

# PROPAGAÇÃO DE ÓRBITA DE SATÉLITES ARTIFICIAIS USANDO RECEPTORES GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM)

Bolsista do CNPQ/PIBIC: **André Rodrigo Boscolo Moraes**

Aluno da Escola de Engenharia Industrial de São José dos Campos - EEI

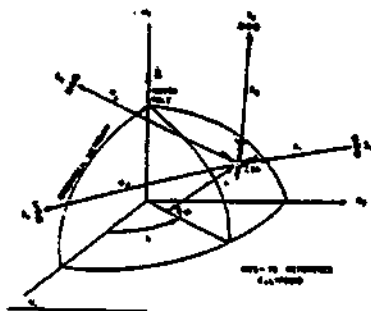
Orientador: **Dr. Otávio S. C. Durão**, Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Propagação de órbita de satélites artificiais usando receptores GPS, propõe integrar órbitas adequando os satélites GPS aos seus respectivos posicionamentos e tempos. Para tal feito, implementou-se as principais perturbações agindo nos satélites GPS, afim de se obter um mínimo de precisão razoável nos resultados. Após, a perturbação devida à pressão de radiação solar e às que permitem a comparação entre as diversas perturbações das quais podem afetar o movimento dos satélites componentes da constelação GPS, implementou-se propriedades numéricas propostas por um algoritmo de navegação, visando um baixo-custo em receptores GPS, e que correspondem às modernas aplicações geodésicas atuais.

Receptores GPS de baixo-custo transmitem códigos pseudo-ranges decorrentes de dois sinais da banda, porém estas transmitem sinais a todos os usuários mundialmente cadastrados. A disponibilidade do equipamento provém de um pequeno receptor de transmissão pseudo-range e pseudo-range -rate. No entanto, este capta, simultaneamente quatro satélites, estimando assim, erros na ordem de 100 metros que o torna útil à navegação aérea, marítima e espacial (militar americano).

Dois computadores são utilizados na simulação aérea C5A. O primeiro, PROFGEN, é um perfil aéreo genérico desenvolvido pelo Laboratório de Aviação da Força Aérea dos Estados Unidos para uso do computador CDC 6600. Especifica as condições iniciais e uma série de dados de entrada envolvendo a aceleração lateral, inclinação do ângulo e mudança de grau. Integra numericamente as equações de movimento de quinta ordem, algoritmo Kutta-Mercer de passo variável. Os dados de saída do PROFGEN são especificados em intervalos de tempos que incluem a latitude, longitude, altitude, velocidade e os componentes de aceleração de acordo com a referência elíptica geodésica no sistema de coordenadas WGS-72. Estes dados de saída são armazenados, proporcionando assim, dados de entrada para o segundo programa, NAVSIM, que computa os posicionamentos dos satélites GPS em intervalos de tempos estimados.



(Simulação geométrica)

A resolução das posições de navegação dos satélites GPS, introduzindo o algoritmo de navegação aos programas computacionais citados acima, pode ser resolvida da seguinte forma:

Dados fornecidos pelo receptor.

Pseudo-Range ( $r_i$ ,  $i = 1 \rightarrow 4$ ).

Posição dos satélites usuários ( $u_i$ ,  $i = 1 \rightarrow 3$ ).

Posição dos satélites GPS ( $x_{ij}$ ,  $i \rightarrow 4$  e  $j \rightarrow 3$ ).

# PROPAGAÇÃO DE ÓRBITA DE SATÉLITES ARTIFICIAIS USANDO RECEPTORES GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM)

Bolsista do CNPQ/PIBIC: **André Rodrigo Boscolo Moraes**

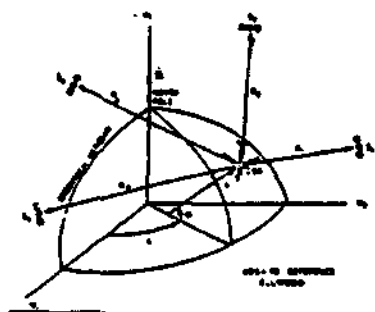
Aluno da Escola de Engenharia Industrial de São José dos Campos - EEI

Orientador: **Dr. Otávio S. C. Durão**, Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Propagação de órbita de satélites artificiais usando receptores GPS, propõe integrar órbitas adequando os satélites GPS aos seus respectivos posicionamentos e tempos. Para tal feito, implementou-se as principais perturbações agindo nos satélites GPS, afim de se obter um mínimo de precisão razoável nos resultados. Após, a perturbação devida à pressão de radiação solar e às que permitem a comparação entre as diversas perturbações das quais podem afetar o movimento dos satélites componentes da constelação GPS, implementou-se propriedades numéricas propostas por um algoritmo de navegação, visando um baixo-custo em receptores GPS, e que correspondem às modernas aplicações geodésicas atuais.

Receptores GPS de baixo-custo transmitem códigos pseudo-ranges decorrentes de dois sinais da banda, porém estas transmitem sinais a todos os usuários mundialmente cadastrados. A disponibilidade do equipamento provém de um pequeno receptor de transmissão pseudo-range e pseudo-range -rate. No entanto, este capta, simultaneamente quatro satélites, estimando assim, erros na ordem de 100 metros que o torna útil à navegação aérea, marítima e espacial (militar americano).

Dois computadores são utilizados na simulação aérea C5A. O primeiro, PROFGEN, é um perfil aéreo genérico desenvolvido pelo Laboratório de Aviação da Força Aérea dos Estados Unidos para uso do computador CDC 6600. Especifica as condições iniciais e uma série de dados de entrada envolvendo a aceleração lateral, inclinação do ângulo e mudança de grau. Integra numericamente as equações de movimento de quinta ordem, algoritmo Kutta-Mercer de passo variável. Os dados de saída do PROFGEN são especificados em intervalos de tempos que incluem a latitude, longitude, altitude, velocidade e os componentes de aceleração de acordo com a referência elíptica geodésica no sistema de coordenadas WGS-72. Estes dados de saída são armazenados, proporcionando assim, dados de entrada para o segundo programa, NAVSIM, que computa os posicionamentos dos satélites GPS em intervalos de tempos estimados.



(Simulação geométrica)

A resolução das posições de navegação dos satélites GPS, introduzindo o algoritmo de navegação aos programas computacionais citados acima, pode ser resolvida da seguinte forma:

Dados fornecidos pelo receptor.

Pseudo-Range ( $r_i$ ,  $i = 1 \rightarrow 4$ ).

Posição dos satélites usuários ( $u_i$ ,  $i = 1 \rightarrow 3$ ).

Posição dos satélites GPS ( $x_{ij}$ ,  $i \rightarrow 4$  e  $j \rightarrow 3$ ).

**PROPAGACÃO DE ÓRBITA DE SATÉLITES ARTIFICIAIS  
USANDO RECEPTORES GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM)**

**Bolsista de Iniciação Científica (PIBIC): André Rodrigo Boscolo Moraes**

**Orientadores: Dr. Otávio S. C. Durão**

**Dr. Hélio Koiti Kuga**

**RELATÓRIO PARCIAL**

**INICIAÇÃO CIENTÍFICA**

**1.997**

**INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **Índice**

- 1 **Introdução**
2. **Procedimentos Metodológicos**
3. **Comentários Finais**
4. **Bibliografia Básica**
5. **Apêndice**

# **PROPAGAÇÃO DE ÓRBITA DE SATÉLITES ARTIFICIAIS USANDO RECEPTORES GPS (GLOBAL POSITIONING SYSTEM)**

**Bolsista de Iniciação Científica (PIBIC): André Rodrigo Boscolo Moraes**

**Orientadores: Dr. Otávio S. C. Durão**

**Dr. Hélio Koiti Kuga**

**INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**

## **1. Introdução**

A propagação de órbita de satélites artificiais usando receptores GPS enfatiza neste trabalho uma série de propriedades numéricas, as quais são propostas por um algoritmo de navegação. Porém, este é desenvolvido com a finalidade de servir como base aos receptores GPS de baixo-custo, minimizando para o governo dos Estados Unidos, custos de projeto e de seus derivados.

Para tal experimento, procurou-se informações adequadas a respeito de satélites GPS, do algoritmo de navegação, subrotinas e funções. A linguagem de computador disponível é o Fortran 77 e apresenta bons recursos à pesquisa, pois possui uma biblioteca específica para o trabalho em desenvolvimento. Também há uma subrotina para matrizes inversas que integra a parte de testes do programa até aqui executado. Enfim, uma leitura geral do tópico cedido ao bolsista, o ajudará a se integrar melhor no assunto em questão.

Em relação ao algoritmo de navegação, ao longo do trabalho foram desenvolvidos dois programas computacionais: PROFGEM e NAVSIM. São programas desenvolvidos pelo Laboratório de Aviação da Força Aérea e preparados para simular, aos satélites GPS, condições de vôo que estimam suas posições para determinadas margens de erros em distância.

Outros aspectos da pesquisa de Iniciação Científica abrangem, segundo a metodologia a ser seguida: medidas de pseudo-range, coordenadas da posição do satélite usuário e satélite GPS, como também a matriz inversa .

Procedimento do algoritmo:

- . Selecciona 4 (quatro) satélites da constelação GPS;
- . Obtém as medidas do pseudo-range e coordenadas do satélite GPS;
- . Calcula as medidas do pseudo-range;
- . Determina a diferença entre as medidas pseudo-range e o pseudo-range calculado;
- . Computa a matriz inversa  $H^{-1}$ ;
- . Multiplica  $H^{-1}$  pelas medidas calculadas anteriormente;
- . Estima o posicionamento;

Nota-se que o algoritmo proporciona uma simples solução ao problema de navegação GPS.

É importante ressaltar, que o modelo proposto tem como principal objetivo determinar o posicionamento do satélite do usuário em tempos determinados, admitindo assim, a propagação da órbita deste satélite às aplicações geodésicas atuais. Como também, usufruir de recursos disponíveis pelo algoritmo de navegação, a qual visa o uso de receptores de baixo-custo.

## **2. Procedimentos Metodológicos**

GPS (Global Positioning System) é um sistema de navegação de satélites, desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos. Consiste numa constelação de 26 (vinte e seis) satélites dispostos numa órbita circular de 12 horas, como também apresenta uma inclinação de  $63^\circ$  a uma altura de 11.000 NM (milhas náuticas). A transmissão, devida aos códigos pseudo-ranges, acontece através de dois sinais da banda que são transmitidos a todos os usuários mundialmente cadastrados. O usuário dispõe de um equipamento ao qual provém um pequeno receptor de transmissões pseudo-range e pseudo range-rate. Porém, este capta, simultaneamente quatro ou mais satélites, estimando assim, erros na ordem de 100 metros.

O algoritmo de navegação avalia o satélite GPS numa simulação dinamicamente real e em típicas condições de vôo, determinando o posicionamento numa certa margem de erros estimados anteriormente. Converte também, o posicionamento exato em 3 ou 4 iterações. Seus resultados são apresentados, numa simulação computacional, pela Força Aérea através do vôo da aeronave C5A, de Travis AFB (California) para Hickam AFB (Hawaii).

A seguir, os tópicos principais ao desenvolvimento do programa de Iniciação Científica, “Propagação de Órbita de Satélites Artificiais Usando Receptores GPS (Global Positioning System)”, serão relatados de maneira a permitir uma visualização geral do trabalho em andamento.

Provavelmente, o trabalho sofrerá modificações no decorrer da pesquisa, visando aperfeiçoá-lo em busca de resultados satisfatórios.

A respeito do “Program Receptor GPS”, programa até então desenvolvido e que serve de suporte ao algoritmo de navegação:

Basicamente seus dados de entrada são: modelo de erro implantado para estimar a posição do satélite; medidas de pseudo-range; coordenadas da posição dos satélites usuários e as coordenadas da posição dos satélites GPS.

Subrotinas:

Posição\_GPS: calcula as medidas pseudo-range;

Delta\_R: calcula a diferença das medidas pseudo-range;

Matriz\_H: computa dados, dos quais mais tarde, servirão à matriz inversa;

Delta\_U: resultado da multiplicação da matriz inversa e da diferença das medidas pseudo-range;

Loop\_U: faz um laço entre a subrotina Delta\_U e as coordenadas de posição dos satélites usuários.

Teste da matriz inversa: É necessário testar as subrotinas cedidas pela biblioteca de rotinas Fortran de Mecânica Celeste, XGaussj e Gaussj, verificando se há erros ao implementá-las no “Program Receptor GPS”. Para isso, usa-se dados de uma matriz a qual se conhece sua inversa, para confirmar se sua resposta, no programa de matriz inversa, está ou não de acordo com os resultados esperados.

Quanto à parte complementar, algumas subrotinas foram cedidas pela biblioteca de rotinas Fortran de Mecânica Celeste, pertencentes ao Departamento de Mecânica Espacial e Controle. Citar-se-á a seguir, algumas das principais subrotinas utilizadas pelo software ora em contínuo desenvolvimento.

Rotina de trajetória exata do satélite: simula as perturbações dos dados de trajetória;

Hotelling: algoritmo de navegação;

Satsel: rotina de seleção de satélites;

Satgen: rotina da órbita genérica do satélite e que propaga a posição dos 26 satélites em órbita circular;

Range: rotina de distância de limite genérico.

### **3. Comentários Finais**

É importante ressaltar que, os resultados até então servem de base à continuidade do programa em desenvolvimento. Embora não esteja detalhadamente descrito, representa uma idéia de como está se desenvolvendo o presente projeto de Iniciação Científica do CNPQ. Demais tópicos, aqui não apresentados, serão integrados ao relatório final.

Visto que, “Propagação de Órbita de Satélites Artificiais Usando Receptores GPS (Global Positioning System)” é um trabalho de continuação e desenvolvido pelo mesmo bolsista, muitos dados serão reaproveitados no decorrer deste. Subrotinas, usadas até o presente momento, podem ser substituídas ou modificadas, visando melhores compatibilidades.

### **4. Bibliografia Básica**

P. S. Noe, K. A. Myers, e T. K. Wu “A Navigation Algorithm for the Low-Cost Receiver”.

Microsot “Fortran Power Station Version 1.00”

### **5. Apêndice**

Apresentação do teste alcançado durante a pesquisa:

Inversão de matrizes: os dados de uma matriz a qual se conhece sua inversa, para confirmar se o funcionamento, do programa de matriz inversa, está ou não de acordo com as expectativas esperadas.



Matriz:

$$A = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Matriz inversa:

$$A^{-1} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Teste:

$$A \times A^{-1} = I = \begin{vmatrix} 1.00003 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9999 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.999 \end{vmatrix}$$

Programa de inversão de matrizes:

**PROGRAM Matriz Inversa**

IMPLICIT REAL\*8 (A-H,O-Z)

DIMENSION a(4,4)

a(1,1)=1

a(1,2)=0

a(1,3)=0

a(1,4)=1

a(2,1)=0

a(2,2)=1

a(2,3)=0

a(2,4)=1

a(3,1)=0

a(3,2)=0

a(3,3)=1

```

a(3,4)=1
a(4,1)=0
a(4,2)=0
a(4,3)=0
a(4,4)=1
WRITE(*,*)'Matriz Inversa:',a
CALL xgaussj(a,ai)
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE xgaussj(a,ai)
driver for routine gaussj
INTEGER MP,NP
PARAMETER(MP=20,NP=20)
INTEGER k,l,m,n
REAL a(NP,NP),ai(NP,MP)
n=4
m=4
save Matrices for later testing of results
  do 13 l=1,n
    do 11 k=1,n
      ai(k,l)=a(k,l)
11  continue
13  continue
Invert Matrix
call gaussj(ai,n,NP)
write(*,*) 'Inverse of Matrix A : '
  do 14 k=1,n
    write(*,'(1h ,(6f12.6))') (ai(k,l), l=1,n)
14  continue

RETURN
END

```

```

SUBROUTINE gaussj(a,n,np)
INTEGER n,np,NMAX
REAL a(np,np)
PARAMETER (NMAX=50)
INTEGER i,icol,irow,j,k,l,ll,indx(NMAX),indxr(NMAX),ipiv(NMAX)
REAL big,dum,pivinv
  do 11 j=1,n
    ipiv(j)=0
11  continue
  do 22 i=1,n
    big=0.
    do 13 j=1,n
      if(ipiv(j).ne.1)then
        do 12 k=1,n
          if (ipiv(k).eq.0) then
            if (abs(a(j,k)).ge.big)then
              big=abs(a(j,k))
              irow=j
              icol=k
            endif
          else if (ipiv(k).gt.1) then
            pause 'singular matrix in gaussj'
          endif
12      continue
        endif
13      continue
      ipiv(icol)=ipiv(icol)+1
      if (irow.ne.icol) then
        do 14 l=1,n
          dum=a(irow,l)
          a(irow,l)=a(icol,l)
          a(icol,l)=dum
14      continue

```

```

endif
indxr(i)=irow
indxc(i)=icol
if (a(icol,icol).eq.0.) pause 'singular matrix in gaussj'
pivinv=1./a(icol,icol)
a(icol,icol)=1.
do 16 l=1,n
    a(icol,l)=a(icol,l)*pivinv
16  continue
do 21 ll=1,n
    if(ll.ne.icol)then
        dum=a(ll,icol)
        a(ll,icol)=0.
        do 18 l=1,n
            a(ll,l)=a(ll,l)-a(icol,l)*dum
18  continue
        endif
21  continue
22  continue
do 24 l=n,1,-1
    if(indxr(l).ne.indxc(l))then
        do 23 k=1,n
            dum=a(k,indxr(l))
            a(k,indxr(l))=a(k,indxc(l))
            a(k,indxc(l))=dum
23  continue
        endif
24  continue
RETURN
END

```