

AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DA PRESSÃO DE RADIAÇÃO SOLAR PARA SATÉLITES GPS

Luiz Danilo Damasceno Ferreira
Universidade Federal do Paraná
Departamento de Geociências
CP: 19011 CEP: 81531-990
Curitiba PR Brasil

Helio Koiti Kuga
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Divisão de Mecânica Espacial e Controle
CP: 515 CEP: 12201-970
São José dos Campos SP Brasil

RESUMO

Através do modelo ROCK42 desenvolvido para determinar a força de pressão de radiação solar sobre os satélites GPS é possível estimar o coeficiente de pressão de radiação com dados de rastreamento. Este trabalho mostra uma estratégia para avaliar este coeficiente, baseado na data de lançamento. A estratégia é verificada através da propagação de órbitas dos satélites GPS.

ABSTRACT

By means of the ROCK42 model which was developed to determine the solar radiation pressure force on GPS satellites it is possible to estimate the solar pressure coefficient from tracking data. This paper shows a strategy to evaluate such coefficient, based on launching date. The strategy is checked by orbit propagation of the GPS satellites.

1. INTRODUÇÃO

Dentre as perturbações que atuam sobre os satélites GPS, a devida a pressão de radiação solar merece uma atenção especial, em virtude da estrutura complexa destes satélites. Deste modo, o modelo onde se considera a área da seção transversal do satélite como constante, foi substituído por uma modelagem mais completa onde o satélite foi subdividido em várias superfícies (painéis, antenas) as quais são modeladas como um plano ou um cilindro.

Fliegel e Gallini, 1989, desenvolveram um modelo para a pressão de radiação solar para os satélites do bloco I, chamado de modelo ROCK4 e outro para os satélites do bloco II, o modelo ROCK42. Uma versão mais atualizada desses modelos foi desenvolvida por Fliegel *et al.*, 1992, onde por exemplo, foi incluída a radiação térmica, as características óticas das várias superfícies do satélite, etc. Nesses modelos é assumido que os satélites são mantidos orientados para o Sol, isto é, os painéis solares permanecem normais ao plano que contém o Sol, a Terra e o satélite.

Este trabalho faz uma aplicação do modelo ROCK42 para avaliar o efeito da pressão de radiação solar sobre o satélite GPS.

2. MODELO DE PRESSÃO DE RADIAÇÃO SOLAR

A aceleração devida à pressão de radiação solar sobre o satélite GPS, é dada de uma forma geral por:

$$\ddot{\mathbf{r}}_{PR} = \upsilon \left[\frac{\gamma}{m} \left(G_X F_X \hat{\mathbf{X}} + G_Z F_Z \hat{\mathbf{Z}} \right) + Y_b \hat{\mathbf{Y}} \right], \quad (2.1)$$

onde υ é o fator sombra, $\hat{\mathbf{X}}$, $\hat{\mathbf{Y}}$, $\hat{\mathbf{Z}}$ são os vetores unitários no sistema de eixos fixos no satélite, γ , G_X , G_Z são os fatores de escala com valores nominais próximo de 1, Y_b é chamado de “bias” da aceleração, m é a massa do satélite, F_X , F_Z são as componentes da força de pressão de radiação em relação aos eixos X e Z respectivamente.

Este modelo é adequado para a determinação de órbitas dos satélites GPS e pode-se estimar γ ou então G_X , G_Z e Y_b simultaneamente com os parâmetros da órbita.

2.1 Fatores de Escala

Os fatores de escala γ , G_X e G_Z podem ser estimados juntos com os parâmetros da órbita na determinação de órbitas dos satélites GPS. Fliegel *et al.*,

B. Ci. Geodésicas, Curitiba, v. 2, p.3-11, 1997.

1992, estimaram estes fatores para os sete primeiros satélites GPS do bloco II durante o período de 1989-1990. Após a análise dos dados de rastreamento concluíram que o comportamento destes fatores são similares para todos os satélites deste bloco. No caso de um satélite recém colocado em órbita a aceleração aparente é de aproximadamente 9% maior que o valor predito utilizando o modelo ROCK42 (T20).

A estratégia adotada neste trabalho para a avaliação destes fatores (G_x , G_z) foi a de se levar em consideração a data de lançamento do satélite GPS. Por exemplo, para o satélite numero 18, lançado em 24/01/1990, determina-se o valor do fator de escala através da expressão (Fliegel *et al.*,1992):

$$G_x, G_z = 1 + 0,06 \exp(-T/18), \quad (2.2)$$

onde T é o tempo em semanas GPS desde a entrada do satélite em operação. A data do satélite 18 corresponde à semana GPS 525 a qual é relacionada com a origem da semana GPS (05/01/1980). Aparentemente, os fatores de escala G_x e G_z tem o mesmo valor teórico (Lichten e Border, 1987).

A figura 2.1 mostra as avaliações do fator de escala (equação 2.2), utilizando a estratégia proposta, para os satélites numeros 14, 13 e 16, respectivamente, em função do número de semanas GPS desde a data de seus lançamentos. Observa-se que o comportamento destas curvas é similar à apresentada por Fliegel *et al.*,1992.

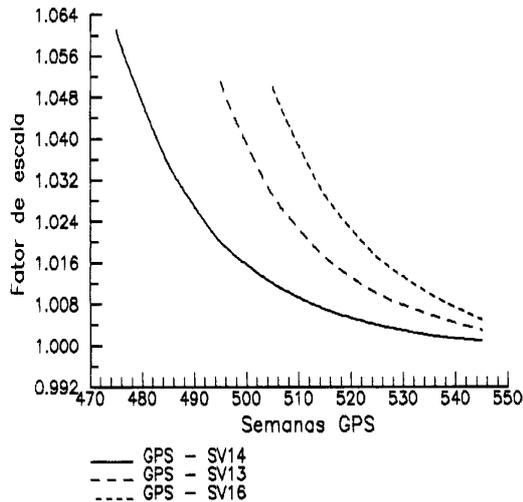


Figura 2.1 - Fatores de escala.

Então para saber qual o valor do fator de escala G_x (ou G_z) para uma época, verificar qual a semana GPS correspondente e aplicar a estratégia proposta.

Quanto ao “bias” da aceleração Y_b ele deve ser estimado através de medidas e não por modelos teóricos. Neste trabalho será adotado o valor de $-0,8 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$, pois ele é bem representativo para os satélites do bloco II (Fliegel *et al.*, 1992).

3. SISTEMA DE COORDENADAS

O modelo ROCK42 é expresso em relação ao sistema fixo no satélite. O eixo +Z é radialmente orientado na direção da Terra. A direção do eixo +X é positiva no sentido do plano que contém o Sol. Este plano é formado pelos eixos X e Z. O eixo +Y completa o sistema e está localizado em um dos painéis solares.

Então o eixo +Z é definido por:

$$\hat{Z} = -\frac{\vec{r}}{r}, \quad (3.1)$$

onde \vec{r} é o raio vetor do satélite no sistema inercial J2000.

O eixo +Y é definido por:

$$\hat{Y} = \frac{\hat{Z} \times \hat{S}}{|\hat{Z} \times \hat{S}|}, \quad (3.2)$$

sendo \hat{S} o vetor unitário do Sol no referido sistema inercial, e define-se +X por:

$$\hat{X} = \hat{Y} \times \hat{Z}, \quad (3.3)$$

para completar o sistema tri-ortogonal considerado.

4. FORÇA DE PRESSÃO DE RADIAÇÃO

Para a modelagem matemática das forças de pressão de radiação solar que serão utilizados na equação (2.1) será o modelo ROCK42 com a versão T20. Então as forças em relação aos eixos X e Z em unidades de 10^{-5} N são dadas por:

$$F_x = -8,96 \sin \Psi + 0,16 \sin 3\Psi + 0,10 \sin 5\Psi - 0,07 \sin 7\Psi , \quad (4.1)$$

$$F_z = -8,43 \cos \Psi , \quad (4.2)$$

onde ψ é o ângulo entre o eixo +Z e o Sol, sendo definido por:

$$\Psi = \cos^{-1}(\hat{Z} \cdot \hat{S}) . \quad (4.3)$$

5. PROCEDIMENTO PROPOSTO

A equação do movimento de um satélite é dada por:

$$\ddot{\vec{r}} = -\frac{\mu}{r^3} \vec{r} + \ddot{\vec{r}}_t , \quad (5.1)$$

onde $\mu=Gm$. O primeiro termo do segundo membro da equação (5.1) representa a aceleração devido aos dois corpos e $\ddot{\vec{r}}_t$ as acelerações perturbadoras que neste trabalho só será levada em consideração aquela devida à pressão de radiação (equação 2.1).

Para avaliar a influência desta perturbação sobre o movimento dos satélites GPS, foi proposto o seguinte procedimento:

- a - propagar a equação (5.1) numericamente por um intervalo de tempo apenas com a aceleração dos dois corpos a qual é tomada como órbita de referência;
- b - propagar a equação (5.1) numericamente no mesmo intervalo de tempo levando-se em consideração somente a perturbação devida à pressão de radiação;
- c - comparar os erros de posição encontrados nestas propagações em função de suas componentes radial, normal e transversal da órbita de referência.

5.1 Testes

Para avaliar a perturbação da pressão de radiação sobre os satélites GPS utilizando o modelo ROCK42 e a estratégia adotada para o cálculo dos fatores de escala, foram escolhidos três satélites GPS distribuídos em três planos orbitais diferentes.

- Satélite 17 (PRN 17) no plano D;
- Satélite 23 (PRN 23) no plano E;
- Satélite 26 (PRN 06) no plano C.

As condições iniciais para a integração numérica da equação (5.1), de acordo com o procedimento proposto, estão listadas abaixo.

Satélite n° 17	Data: 27/05/95
	Horas: 4,0 h
a (m)	26560502,3577
e	0,0079951
I (graus)	55,7696304
Ω (graus)	134,7370673
ω (graus)	120,1911983
M (graus)	19,0529676
G_x, G_z	1,000
Satélite n° 23	Data: 27/05/95
	Horas: 6,0 h
a (m)	26561063,8827
e	0,0095379
I (graus)	55,0081400
Ω (graus)	220,4045173
ω (graus)	-130,8326244
M (graus)	-92,6502963
G_x, G_z	1,000
Satélite n° 36	Data: 27/05/95
	Horas: 0.8622 h
a (m)	26559219,3969
e	0,00611768
I (graus)	55,0576130
Ω (graus)	24,4895583
ω (graus)	-165,0593150
M (graus)	-72,0171361
G_x, G_z	1,002

O tempo de propagação da equação (5.1) foi de 2 dias.

As figuras (5.2), (5.3) e (5.4) mostram os erros de posição em forma das componentes radial (R), normal (N) e transversal (T) dos satélites números 17, 23 e 36 respectivamente. A tabela (5.1) mostra estes erros após 3 horas de propagação e no final de 2 dias de simulação.

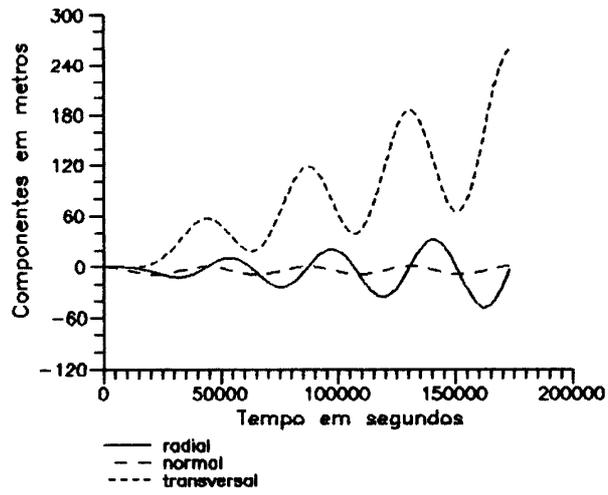


Figura 5.2 - Erros de posição: satélite 17

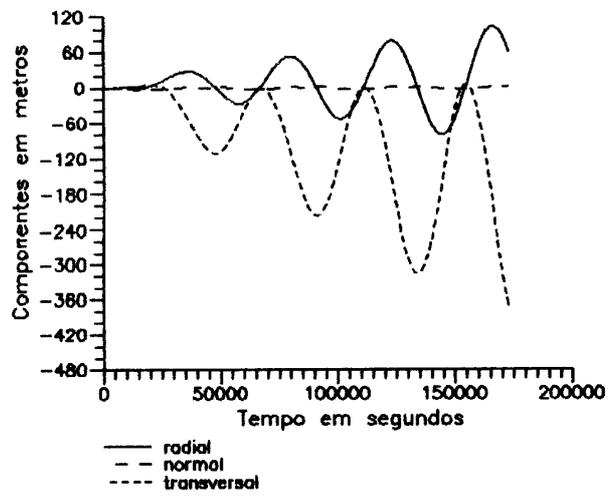


Figura 5.3 - Erros de posição: satélite 23

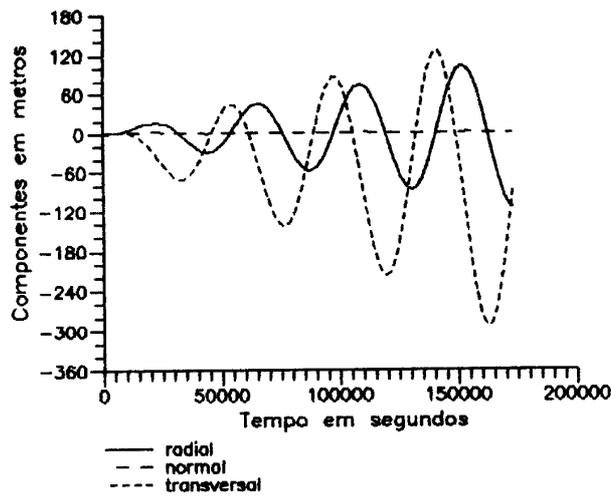


Figura 5.4 - Erros de posição: satélite 36

Tabela 5.1 - Erros de posição

Tempo	Satélite	R (m)	N (m)	T (m)
3 horas	17	-0,58	-4,53	-0,48
	23	-1,21	-2,33	0,58
	36	4,94	1,27	0,74
2 dias	17	-4,52	0,35	257,51
	23	59,13	-0,51	-373,51
	36	-114,17	0,33	-84,22

6. CONCLUSÕES

Através dos testes realizados pode-se concluir que os resultados estão de acordo com os apresentados na literatura (King *et al.*, 1987), isto é, os erros de posição estão dentro das faixas de 5 m a 10 m para 3 horas de propagação e entre 100 m e 800 m após 2 dias. Os limites destas faixas, dependem da orientação da órbita do satélite em relação ao Sol. Então, dependendo do plano orbital em que se encontra o satélite, a pressão de radiação solar atuará com maior ou menor intensidade, como é observado pelas análises dos resultados apresentados.

Quanto aos fatores de escala, a estratégia proposta demonstrou ser adequada para avaliá-los, pois não comprometeram os resultados obtidos. Uma vez

encontrados estes fatores pode-se considerá-los constantes para toda a semana GPS correspondente.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FLIEGEL, H. F.; GALLINI, T. E.; SWIFT, E. R. Global positioning system radiation force model for geodetic applications. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v.97, n. B1,p.559-568, 1992.

FLIEGEL, H. F.; GALLINI, T. E. Radiation pressure model for Block II GPS Satellites. In: 5th INTERNATIONAL GEODETIC SYMPOSIUM ON SATELLITE POSITIONING. **Proceedings...**, Las Cruces, 1989, vol.1, p.789-798.

KING, R. W.; MASTERS, E. G.; RIZOS, C.; STOLZ, A. **Surveying with GPS**. Austrália: University of New South Wales, 1985.

LICHTEN, S. M.;BORDER, J. S. Strategies for high-precision global positioning system orbit determination. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 92, n. B12, p.12751-12762, 1987.

(Recebido em 02/01/96. Aceito para publicação em 28/03/96.)