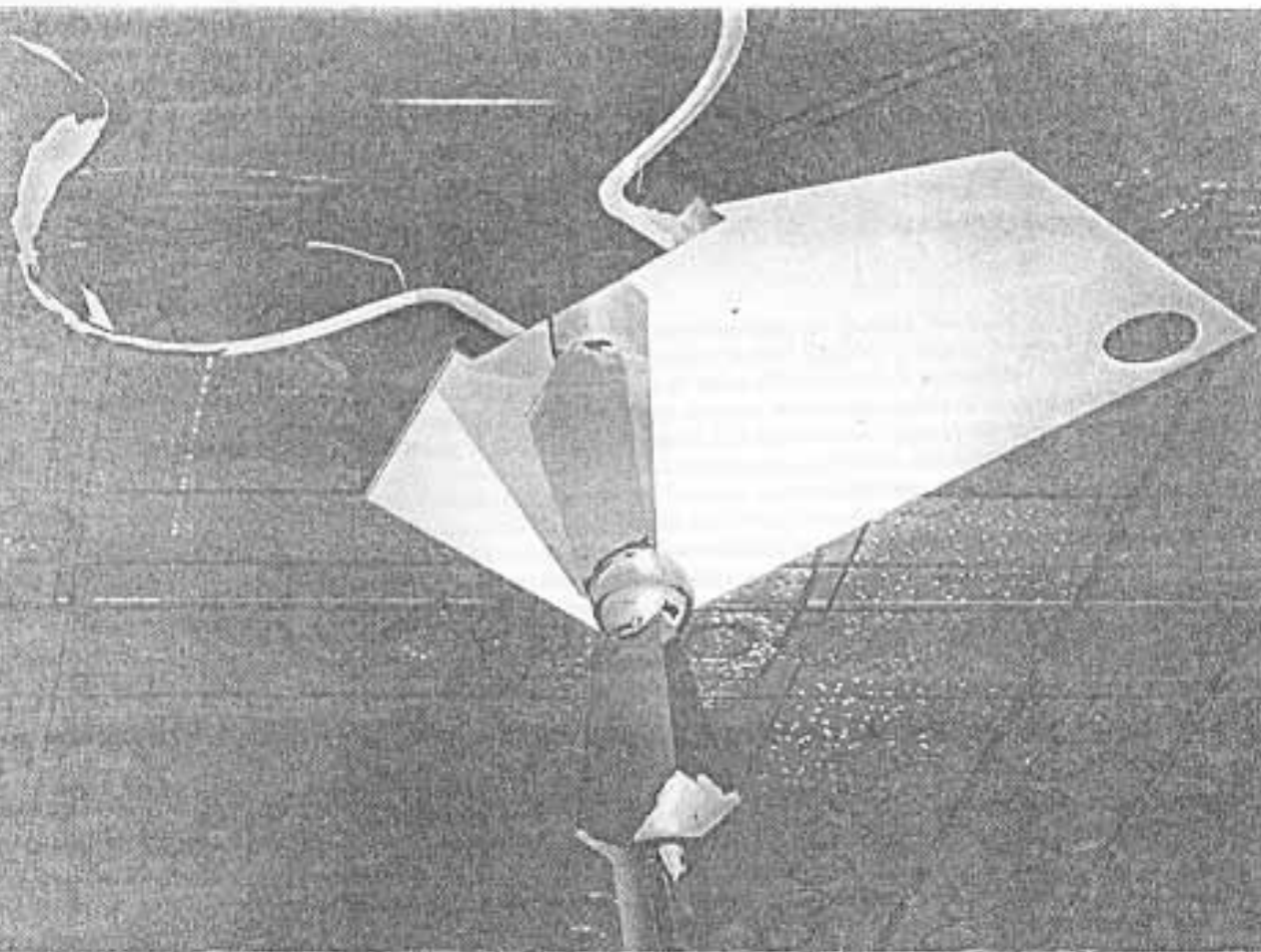




PARMIND



finep



UBERLÂNDIA  
2001

# CHAMADA DE TRABALHOS CALL FOR PAPERS

26 a 30 de Novembro de 2001 - Uberlândia - MG

November 26 - 30, 2001 - Uberlândia - MG - Brazil

IMPRESSO

# LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DE TRANSMISSORES USANDO DADOS IDEAIS E NÃO IDEAIS, DESVIO DOPPLER E MÍNIMOS QUADRADOS

**Cristina Tobler de Sousa**

INPE/DMC, Av. dos Astronautas, 1758, C.P. 515, CEP 12227-010, São José dos Campos, Brasil  
[cristina@dem.inpe.br](mailto:cristina@dem.inpe.br)

**Hélio Koiti Kuga**

INPE/DMC, Av. dos Astronautas, 1758, C.P. 515, CEP 12227-010, São José dos Campos, Brasil  
[hkk@dem.inpe.br](mailto:hkk@dem.inpe.br)

**Alberto W. Setzer**

INPE/LMO, Av. dos Astronautas, 1758, C.P. 515, CEP 12227-010, São José dos Campos, Brasil  
[asetzer@met.inpe.br](mailto:asetzer@met.inpe.br)

*Resumo.* Neste trabalho descreve-se um novo procedimento implementado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para se obter a localização geográfica de transmissores usando desvio Doppler e estimação por lotes baseada em técnicas estatísticas de mínimos quadrados. A localização geográfica de transmissores através de satélites e seu monitoramento atendem necessidades várias, como busca e resgate de pessoas em locais remotos, monitoramento de bóias oceanográficas, deslocamento de animais, aeronaves, pessoas, equipamentos, tanto para pesquisas científicas como sistemas de segurança. Resultados com dados simulados sob condições ideais, degradadas, e com erros realisticamente inseridos nas medidas de desvio Doppler, mostram, através de análise de erros, que o localizador geográfico funciona apropriadamente. Foram introduzidos também erros nas efemérides do Satélite de Coleta de Dados (SCD-2) e no Satélite Sino Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS-1) utilizados neste trabalho, através de desvios nos seus movimentos médios. Este trabalho modela as medidas de desvio Doppler e a técnica de mínimos quadrados não linear aplicada ao problema. Resultados e análises obtidos através do procedimento de localização geográfica de transmissores, se encontram neste trabalho, demonstrando a precisão na localização obtida.

*Palavras chave:* desvio Doppler, transmissores, localização, mínimos quadrados

## 1. Introdução

No Brasil, as atividades de localização geográfica são aplicadas principalmente na Biologia e na Oceanografia. Na Biologia, são fixados mini-transmissores em animais selvagens para monitoramento dos seus deslocamentos e hábitos (Mantovani; Muelbert et al., 2000, por exemplo). Na oceanografia, são lançadas bóias de deriva nos oceanos (Kampel, 1997; Stevenson, 1998) para acompanhamento do seu deslocamento. Estas atividades têm aplicações ainda na localização e resgate de aeronaves e embarcações em situações de emergência, (SARSAT, 2000) e na localização de pesquisadores do Programa Antártico (PROANTAR) na Antártica (Setzer, 1997) em missões de campo.

No presente, o monitoramento geográfico de transmissores é realizado no Brasil através da compra dos dados de localização (latitude e longitude) do sistema francês Argos (CLS, 1989). O sistema processa os sinais recebidos pelos satélites meteorológicos americanos da série "National Oceanic and Atmospheric Administration" (NOAA) (Kidwell, 1991), e os disponibiliza com atraso de várias horas. O mais recente procedimento de localização geográfica de transmissores apresentado neste trabalho (Sousa, 2000), possibilita a obtenção das medidas de localização geográfica, de forma independente, utilizando-se satélites e estações de recepção brasileiros.

Na seção a seguir, encontra-se resumido o modelo do problema de localização geográfica, utilizando medidas de desvio Doppler e técnicas de mínimos quadrados não lineares. A técnica de geolocalização de transmissores determina entre outros parâmetros, a latitude, longitude e altitude de transmissores situados na superfície terrestre, em tempo-quase-real, ou seja, imediatamente após a coleta das medidas.

Os resultados de dados simulados encontram-se descritos em tabelas e gráficos, com as respectivas análises.

## 2. Modelo básico: localização de transmissores

A localização de um transmissor (ou Plataforma de Coleta de Dados - PCD) pode ser determinada medindo-se o desvio Doppler dos sinais de frequência devido à velocidade do satélite relativa ao transmissor.

A localização geográfica de PCDs considera que durante a passagem dos satélites SCD-2 e CBERS-1, sinais de frequência UHF transmitidas pelas PCDs são recebidos a bordo do satélite, que são imediatamente (em tempo real) retransmitidos para estações de recepção terrestres, onde são processados. Isto acontece quando o círculo visibilidade do satélite inclui a estação e o transmissor.

A velocidade do satélite relativa ao transmissor ( $v \cos(\alpha)$ ) será denotada por  $\dot{\rho}$ , é dada pela Equação do efeito Doppler (Resnick, 1968) como segue:

$$\hat{\rho} = \frac{(f_r - f_t)}{f_t} c, \quad (1)$$

onde:

- $f_r$  é a frequência recebida pelo satélite;
- $f_t$  é a frequência de referência (ou nominal) enviada pelo transmissor;
- $(f_r - f_t)$  é o desvio Doppler devido à velocidade relativa transmissor-satélite;
- $c$  é a velocidade da luz;
- $\alpha$  é o ângulo entre o vetor velocidade  $v$  do satélite e o de posição do satélite relativa ao transmissor.

O gerador de efemérides de satélites utiliza o modelo NORAD SPG8 (Hoots, 1980) para obter a órbita do satélite no instante da medida de desvio Doppler. As efemérides atualizadas são utilizadas na Eq. (1) que modela as observações. Portanto, sejam as observações modeladas por:

$$y = h(x) + v \quad (2)$$

onde:

- $y$  é um vetor de  $m$  observações;
- $h(x)$  é uma função não linear vetorial de dimensão  $m$  dos parâmetros  $x$  a serem estimados e das efemérides do satélite;
- $v$  é um vetor de dimensão  $m$  dos erros de observação.

a solução dos mínimos quadrados não linear é dada por (Bierman, 1977):

$$H_1 \delta \hat{x} = \delta y_1 \quad (3)$$

onde  $\delta \hat{x} = (\hat{x} - \bar{x})$ ,  $H_1$  é uma matriz triangular superior, e portanto a solução  $\delta \hat{x}$  é obtida diretamente. O método torna-se iterativo ao tomar a estimativa  $\hat{x}$ , a partir da Equação (3.25), como sendo o novo valor de referência  $\bar{x}$ . Assim, calcula-se um novo valor para  $\delta \hat{x}$  sucessivamente, até quando essa correção diferencial tender a zero, indicando a convergência do método. A matriz  $H_1$  é o resultado da transformação ortogonal de Householder  $T$  (Lawson, 1972), tal que:

$$\begin{bmatrix} H_1 \\ 0 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} P_0^{-1/2} \\ W^{1/2} H \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde:

- $H$  é a matriz de derivadas parciais das observações em relação ao estado calculada em torno da referência;
- $W$  é a matriz de peso das componentes do vetor das medidas  $y$  (ou ponderação dos resíduos);
- $P_0^{-1/2}$  é a matriz raiz quadrada de informação inicial das variáveis de estado.

O  $\delta y_1$ , é tal que:

$$\begin{bmatrix} \delta y_1 \\ \delta y_2 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} P_0^{-1/2} \delta \hat{x}_0 \\ W^{1/2} \delta y \end{bmatrix} \quad (5)$$

onde  $\delta y$  é o vetor dos resíduos. A função custo final pode ser escrita como:

$$J = \|\delta y_1 - H_1 \delta \hat{x}\|^2 + \|\delta y_2\|^2 \quad (6)$$

com  $J_{min} = \|\delta y_2\|^2$ , onde  $J_{min}$  é o custo mínimo.

### 3. Análises, simulações e qualificação do geolocalizador

Nesta seção descrevem-se simulações computacionais do geolocalizador desenvolvido, com o objetivo de qualificá-lo, verificar seu desempenho sob condições ideais e não ideais mas controladas, e analisá-lo sob aspectos de precisão nas mais diversas situações.

Inicialmente são feitas simulações onde se geram diversos arquivos de dados a partir de passagens do satélite SCD-2 sobre uma estação de recepção conhecida, onde os sinais de frequência recebidos foram simulados usando a equação de desvio Doppler, as efemérides do satélite e as localizações geográficas nominais dos transmissores. Esse satélite é representativo do satélite quase equatorial (SCD-2, com 25° de inclinação).

A partir desses conjunto de arquivos, vários testes foram realizados com a finalidade de se observar o efeito de erros não inseridos (condição ideal - subseção 3.1), e inseridos propositalmente para simular condições realísticas (condição não ideal - subseção 3.2) tanto nas efemérides como nas medidas Doppler. As simulações e os resultados foram obtidos através de algoritmos desenvolvidos na linguagem "Fortran 77" e compilado em PC (computador pessoal) para fins de portabilidade, onde os "bias" não são estimados.

Os resultados e análises se encontram em tabelas e gráficos, com um total de 20 arquivos simulados, onde cada arquivo equivale a uma passagem do satélite e abrange toda a curva Doppler. Dos 20 arquivos, 10 são simulados com alta taxa de amostragem, ou seja, cerca de 600 medidas de desvio Doppler por passagem, o que equivale a uma medida a cada segundo; e os outros 10 estão com taxa de amostragem menor, ou seja, uma medida a cada 90 segundos. O tempo decorrido por passagem é de cerca de 10 minutos (para satélites baixos), que equivale ao intervalo em que o círculo de visibilidade do satélite inclui a estação receptora e o transmissor.

Foram considerados três transmissores situados em diferentes localizações fixas, com os seguintes valores das respectivas longitudes, latitudes e frequências nominais:

- a) PCD: 32692 (próximo a Cuiabá)  
Longitude = 304.02° (leste)  
Latitude = 17.17° (sul)  
Frequência nominal = 401.65 MHz
- b) PCD: 32694 (Amazonas)  
Longitude = 300.97° (leste)  
Latitude = 6.78° (sul)  
Frequência nominal = 401.65 MHz
- c) PCD: 113 (Peru)  
Longitude = 282.84999° (leste)  
Latitude = 11.7761° (sul)  
Frequência nominal = 401.62 MHz

Para esses transmissores, utilizou-se as efemérides do satélite quase equatorial SCD-2 e a estação receptora que se encontrava em Cuiabá, onde 4 arquivos (passagens de satélite) foram simulados usando o 32692, 2 usando o 32694, e 14 usando o 113.

Conhecendo-se a posição geográfica (longitude, latitude) de referência dos transmissores, e a calculada pelo software, a expressão que descreve o erro (tri-dimensional) em quilômetros é dada como:

$$\text{Erro (km)} = \left\| r_{ref} - r_{cal} \right\| \quad (7)$$

onde:

- a) *Erro (km)* é o erro em quilômetros da norma da diferença entre os vetores  $r_{ref}$  e  $r_{cal}$ ;
- b)  $r_{ref}$  é o vetor posição de referência do transmissor;
- c)  $r_{cal}$  é o vetor posição calculado pelo "software" (geolocalizador);
- d)  $\| \cdot \|$  é a norma do vetor.

A representação geométrica está indicada na Fig. (1), como segue:

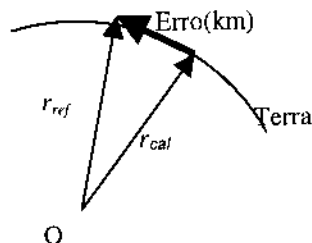


Figura 1 - Representação geométrica do erro em quilômetros.

### 3.1. Simulações sob condições ideais: alta e baixa amostragens, sem erro nas efemérides e sem erro nas medidas de desvio Doppler

Duas taxas de amostragem das medidas de desvio Doppler foram consideradas:

- i) alta amostragem com 600 pontos por passagem, correspondendo a uma taxa de aproximadamente 1 Hz;
- ii) baixa amostragem com 7 pontos por passagem correspondendo a uma medida a cada 90 segundos (~0,01 Hz).

Os resultados considerando os 20 arquivos simulados sob condições ideais, sem erro nas efemérides e sem erro nas medidas Doppler, estão indicados na Tab. (1).

A coluna do erro médio em quilômetros (km), que aparece na tabela seguinte, representa a média aritmética dos erros das localizações geográficas em relação à posição verdadeira do transmissor (conforme Eq. (1)), onde considerou-se 5 passagens ascendentes e 5 descendentes do satélite, por amostragem. As colunas seguintes: máximo e mínimo, representam os valores máximos e mínimos absolutos das 5 passagens; as colunas denominadas por "desc." e "asc." informam se a órbita do satélite foi descendente ou ascendente; e  $\sigma$  é o desvio padrão em relação à amostra de 5 passagens.

Tabela 1. Condições ideais

No de Pass.	Amostragem	Erro médio $\pm\sigma$ (km)		Máximo (km)		Mínimo (km)	
		desc.	asc.	desc.	Asc.	desc.	asc.
10	600	5.E-05 $\pm$ 4.E-05	9.E-05 $\pm$ 4.E-05	1.E-04	2.E-04	1.E-05	5.E-05
10	7	4.E-04 $\pm$ 4.E-04	4.E-04 $\pm$ 2.E-04	1.E-03	7.E-04	1.E-04	2.E-04

Observando a Tab. (1), o erro médio e a dispersão da localização se encontram entre  $10^{-4}$  km e  $10^{-5}$  km, mostrando que o geolocalizador desenvolvido, usando dados que simulam condições ideais, fornece resultados precisos. Os arquivos com alta amostragem produziram resultados uma ordem de grandeza mais precisos do que os de baixa amostragem, ou seja, uma quantidade maior de medidas implica em resultado estatístico melhor.

### 3.2. Impacto de erros (simulados)

Foram considerados, nesta seção, os mesmos transmissores, taxas de amostragem, satélites e estações de recepção da seção anterior. Os resultados e as análises estão indicados em tabelas e gráficos.

Considerou-se desta feita os arquivos simulados sob condições não ideais, ou seja, erros inseridos propositalmente. Os erros considerados foram:

- erros aleatórios nas medidas Doppler;
- erros tendenciosos nas medidas Doppler;
- erros nas efemérides dos satélites.

Com a finalidade de se aproximar de condições realísticas, o estimador de "bias" no algoritmo desenvolvido foi desligado, de sorte que o geolocalizador irá assumir que não existe "bias" nas medidas Doppler.

#### 3.2.1. Erros aleatórios 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. Utilizou-se o satélite SCD-2, e os resultados da precisão da localização estão representados na Tab. (2).

Tabela 2. Caso com erros aleatórios nas medidas doppler

No de Pass.	Erros Alcat.(Hz)	Amostragem	Erro médio $\pm\sigma$ (km)		Máximo (km)		Mínimo (km)	
			desc.	asc.	desc.	asc.	desc.	asc.
10	1	600	0.02 $\pm$ 0.00	0.02 $\pm$ 0.00	0.02	0.02	0.01	0.01
10	1	7	0.28 $\pm$ 0.21	0.15 $\pm$ 0.04	0.59	0.22	0.07	0.12
10	10	600	0.18 $\pm$ 0.03	0.19 $\pm$ 0.04	0.21	0.22	0.12	0.11
10	10	7	2.84 $\pm$ 2.09	1.50 $\pm$ 0.36	6.00	2.21	0.69	1.22
10	100	600	1.79 $\pm$ 0.32	1.93 $\pm$ 0.43	2.14	2.19	1.21	1.07
10	100	7	31.38 $\pm$ 24.67	14.99 $\pm$ 3.61	69.00	22.09	6.86	12.14

Observando a Tab. (2), os valores da coluna do erro médio aumentaram na medida que o erro aleatório inserido nas medidas Doppler aumentou. O mesmo aconteceu na quantidade de amostras por passagem. Para baixa amostragem (7), os erros em geral foram maiores do que para alta amostragem (600), cerca de uma ordem de grandeza. As colunas referentes ao máximo e mínimo, 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. Em baixas amostragens um erro aleatório de 1 Hz causa erros de algumas centenas de metros, de 10 Hz causa erros de alguns quilômetros, e 100 Hz algumas dezenas de quilômetros. Os resultados de alta amostragem (600 por passagem) são para referência e nunca serão obtidas na prática.

A representação gráfica do resultado individual das 60 passagens implícitas na Tab. (2) estão indicados na Fig. (2).

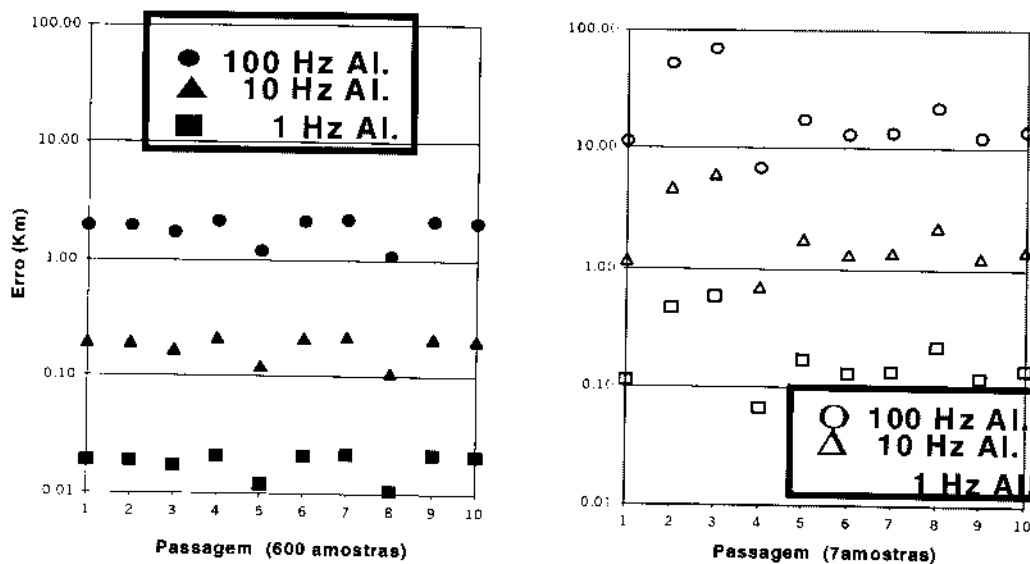


Figura 2. Erro aleatório para passagens contendo 600 e 7 amostras.

Nesta análise, 60 passagens foram consideradas com taxas de 600 e de 7 amostras por passagem. O eixo x das abscissas indica o número da passagem, o eixo y das ordenadas, em escala logarítmica de base 10, se refere à variação do erro em quilômetros na localização, onde o símbolo quadrado representa o resultado ao se inserir erros aleatórios de 1 Hz na medida Doppler; o triângulo, 10 Hz; e o círculo, 100 Hz. Os gráficos do lado esquerdo das figuras consideram alta amostragem, e os do lado direito, baixa amostragem. Comparando os dois gráficos da Fig. (2), verifica-se que os resultados dos erros da localização obtidos com a alta amostragem foram menores, cerca de uma ordem de grandeza logarítmica, do que aqueles com os de baixa amostragem.

### 3.2.2. Erros tendenciosos nas medidas Doppler

Neste caso, para analisar o efeito de erros sistemáticos, foram inseridos erros tendenciosos de 1 Hz, 10 Hz e 100 Hz nas medidas Doppler, usando os satélites SCD-2 e o NOAA-12. Os resultados estão representados na Tab. (3).

Tabela 3. Caso com erros tendenciosos nas medidas doppler

No de Pass.	Erro Tend.(Hz)	Amostragem	Erro médio $\pm \sigma$ (km)	
			desc.	asc.
10	1	600	0.19 $\pm$ 0.04	0.26 $\pm$ 0.02
10	1	7	0.19 $\pm$ 0.03	0.25 $\pm$ 0.01
10	10	600	1.88 $\pm$ 0.39	2.58 $\pm$ 0.17
10	10	7	1.95 $\pm$ 0.26	2.51 $\pm$ 0.09
10	100	600	18.81 $\pm$ 3.84	25.77 $\pm$ 1.72
10	100	7	19.44 $\pm$ 2.56	25.10 $\pm$ 0.90

Observando a Tab. (3), os valores da coluna do erro médio aumentam quando os 3 valores de erros tendenciosos inseridos nas medidas Doppler também aumentam. O erro médio para satélites com órbita ascendente aparenta ser maior do que os de órbita descendente, porém não de maneira significativa a ponto de ser conclusiva. Entretanto, pode-se notar, 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 dependem em menor grau da taxa de amostragem. Portanto, justifica-se a introdução do estimador de "bias" no algoritmo de geolocalização.

### 3.2.3. Erros de efemérides com e sem erros de observação

Nesta seção são considerados erros de 10 e 100 km nas efemérides das órbitas do satélite, para verificar como a precisão nas efemérides, impactam na precisão da localização. Conjuntamente, foram incluídos erros de observação (ou medidas Doppler) de 10 e 100 Hz aleatórios e/ou tendenciosos.

Os resultados considerando apenas erros nas efemérides, ou também adicionando erros de observação estão prescritos na Tab. (4).

Tabela 4. Caso com erros de efemérides e de observação

No de Pass.	Erros Efem.(km)	Erros Doppler (Hz)	Amostragem	Erro médio $\pm \sigma$ (km)	
				desc.	Asc.
10	10	Nenhum	600	8.8 $\pm$ 0.1	8.6 $\pm$ 0.03
10	10		7	8.8 $\pm$ 0.1	8.6 $\pm$ 0.03
10	10	10 aleat.	600	8.9 $\pm$ 0.1	8.7 $\pm$ 0.04
10	10		7	9.3 $\pm$ 1.1	8.3 $\pm$ 0.3
10	10	10 tend.	600	10.5 $\pm$ 0.3	10.9 $\pm$ 0.1
10	10		7	10.5 $\pm$ 0.3	10.9 $\pm$ 0.1
10	10	10 aleat. + 10 tend.	600	10.5 $\pm$ 0.3	11.0 $\pm$ 0.1
10	10		7	10.6 $\pm$ 0.4	10.7 $\pm$ 0.1
10	100	Nenhum	600	88 $\pm$ 0.7	86 $\pm$ 0.3
10	100		7	88 $\pm$ 0.8	86 $\pm$ 0.3
10	100	100 aleat.	600	89 $\pm$ 0.9	87 $\pm$ 0.5
10	100		7	93 $\pm$ 12.0	83 $\pm$ 2.9
10	100	100 tend.	600	105 $\pm$ 2.7	109 $\pm$ 0.6
10	100		7	105 $\pm$ 2.6	109 $\pm$ 0.7
10	100	100 aleat. + 100 tend.	600	105 $\pm$ 2.7	110 $\pm$ 0.6
10	100		7	107 $\pm$ 4.2	107 $\pm$ 0.8

Observando a Tab. (4), as localizações obtidas tiveram, naturalmente, os maiores erros ao se inserirem todos os tipos de erros simultaneamente. Pode ser notado que a contribuição maior 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 o nível de erros adicionado é semelhante ao obtido na Tab. (2). Pode-se concluir que, a precisão nos elementos "two-lines" (efemérides) produz impacto direto na precisão da localização, ou seja, 10 km de erro nas efemérides resulta 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 obtidos se os erros nas efemérides forem inferiores a 2 km, os erros aleatórios menores que 10 Hz, e os erros tendenciosos menores que 10 Hz, em condições de baixa taxa de amostragem.

A Fig. (3) com 600 e com 7 amostras respectivamente, sintetizam graficamente os diversos tipos de erros simulados versus o erro médio da localização, em escala logarítmica de base 10, conforme valores indicados nas tabelas anteriores, considerando órbita ascendente.

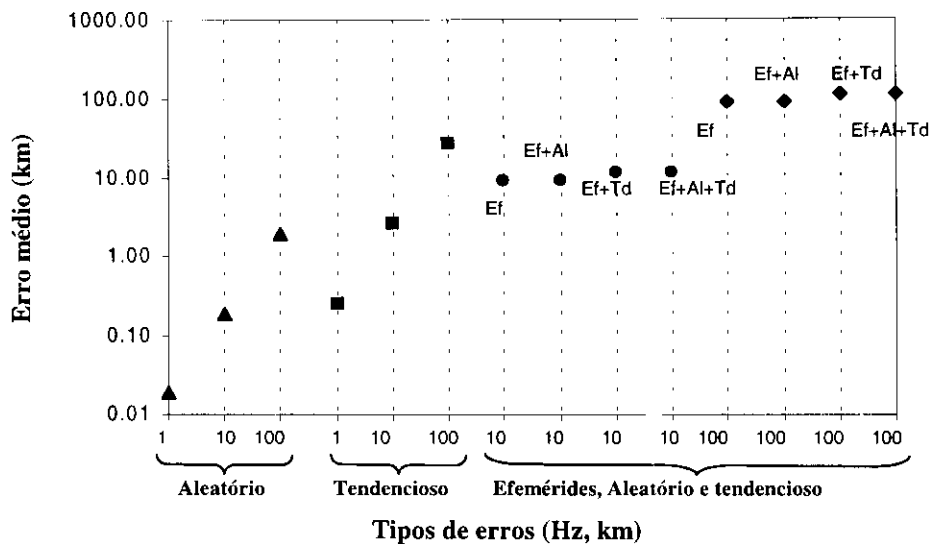


Figura 3. Variação do erro médio de localização versus o tipo de erro considerado, com 600 amostras.

Observando a Fig. (3), os triângulos e os quadrados representam a variação do erro médio em quilômetros, conforme valores da Tab. (2) e da Tab. (3), onde o eixo das abcissas indica a quantidade de erros aleatórios e tendenciosos inseridos nas medidas Doppler e efemérides. Pode-se notar, que a contribuição tendenciosa prevalece sobre a aleatória. Os círculos e losangos indicam o erro em quilômetros obtido, considerando todos os tipos de erros inseridos, tanto nas efemérides como nas medidas Doppler, conforme indicados na área do gráfico. Pode-se perceber que não houve acréscimo significativo ao se inserir, além de erros nas efemérides, erros aleatórios e tendenciosos. A mesma análise pode ser feita considerando 7 amostras por passagem do satélite como mostra a Fig. (4).

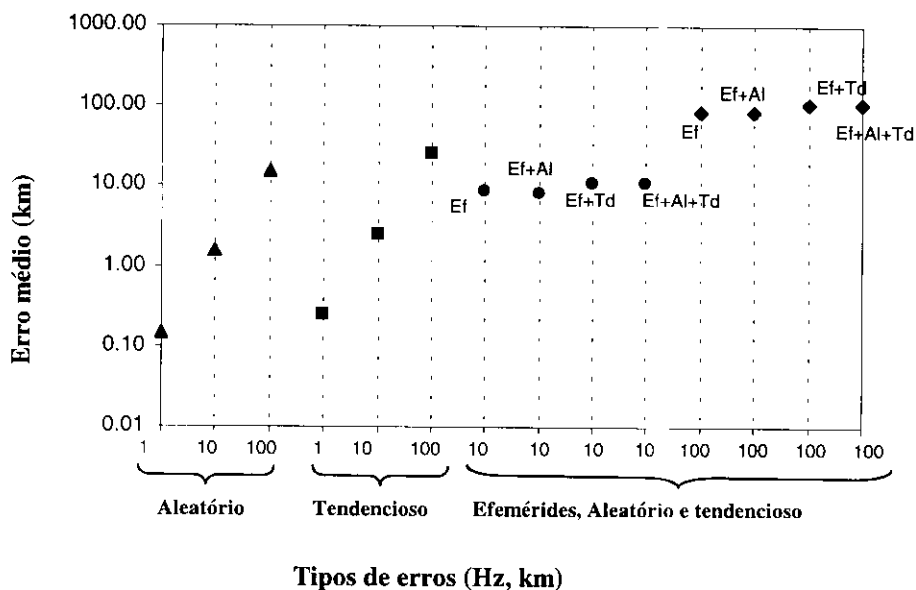


Figura 4. Variação do erro médio de localização versus o tipo de erro considerado, com 7 amostras.

Pode-se notar na Fig. (4), uma diferença em relação à 2, na qual os erros aleatórios, considerando 7 amostras por passagem, tiveram maior influência do que no caso com 600 amostras.

#### 4. Conclusões

A Tab. (5) apresenta resumidamente os resultados. Nelas consideram-se as duas amostragens (600 e 7), as duas órbitas (descendente e ascendente), os diversos tipos de erros inseridos nas medidas Doppler e nas efemérides. Baseando-se nestas tabelas, algumas conclusões podem ser obtidas.



Tabela 5. Síntese de resultados para alta amostragem (600 amostras)

No de pass	Tipo de erro inserido	Amostragem	SCD-2 desc.	SCD-2 asc.	Amostragem	SCD-2 desc.	SCD-2 asc.
			Erro	Médio (Km)		Erro	Médio (Km)
4.E-04	4.E-04	600	5.E-05	9.E-05	7	4.E-04	4.E-04
0.28	0.15		0.02	0.02		0.28	0.15
2.8	1.5		0.2	0.2		2.8	1.5
31.4	15.0		1.8	1.9		31.4	15.0
0.2	0.3		0.2	0.3		0.2	0.3
2.0	2.5		1.9	2.6		2.0	2.5
19.4	25.1		18.8	25.8		19.4	25.1
8.8	8.6		8.8	8.6		8.8	8.6
9.3	8.3		8.9	8.7		9.3	8.3
10.5	10.9		10.5	10.9		10.5	10.9
10.6	10.7		10.5	11.0		10.6	10.7
88.0	86.0		88.0	86.0		88.0	86.0
93.0	83.0		89.0	87.0		93.0	83.0
105.0	109.0		105.0	109.0		105.0	109.0
107.0	107.0		105.0	110.0		107.0	107.0

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 está operando adequadamente.

Quanto às diferenças entre os resultados da simulação encontrados para os erros aleatórios e os tendenciosos, pode-se concluir, 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 mantém certa coerência e proporcionalidade; assim, para alta amostragem, erros aleatórios de 1, 10 e 100 Hz produzem erros de 0.02 e 0.2 e 2 km, respectivamente. Para 7 amostras obteve-se resultados igualmente consistentes: erros aleatórios de 1, 10 e 100 Hz produzem erros de 0.2 e 2 e 20 km, 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 de acordo com as 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 a deriva nas medidas. Entretanto, estas tendências podem ser retiradas, se suas estimativas forem realizadas no processo de localização.

Observando os resultados da Tab. (5), 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.

Por fim, nota-se que as precisões da localização independem da passagem do satélite sobre o transmissor ser ascendente ou descendente.

## 5. Referências

- CLS - Service Argos: guide to the Argos System., 1989, Toulouse, September.
- Bierman, G.J., 1977, Factorization methods for discret sequential estimation. New York., Academic.
- Kampel, M.; Stevenson, M.R., 1997, "Heat transport estimates in the surface layer of the Antarctic polar front using a satellite tracked drifter - first results." In: Proceedings of V International Congress of the Brazilian Geophysical Society, São Paulo.
- Lawson, C.L.; Hanson, R.J., 1972, "Solving least Squares Problems." Englewood Cliffs, Prentice.
- Muelbert, C.M.M.; et al., 2000, "Movimentos sazonais de elefantes marinhos do sul da ilha elefante, shetland do sul, antártica, observações através de telemetria de satélites." (in Portuguese) VII Seminars on Antarctica research. São Paulo 2000. Program and abstracts. São Paulo, USP. IG. p.38.
- Resnick, R., 1968, "Introdução à relatividade especial." New York, Wiley.
- Sousa, T.S. 2000, "Geolocalização de transmissores com satélites usando desvio Doppler em tempo quase real." (in Portuguese) PhD dissertation, São José dos Campos, INPE.
- Setzer, A.W., 1997, "Manual do sistema de dados remotos." (in Portuguese) São José dos Campos, INPE, ProAntar project.

Stevenson, M. R.; Dias-Brito, D.; Stech, J. L.; Kampel, M., 1998, How do cold biota arrive in a tropical bay near Rio de Janeiro Bay, Brazil. *Continental Shelf Research*, v. 18, n. 13, p. 1595-1612.  
Techno - Sciences., 2000, COSPAR/SARSAT. [online] [www.technosci.com/](http://www.technosci.com/) 2000, Oct. 2000.

## **GEO-LOCATION OF TRANSMITTERS USING IDEAL AND NON-IDEAL DATA, DOPPLER SHIFTS AND LEAST SQUARES**

**Cristina Tobler de Sousa**

INPE/DMC, Av. dos Astronautas, 1758, C.P. 515, CEP 12227-010, São José dos Campos, Brasil  
[cristina@dem.inpe.br](mailto:cristina@dem.inpe.br)

**Hélio Koiti Kuga**

INPE/DMC, Av. dos Astronautas, 1758, C.P. 515, CEP 12227-010, São José dos Campos, Brasil  
[hkk@dem.inpe.br](mailto:hkk@dem.inpe.br)

**Alberto W. Setzer**

INPE/LMO, Av. dos Astronautas, 1758, C.P. 515, CEP 12227-010, São José dos Campos, Brasil  
[asetzer@met.inpe.br](mailto:asetzer@met.inpe.br)

*Abstract. In this paper we describe method implemented at INPE ( Brazilian Space Research Institute) for obtaining the geographic localization (geo-location) of transmitters via satellites, using Doppler shifts and batch estimator based on least-squares technique. Near real-time geographical location of transmitters through satellites is used to monitor and rescue people in remote areas, or to track animals and oceanographic buoys for scientific research. The geo-location results were obtained through simulated sets of data. First, simulations for ideal cases were carried out. Afterwards, there were introduced random and bias noise in the nominal frequency, to characterize the different levels of errors encountered in practice. Finally, satellite ephemeris errors were introduced through deviations in the mean motion of satellites SCD-2 and CBERS-1 utilized in this work. This paper addresses the modeling of the Doppler shift measurements and the non-linear least squares technique applied to the problem. The results and analysis of the geographic location method are shown and depicted in the paper, demonstrating the location accuracy achievable by such a near real-time system technique.*

**Keywords.** Doppler shifts, transmitter, geo-location, least squares