

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



José Antonio Godinho Paiva

**Efeitos da Ionosfera de Baixas Latitudes no GPS – SBAS
(Global System Positioning –Space Based Augmentation
System)**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Emanuel Paiva de Oliveria Costa

Rio de Janeiro, setembro de 2004



José Antonio Godinho Paiva

**Efeitos da Ionosfera de Baixas Latitudes no
GPS/SBAS (Global Positioning System –
Space Based Augmentation System)**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Emanuel Paiva de Oliveira Costa
Orientador

Centro de Estudos de Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Eurico Rodrigues de Paula
INPE

Prof. Mauro Soares de Assis
UFF

Prof. Luiz Costa da Silva
Centro de Estudos de Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 09 de setembro de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

José Antonio Godinho Paiva

Graduou-se em Engenharia Elétrica, em maio de 2002, na Universidade Federal de Juiz de Fora. Em fevereiro do mesmo ano, iniciou no Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro seu mestrado na área de eletromagnetismo aplicado.

Ficha Catalográfica

Paiva, José Antonio Godinho

Efeitos da ionosfera de baixas latitudes no GPS – SBAS (Global System Positioning – Space Based Augmentation System) / José Antonio Godinho Paiva ; orientador: Emanuel Paiva de Oliveira Costa. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

96 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Incluí referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Ionosfera. 3. Retardo ionosférico. 4. GPS. 5. SBAS. 6. Erros horizontais. 7. Erros verticais. I. Costa, Emanuel Paiva de Oliveira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

À minha família, Paiva, Zulmira, Giovana e vovó Glorinha e
à minha querida Carolina.

Agradecimentos

A Deus primeiramente.

Ao meu orientador Professor Emanuel Paiva de Oliveira Costa, pela sua dedicação e incentivo.

Aos amigos do PAA, Luciana, Marcela, Pedro Paulo, Pedro G., Ramirez, Sandro, Cristina, Gustavo, e pelo apoio.

Aos funcionários e demais amigos do CETUC.

A tia Terezinha e a Ana Carolina pelo acolhimento e convívio do dia a dia.

Aos meus pais, Paiva e Zulmira, a Giovana e a vovó Glorinha pelo incentivo e ajuda para superar momentos difíceis.

A Carolina, minha fonte inspiradora, sendo o meu maior estímulo para chegar ao fim deste trabalho.

A Capes pelo suporte financeiro.

A todos que contribuíram diretamente ou indiretamente para a conclusão dessa dissertação.

Resumo

Paiva, José Antonio Godinho. **Efeitos da Ionosfera de Baixas Latitudes no GPS – SBAS (Global System Positioning –Space Based Augmentation System)**. Rio de Janeiro, 2004. 96p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A ionosfera de baixas latitudes tem características que poderiam causar problemas à operação do GPS/SBAS. Entre elas se encontra a anomalia equatorial, cuja densidade eletrônica pode apresentar intensos gradientes horizontais (e, portanto, no índice de refração do meio). Estes gradientes podem ser intensos o suficiente para introduzir erros nas previsões resultantes do GPS/SBAS. Para avaliar este problema, foi desenvolvido um programa de simulação em computador que integra modelos para: (i) a previsão das posições dos satélites da constelação GPS; (ii) a evolução temporal e espacial da densidade eletrônica da ionosfera equatorial; e (iii) uma rede de estações de referência de posições fornecidas para analisar os efeitos da anomalia equatorial sobre os erros causados pela ionosfera nos sinais dos satélites GPS recebidos pelas estações. Em cada passo da simulação, diversos procedimentos são realizados. Estes procedimentos são repetidos um grande número de vezes e, ao final da simulação, estatísticas dos erros são apresentadas. Este programa de simulação em computador foi utilizado para analisar a influência do número de estações de referência, assim como de suas localizações, nos erros de posicionamento de aeronaves.

Palavras-chave

GPS, SBAS, Ionosfera, Retardo Ionosférico, Erro Vertical, Erro Horizontal.

Abstract

Paiva, José Antonio Godinho. **Effect of the Ionosphere of Low Latitudes in GPS - SBAS (Global System Positioning –Space Based Augmentation System)**. Rio de Janeiro, 2004. 96p. MSc. Dissrtation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The low-latitude ionosphere has some features that could cause problems even to the joint GPS/SBAS operation. Among them, one finds the equatorial anomaly, whose electronic density – and thus its refractive index – can present intense horizontal gradients. These gradients can be intense enough to induce errors in the predictions by the GPS/SBAS. To analyze this problem, a computer simulation program has been developed. This program integrates models for: (i) forecasting the satellite orbital positions of the GPS constellation; (ii) the temporal and spatial evolution of the electronic density of the low-latitude ionosphere; and (iii) a given network of reference stations to analyze the effects of the equatorial anomaly on the GPS satellite signals received by the stations and users. In each step of the simulation, several procedures are performed. These procedures are repeated several times and, at the end of the simulation, error statistics are presented. This computer simulation program has been used to analyze the influence of the equatorial anomaly and of the number and layout of reference stations upon the errors in aircraft positions provided by the GPS/SBAS.

Keywords

GPS, SBAS, Ionosphere, Ionospheric retardation, Vertical Error, Horizontal Error.

Sumário

1	Introdução	18
2	Ionosfera	20
2.1.	Introdução	20
2.2.	O Campo Magnético e o Sol	21
2.3.	Camadas da Ionosfera	23
2.3.1.	Algumas Características das Camadas da Ionosfera	25
2.3.2.	Regiões da Ionosfera	26
2.4.	Alguns Aspectos da Ionosfera	26
2.4.1.	Anomalia Equatorial	26
2.4.2.	Outras Anomalias e Instabilidades da Ionosfera Equatorial	28
2.5.	Alguns Efeitos da Ionosfera na Propagação de Sinais	29
3	GPS e SBAS	34
3.1.	GPS – Sistema de Posicionamento Global	34
3.1.1.	Introdução	34
3.1.2.	Características do Sistema	35
3.1.3.	Posicionamento	36
3.1.4.	Pseudo-distância e Cálculo da Posição	37
3.2.	SBAS – “Satellite Based Augmentation Systems”	42
3.2.1.	Introdução	42
3.2.2.	As Estações	44
4	Descrição da Simulação	45
4.1.	Introdução	45
4.2.	Constelação GPS	45
4.3.	PIM	48
4.4.	SBAS - Funções das Estações de Referência e das Estações Mestras	49
4.5.	Erros na Localização de Aeronaves	51
4.6.	Arquivos de Entrada e Dados	56
5	Resultados da Simulação	57

5.1. Introdução	57
5.2. Simulação	57
5.3. Resultados	65
5.3.1. Modelo Seccionalmente Linear	65
5.3.2. Erros Verticais e Horizontais nas Posições das Aeronaves	76
6 Conclusão	93
6.1. Trabalhos Futuros	94
Referências Bibliográficas	95

Lista de figuras

Figura 2.1 – Perfis verticais de concentração de gases neutros e de partículas ionizadas em condições de atmosfera diurna não perturbada (reproduzida da referência [19]).	20
Figura 2.2 – Variações das alturas virtuais das camadas da ionosfera com a hora local e com as estações do ano (reproduzida da referência [8]).	21
Figura 2.3 – Equador magnético (reproduzida da referência [22]).	22
Figura 2.4 – Variações do número de manchas solares e do índice F10.7 durante os ciclos solares (dados provenientes da referência [23]).	23
Figura 2.5 – Espectro Solar e ionização da ionosfera (reproduzida da referência [9]).	24
Figura 2.6 – Perfil da concentração eletrônica da ionosfera em baixa e alta atividade solar: (a) dia e (b) noite (reproduzida da referência [20]).	25
Figura 2.7 – Efeito fonte (reproduzida da referência [20]).	27
Figura 2.8 – Anomalia equatorial (reproduzida da referência [9]).	28
Figura 2.9 – Concepção artística da evolução das bolhas ionosféricas (reproduzida da referência [21]).	29
Figura 2.9 – Mapa variação do conteúdo eletrônico total (reproduzida da referência [22]).	32
Figura 3.1 – Representação da constelação de satélites GPS (reproduzida da referência [5]).	34
Figura 3.2 – Representação vetorial satélite-usuário (reproduzida da referência [5]).	38

Figura 3.3 – Relações de tempo com a pseudo-distância (reproduzida da referência [5]).	39
Figura 3.4 – Representação do SBAS (reproduzida da referência [17]).	43
Figura 4.1 – Orientação de uma órbita e posição de um satélite no sistema inercial.	47
Figura 4.2 – Determinação do ponto de penetração (reproduzida da referência [17]).	50
Figura 4.3 – Representação gráfica da validação dos pontos da grade: (a) válido, (b) válido e (c) não válido.	51
Figura 4.4 – Exemplo de grades triangular: (a) $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ e (b) $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ (reproduzida da referência [13]).	52
Figura 4.5 – Definição de algoritmo para interpolação bilinear utilizando quatro pontos da grade (reproduzida da referência [13]).	54
Figura 4.6 – Definição de algoritmo para interpolação bilinear utilizando três pontos da grade (reproduzida da referência [13]).	55
Figura 5.1 – Rede com 15 estações de referência, com pontos de penetração.	59
Figura 5.2 – Rede com 29 estações de referência, com pontos de penetração.	60
Figura 5.3 – Posicionamento das aeronaves, com pontos de penetração: (a) rede de 15 estações de referência; (b) rede de 29 estações de referência.	62
Figura 5.4 – Variação do índice K_p que indica a atividade magnética: (a) solstício de verão (janeiro) (1996-2002) e (b) solstício de inverno (julho) (1996)-(2002).	64
Figura 5.5 – Números de vezes em que os nós da grade estiveram ativos durante todo o período da simulação correspondente ao solstício de verão (janeiro) de 1996 para a rede de 15 estações de referência: (a) vista frontal;	

e (b) vista posterior.

66

Figura 5.6 – Números de vezes em que os nós da grade estiveram ativos durante todo o período da simulação correspondente ao solstício de verão (janeiro) de 1996 para a rede de 29 estações de referência: (a) vista frontal; e (b) vista posterior. 67

Figura 5.7 – Histogramas do número de nós ativos em cada passo da simulação correspondente ao solstício de verão (janeiro) de 1996: (a) rede de 15 estações de referência; e (b) rede de 29 estações de referência. 68

Figura 5.8 – Histogramas bidimensionais do número de satélites visíveis pela aeronave 1 (09°15'S, 47°42'O, altitude de 10km) e do número de pseudodistâncias correspondentes corrigidas por intermédio de interpolação, para a simulação relativa ao solstício de verão (janeiro) de 1996, considerando: (a) rede de 15 estações de referência; e (b) rede de 29 estações de referência. 70

Figura 5.9 – Histogramas da diferença entre os retardos verticais obtidos diretamente a partir do modelo para a ionosfera e por interpolação no nó da grade de coordenadas 05°S, 65°O para o solstício de verão (janeiro) de 1996: (a) rede de 15 estações de referência; e (b) rede de 29 estações de referência. 72

Figura 5.10 – Histogramas da diferença entre os retardos verticais obtidos diretamente a partir do modelo para a ionosfera e por interpolação no nó da grade de coordenadas 20°S, 45°O para o solstício de verão (janeiro) de 2002: (a) rede de 15 estações de referência; e (b) rede de 29 estações de referência. 73

Figura 5.11 – Histogramas da diferença entre os retardos verticais obtidos diretamente a partir do modelo para a ionosfera e por interpolação no nó da grade de coordenadas 25°S, 55°O para o solstício de inverno (julho) de 2002: (a) rede de 15 estações de referência; e (b) rede de 29 estações de referência. 74

Figura 5.12 – Histogramas da diferença entre os retardos calculado diretamente pelo modelo da ionosfera e interpolado a partir dos dados dos nós da grade

no mesmo raio formado por aeronave e satélite visível, para o solstício de verão (janeiro) de 1996: (a) rede de 15 estações de referência; e (b) rede de 29 estações de referência. 77

Figura 5.13 – Histogramas da diferença entre os retardos calculado diretamente pelo modelo da ionosfera e interpolado a partir dos dados dos nós da grade no mesmo raio formado por aeronave e satélite visível, para o solstício de verão (janeiro) de 2002: (a) rede de 15 estações de referência; e (b) rede de 29 estações de referência. 78

Figura 5.14 – Histogramas da diferença entre os retardos calculado diretamente pelo modelo da ionosfera e interpolado a partir dos dados dos nós da grade no mesmo raio formado por aeronave e satélite visível, para o solstício de inverno (julho) de 1996: (a) rede de 15 estações de referência; e (b) rede de 29 estações de referência. 79

Figura 5.15 – Histogramas da diferença entre os retardos calculado diretamente pelo modelo da ionosfera e interpolado a partir dos dados dos nós da grade no mesmo raio formado por aeronave e satélite visível, para o solstício de inverno (julho) de 2002: (a) rede de 15 estações de referência; e (b) rede de 29 estações de referência. 80

Figura 5.16 – Histogramas dos erros horizontais no posicionamento de aeronaves, sem e com a correção fornecida pelo SBAS, para o solstício de verão (janeiro) de 1996: (a) sem correção, (b) com correção, para a rede de 15 estações de referência; (c) com correção, para a rede de 29 estações de referência. 82

Figura 5.17 – Histogramas dos erros horizontais no posicionamento de aeronaves, sem e com a correção fornecida pelo SBAS, para o solstício de verão (janeiro) de 2002: (a) sem correção, (b) com correção, para a rede de 15 estações de referência; (c) com correção, para a rede de 29 estações de referência. 83

Figura 5.18 – Histogramas dos erros horizontais no posicionamento de aeronaves, sem e com a correção fornecida pelo SBAS, para o solstício de inverno (julho) de 1996: (a) sem correção, (b) com correção, para a rede de

15 estações de referência; (c) com correção, para a rede de 29 estações de referência. 84

Figura 5.19 – Histogramas dos erros horizontais no posicionamento de aeronaves, sem e com a correção fornecida pelo SBAS, para o solstício de inverno (julho) de 2002: (a) sem correção, (b) com correção, para a rede de 15 estações de referência; (c) com correção, para a rede de 29 estações de referência. 85

Figura 5.20 – Histogramas dos erros verticais no posicionamento de aeronaves, sem e com a correção fornecida pelo SBAS, para o solstício de verão (janeiro) de 1996: (a) sem correção, (b) com correção, para a rede de 15 estações de referência; (c) com correção, para a rede de 29 estações de referência. 86

Figura 5.21 – Histogramas dos erros verticais no posicionamento de aeronaves, sem e com a correção fornecida pelo SBAS, para o solstício de verão (janeiro) de 2002: (a) sem correção, (b) com correção, para a rede de 15 estações de referência; (c) com correção, para a rede de 29 estações de referência. 87

Figura 5.22 – Histogramas dos erros verticais no posicionamento de aeronaves, sem e com a correção fornecida pelo SBAS, para o solstício de inverno (julho) de 1996: (a) sem correção, (b) com correção, para a rede de 15 estações de referência; (c) com correção, para a rede de 29 estações de referência. 88

Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Constelação GPS, 1º de julho de 1993, 00:00:00 UTC [13]	46
Tabela 5.1 – Distribuição das estações de referência da primeira rede.	59
Tabela 5.2 – Distribuição das estações de referência adicionais.	60
Tabela 5.3 - Localização das aeronaves.	61
Tabela 5.4 – Média mensal dos índices F10.7 e Kp.	63
Tabela 5.5 – Média e desvio padrão dos erros horizontal e vertical sem correção	90
Tabela 5.6 – Média e desvio padrão do erro horizontal com correção	90
Tabela 5.7 – Média e desvio padrão do erro vertical com correção	90

Abreviaturas

AS - Anti – Spoofing

BPSK - Binary Phase Shift Key

C/A - Coarse/ Acquisition

CDMA - Code Division Multiple Access

DOP - Dilution of Precision

DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum

ECEF - Earth-Centered Earth-Fixed Coordinate System

EGNOS - European Geo-stationary Navigation Overlay System

EUV - Extremo Ultra-Violeta

GPS - Global Positioning System

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatístico

MSAS - MTSAT Satellite Augmentation System

NASA - National Aeronautics and Space Administration

P - Precision

PG - Pontos da Grade

PIM - Parameterized Ionospheric Model

PP - Pontos de Penetração

PPA - Pontos de Penetração da Aeronave

PRN - Pseudo Random Noise

RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

SA - Selective Availability

SBAS - Space Based Augmentation System

TEC - Total Electron Content

USERE - user-equivalent range error

UTC - Coordinated Universal Time

WAAS - Wide Area Augmentation System

WGS – 84 - World Geodetic System 1984