



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

PROJETO:

EQUARS

Requisitos Científicos para o Instrumento GROM

DOCUMENTO: EQUARS-0000-ANL-001-A	ESTADO: APROVADO	
DESCRIÇÃO: Este documento apresenta a primeira versão do documento de requisitos científicos para o instrumento GROM. As informações aqui contidas foram estruturadas de forma a suportar a elaboração do plano de gerenciamento da Missão EQUARS para a revisão de fase PRR.		
DATA: 18-09-2019	EDT: 0000-GROM	PÁGINAS: 46



AUTORES			
NOME	DIVISÃO	DATA	ASSINATURA
Fabio Becker Guedes	DIDAE/CGCEA	30/09/19	

REVISORES			
NOME	DIVISÃO	DATA	ASSINATURA
Delano Gobbi	DIDAE/CGCEA	30.09.2019	

APROVADO POR			
NOME	DIVISÃO	DATA	ASSINATURA
Leandro Toss Hoffmann	DIDSS/CGETE	30/9/19	

REVISÕES				
REV.	DATA	MUDANÇAS/ N. PÁG.	AUTOR	APROVADO POR
A	18-09-2019	Versão inicial	F. B. Guedes	L. T. Hoffmann



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
ESCOPO DO DOCUMENTO.....	8
1.1. DOCUMENTOS APLICÁVEIS E DE REFERÊNCIA.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
1.1.1. <i>Documentos Aplicáveis (DA)</i>	Erro! Indicador não definido.
1.1.2. <i>Documentos de Referência (DR)</i>	Erro! Indicador não definido.
1.3. ACRÔNIMOS E DEFINIÇÕES	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
1.3.1. <i>Lista de Acrônimos</i>	Erro! Indicador não definido.
1.3.2. <i>Lista de Definições</i>	Erro! Indicador não definido.
2. A MISSÃO EQUARS	8
2.1. INTRODUÇÃO.....	11
2.2. OBJETIVOS DA MISSÃO EQUARS	11
3. O CONTEXTO DO INSTRUMENTO GROM NA MISSÃO EQUARS	14
3.1. CONTRIBUIÇÕES DO INSTRUMENTO GROM PARA OS OBJETIVOS CIENTÍFICOS DA MISSÃO EQUARS	14
3.2. ELETRODINÂMICA DA IONOSFERA EQUATORIAL	15
3.3. BOLHAS DE PLASMA E “SPREAD F” EQUATORIAL.....	15
3.4. ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL (SAMA) E SEUS EFEITOS NA IONOSFERA EQUATORIAL.....	16
3.5. O INSTRUMENTO GROM E OUTRAS MISSÕES	17
4. REQUISITOS CIENTÍFICOS.....	25
5 REQUISITOS DE PROCESSAMENTO	31
6. REQUISITOS DE INSTRUMENTO	35
6.0. DESCRIÇÃO BÁSICA DO INSTRUMENTO GROM.....	35
7. REQUISITOS DE VALIDAÇÃO	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
8. REFERÊNCIAS.....	45



LISTA DE FIGURAS

1. INTRODUÇÃO	7
ESCOPO DO DOCUMENTO.....	8
1.1. DOCUMENTOS APLICÁVEIS E DE REFERÊNCIA	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
1.1.1. Documentos Aplicáveis (DA).....	Erro! Indicador não definido.
1.1.2. Documentos de Referência (DR).....	Erro! Indicador não definido.
1.3. ACRÔNIMOS E DEFINIÇÕES.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
1.3.1. Lista de Acrônimos.....	Erro! Indicador não definido.
1.3.2. Lista de Definições.....	Erro! Indicador não definido.
2. A MISSÃO EQUARS	8
2.1. INTRODUÇÃO	11
2.2. OBJETIVOS DA MISSÃO EQUARS.....	11
3. O CONTEXTO DO INSTRUMENTO GROM NA MISSÃO EQUARS.....	14
3.1. CONTRIBUIÇÕES DO INSTRUMENTO GROM PARA OS OBJETIVOS CIENTÍFICOS DA MISSÃO EQUARS.....	14
3.2. ELETRODINÂMICA DA IONOSFERA EQUATORIAL.....	15
3.3. BOLHAS DE PLASMA E “SPREAD F” EQUATORIAL	15
3.4. ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL (SAMA) E SEUS EFEITOS NA IONOSFERA EQUATORIAL	16
3.5. O INSTRUMENTO GROM E OUTRAS MISSÕES.....	17
4. REQUISITOS CIENTÍFICOS	25
5 REQUISITOS DE PROCESSAMENTO	31
6. REQUISITOS DE INSTRUMENTO.....	35
6.0. DESCRIÇÃO BÁSICA DO INSTRUMENTO GROM	35
7. REQUISITOS DE VALIDAÇÃO	Erro! Indicador não definido.
8. referências.....	45



LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO	7
ESCOPO DO DOCUMENTO.....	8
1.1. DOCUMENTOS APLICÁVEIS E DE REFERÊNCIA	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
1.1.1. <i>Documentos Aplicáveis (DA)</i>	Erro! Indicador não definido.
1.1.2. <i>Documentos de Referência (DR)</i>	Erro! Indicador não definido.
1.3. ACRÔNIMOS E DEFINIÇÕES.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
1.3.1. <i>Lista de Acrônimos</i>	Erro! Indicador não definido.
1.3.2. <i>Lista de Definições</i>	Erro! Indicador não definido.
2. A MISSÃO EQUARS	8
2.1. INTRODUÇÃO	11
2.2. OBJETIVOS DA MISSÃO EQUARS	11
3. O CONTEXTO DO INSTRUMENTO GROM NA MISSÃO EQUARS.....	14
3.1. CONTRIBUIÇÕES DO INSTRUMENTO GROM PARA OS OBJETIVOS CIENTÍFICOS DA MISSÃO EQUARS.....	14
3.2. ELETRODINÂMICA DA IONOSFERA EQUATORIAL.....	15
3.3. BOLHAS DE PLASMA E “SPREAD F” EQUATORIAL	15
3.4. ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL (SAMA) E SEUS EFEITOS NA IONOSFERA EQUATORIAL	16
3.5. O INSTRUMENTO GROM E OUTRAS MISSÕES	17
4. REQUISITOS CIENTÍFICOS	25
5 REQUISITOS DE PROCESSAMENTO	31
6. REQUISITOS DE INSTRUMENTO.....	35
6.0. DESCRIÇÃO BÁSICA DO INSTRUMENTO GROM	35
7. REQUISITOS DE VALIDAÇÃO	Erro! Indicador não definido.
8. referências.....	45



EM BRANCO



1. INTRODUÇÃO

O instrumento GROM é composto de um receptor de sinais GPS de rádio ocultação, modelo IGOR (JPL-Nasa), 2 antenas de determinação precisa de órbita (POD) e 2 antenas de rádio ocultação (RO) de recepção dos sinais dos satélites da constelação GPS.

A técnica de rádio ocultação por GPS baseia-se nos seguintes princípios: à medida que um sinal viaja pela atmosfera, ele é retardado e difratado. Isso resulta em um deslocamento de fase e um deslocamento Doppler, que pode ser medido com muita precisão pelo receptor a bordo. Uma vez que as posições e velocidades do transmissor e receptor são conhecidas com precisão a partir da determinação precisa da órbita, o ângulo (alfa) de flexão do sinal, como uma função do parâmetro de impacto, pode ser calculado a partir do deslocamento Doppler observado no LEO. A partir dos dados básicos do ângulo de flexão em função dos parâmetros de impacto, podem ser derivados perfis verticais de refatividade como função do raio do ponto de tangente. Análises posteriores podem ser utilizadas para se converter a refatividade obtida em densidade de elétrons na ionosfera.

Em outras palavras, este instrumento realiza, através da análise da refatividade de um sinal de satélite GNSS em ocultação, um sensoriamento indireto da atmosfera terrestre, permitindo-se inferir um vasto conjunto de dados atmosféricos, entre os quais: o mapeamento do TEC (Conteúdo Eletrônico Total); o perfil vertical de densidade eletrônica; o índice S4 de cintilação ionosférica; o perfil vertical da temperatura estratosférica e o perfil vertical da pressão devido ao vapor de água troposférico.

A técnica de rádio-ocultação GNSS apresenta grande potencial de aplicação, a qual vai desde o monitoramento da resposta ionosférica aos eventos associados às tempestades magnéticas solares, até o aperfeiçoamento de modelos prognósticos de mudanças climáticas globais.

Os processos geofísicos de acoplamento entre a baixa e a alta atmosfera, do ponto de vista das medidas que caracterizam o regime da atmosfera neutra (troposfera e estratosfera), bem como o regime do plasma ionosférico, são fenômenos que poderão ser estudados através dos dados obtidos pelo receptor GROM.



Por fim, os dados de rádio-ocultação são úteis para testar modelos ionosféricos. Eles podem ser usados para melhorar modelos de Clima Espacial e também podem beneficiar estudos climáticos devido à sua alta precisão e cobertura sem as limitações dos receptores em solo.

ESCOPO DO DOCUMENTO

O presente documento, Requisitos Científicos para o Instrumento GROM, descreve as atribuições do instrumento GROM em atender aos objetivos da missão de satélite EQUARS.

1.1 DOCUMENTOS APLICÁVEIS E DE REFERÊNCIA

1.1.1 Documentos Aplicáveis (DA)

- [DA-1] [EQUARS-1140-PLN-001-B] Plano de Gerenciamento de Riscos
- [DA-2] [EQUARS-1170-CMP-001-A] Plano de Gerenciamento de Configuração
- [DA-3] [EQUARS-3000-TS-001-A] Mission Assurance Requirements
- [DA-4] [EQUARS-3100-TS-001-A] Product Assurance Requirements – Space Segment

1.1.2 Documentos de Referência (DR)

- [DR-1] [ECSS-E-HB-11-A] Technology readiness level (TRL) guidelines (1 March 2017)

1.2 ACRÔNIMOS E DEFINIÇÕES

1.2.1 Lista de Acrônimos

- AR - Revisão de Aceitação para Voo (AcceptanceReview)
- AT-E - Atualização do modelo de engenharia do instrumento IGOR que compõe o GROM.
- AT-V - Atualização do modelo de voo do instrumento IGOR que compõe o GROM.
- BRE – Broad Reach Engineering, fabricante do IGOR/GROM
- CDAAC - Cosmic Data Analysis and Archive Center
- CDR – Critical Design Review
- CGCEA – Coordenação Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas do INPE
- COSMIC – Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate



DA – Documentos Aplicáveis

DIDAE – Divisão de Aeronomia da CGCEA/INPE

DIE – Erro induzidos pelo projeto (Design-InducedError)

DR - Revisão de Documentação (DocumentationReview)

EM – Modelo de Engenharia (EngineeringModel)

EMBRACE – Programa de Estudo e Monitoramento Brasileiro doIGOR Clima Espacial - INPE

EMC – Compatibilidade Eletromagnética (ElectromagneticCompatibility)

EMI – Interferência Eletromagnética (ElectromagneticInterference)

EQUARS – Equatorial AtmosphereResearchSatellite

ESD –Descarga Eletrostática (ElectrostacicDischarge)

FM – Modelo de Voo (FlightModel)

FMEA - Modos de falhas e análise de efeitos (FailureMode&EffectsAnalysis)

GNSS – Sistema de Navegação Global por Satélite (Global NavigationSatellite System)

GPS – Sistema de Posicionamento Global (Global Positioning System)

GROM – GPS de Monitoramento por Rádio Ocultação (GPS RadioOccultationMonitoring)

ID – Identificador

IGOR – Receptor GPS e de Ocultação Integrado (Integrated GPS andOccultationReceiver)

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

ITAR – Regulamentação da movimentação de tecnologias militares (InternationalTraffic in ArmsRegulations)

JPL – Jet PropulsionLaboratory

LIT – Laboratório de Integração e Testes - INPE

NA – Não disponível (NotAvailable)

NASA – National Aeronautics and Space Administration

PCI – Programa de Capacitação Institucional

PDR - Revisão de Projeto Preliminar (Preliminary Design Review)

POD – Determinação de Órbita Precisa (Precise OrbitDetermination)

PRR – Revisão de Requisitos Preliminares (PreliminaryRequirementsReview)

PWB – Placa de conexão impressa (PrintedWiringBoard)

QR – Revisão de Qualificação (QualificationReview)

RF – Rádio Frequência

RO – Rádio Ocultação



TEC – Conteúdo Eletrônico Total (Total ElectronContent)



2. A MISSÃO EQUARS

2.1. INTRODUÇÃO

A missão do microssatélite científico EQUARS (*Equatorial Atmosphere Research Satellite*) visa promover o avanço do conhecimento científico em Aeronomia Equatorial, com ênfase no entendimento da natureza e da evolução dos fenômenos físicos que perturbam o comportamento do plasma ionosférico, especialmente no setor da América do Sul. Tais perturbações originam irregularidades ionosféricas que podem afetar a precisão e a disponibilidade dos sistemas de comunicação modernos e de navegação global por satélite (GNSS), imprescindíveis em uma vasta gama de aplicações.

No contexto das alterações das condições do ambiente da alta atmosfera terrestre, o conjunto dos instrumentos científicos embarcados proporciona o monitoramento de parâmetros ionosféricos para aplicações em diagnósticos de Clima Espacial regional, estabelecendo uma relação profícua com os objetivos do programa EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro de Clima Espacial) do INPE.

2.2. OBJETIVOS DA MISSÃO EQUARS

A atmosfera equatorial tem um efeito significativo sobre o balanço energético do planeta. Intensos sistemas convectivos e distúrbios climáticos da baixa atmosfera transportam energia e momentum na forma de ondas ascendentes, alterando o regime de circulação global dos ventos da média e da alta atmosfera. Na ionosfera, parte deste espectro pode gerar campos elétricos (mecanismo do dínamo) que, subsequentemente, redistribui o plasma, alterando os gradientes de TEC (Conteúdo Eletrônico Total), manifestando-se, muitas vezes, como irregularidades no padrão da ionização ionosférica da camada F, e que podem ser responsáveis por degradar os sinais de comunicação e navegação de satélites.

Possivelmente, certos modos de ondas atmosféricas, excitadas em altitudes da baixa atmosfera, e que alcançam a base da camada-F, atuam como gatilho às irregularidades na densidade de plasma, podendo evoluir, de acordo com as condições da velocidade de deriva vertical deste plasma, para depleções de plasma de larga escala, denominadas bolhas ionosféricas, um processo eletrodinâmico característico da região ionosférica equatorial. Por inter-



médio da informação das condições eletrodinâmicas da ionosfera, bem como do espectro das ondas atmosféricas associadas às perturbações do plasma local, pode-se estudar a variabilidade da ocorrência e da amplitude do fenômeno das bolhas ionosféricas.

Do ponto de vista da influência das variações associadas aos campos elétricos da magnetosfera, o comportamento do plasma equatorial, particularmente sobre o setor brasileiro, exhibe variações longitudinais significativas, geralmente diagnosticadas como intensificações de ionização na camada-E ionosférica. Neste sentido, estudos científicos desta natureza (e.g. Abdu, *et al.* 2005) sugerem que a entrada de partículas energéticas (elétrons energéticos de até 30 keV) na região da Anomalia Magnética da América do Sul (SAMA) pode ser uma fonte importante destas modificações. Medindo-se o fluxo destes elétrons que se precipitam na região da SAMA, é possível quantificar a condutividade ionosférica intensificada da camada-E, um parâmetro chave para o entendimento dos processos eletrodinâmicos que atuam na ionosfera equatorial.

Em suma, os processos de acoplamento energéticos entre a baixa e a alta atmosfera e a influência da SAMA sobre os processos da eletrodinâmica equatorial são os direcionadores principais da missão EQUARS, e os principais objetivos científicos a serem investigados são:

- (a) encontrar evidências diretas da conexão entre as atividades dinâmicas da baixa atmosfera e a modificação das densidades de plasma ionosférico, concernente à geração e evolução das bolhas de plasma (irregularidades ionosféricas);
- (b) identificar as fontes de excitação, a propagação e as características paramétricas dos modos de ondas atmosféricas;
- (c) determinar a influência da precipitação de partículas na região da SAMA nos processos da eletrodinâmica ionosférica equatorial.

Com o objetivo de investigar tais processos, o sistema espacial que caracteriza a missão EQUARS é constituído por uma plataforma de microsatélite e uma carga útil científica de 5 (cinco) instrumentos:



As ondas atmosféricas na base da camada-E ionosférica (região da mesosfera superior) e os eventos de bolhas ionosféricas, do ponto de vista óptico, são verificados pelo fotômetro de airglow (GLOW).

Os processos de acoplamento entre a baixa e a alta atmosfera, do ponto de vista da atmosfera neutra (troposfera e estratosfera), bem como do plasma ionosférico, são verificados pelo receptor GROM que emprega a técnica de radio-ocultação GNSS.

As características espaciais e temporais das depleções em densidade eletrônica (bolhas de plasma ionosféricas) são verificadas pelo conjunto de sondas eletrostáticas IONEX.

A intensificação da ionização na camada E ionosférica devido à precipitação de elétrons, especialmente na região da SAMA será investigada pela medida in situ do espectro de energias dos elétrons feita pelo analisador eletrostático ELISA.

Os efeitos do acoplamento magnetosfera-ionosfera são verificados pelo sensor de partículas de altas energias APEX e pelo analisador eletrostático de energias ELISA.

Os dados recebidos por intermédio da rede de instrumentos terrena, armazenados e distribuídos pelo EMBRACE, bem como os modelos de previsão em Clima Espacial, apoiarão esta missão satelital na geração dos produtos de ciência e de aplicação. Além disso, considera-se viabilizar a cooperação com missões de satélite internacionais, que têm sinergia e complementariedade com a missão EQUARS, tais como as futuras missões SPORT (Scintillation Prediction Observation Research Task) e ICON (Ionospheric Connection Explorer).



3. O CONTEXTO DO INSTRUMENTO GROM NA MISSÃO EQUARS

3.1. CONTRIBUIÇÕES DO INSTRUMENTO GROM PARA OS OBJETIVOS CIENTÍFICOS DA MISSÃO EQUARS

O instrumento GROM permite que se obtenha o conteúdo eletrônico total (TEC) da ionosfera permitindo que se acompanhe a variação da densidade do plasma, processo intrinsecamente ligado às variações diárias e sazonais, mas também aos fenômenos de resposta da atmosfera terrestre às perturbações de origem solar que geram tempestades geomagnéticas, assim como as variações de densidade e o deslocamento da Anomalia de Ionização Equatorial (EIA) e da Anomalia Magnética da América do Sul. Uma das grandes vantagens de se obter o TEC por rádio ocultação a bordo de um satélite ao invés de se utilizar instrumentos em solo é que se torna possível se estudar regiões da ionosfera com pouca ou nenhuma presença de receptores como na região amazônica ou sobre o oceano, contribuindo para se identificar como os processos dinâmicos na ionosfera ocorrem antes de perturbar regiões de interesse.

As aplicações das medidas de RO em previsão meteorológica (informação do conteúdo de vapor d'água) também têm sido profícuas. Uma nova vertente de pesquisa em assimilação de dados de RO, com o objetivo de incorporá-los aos modelos numéricos de circulação global e regional, tem demonstrado ser promissora para estudos climáticos de longo prazo.

Portanto, o instrumento GROM contribuirá para a missão em seus objetivos de encontrar evidências diretas da importância da conexão entre as atividades dinâmicas da baixa atmosfera e a modificação das densidades de plasma ionosférico, concernente à geração e evolução das bolhas de plasma (irregularidades ionosféricas) através de suas medidas de TEC (a partir de 60 km de altitude); assim como poderá auxiliar no estudo da atmosfera neutra conjuntamente com instrumentos em solo, através da obtenção do vapor d'água (entre 1 e 9 km de altitude) e do perfil de temperatura (entre 5 a 50 km).



3.2. ELETRODINÂMICA DA IONOSFERA EQUATORIAL

A eletrodinâmica da ionosfera na região equatorial é fortemente controlada por campos elétricos provenientes, internamente, da ação de dínamo dos ventos e ondas atmosféricas, e externamente, da interação do vento solar com a magnetosfera.

Campos elétricos de dínamo têm origem em uma fina camada (comparada às escalas magnetosféricas) de aproximadamente 85km a 200km de altitude chamada de região de dínamo, onde as colisões entre cargas elétricas e as partículas neutras da atmosfera são tais (elétrons são não colisionais enquanto os íons são colisionais) que podem resultar em movimento perpendicular ao campo geomagnético B , resultando em campo elétrico $E = v \times B$.

Por outro lado, campos elétricos podem se originar na interação vento solar – magnetosfera. A passagem do vento solar pela magnetosfera pode gerar um campo elétrico de convecção que penetra na ionosfera em altas latitudes pela reconexão magnética (“Prompt Penetration Electric Fields ou PPEF). A ionosfera em baixas latitudes é blindada pela plasmasfera. Entretanto, como esta blindagem leva um certo tempo para acontecer, esse campo elétrico de convecção pode penetrar na região equatorial) no início de tempestades magnéticas, quando ele é sub-blindado (“under-shielded”) e mais tarde, durante a fase de recuperação, o campo elétrico induzido pelo processo de blindagem supera o campo de penetração resultando em um campo na direção oposta (“over-shielded”). As tempestades magnéticas podem também gerar campos elétricos de dínamo perturbado (“Disturbance Dynamo Electric Fields ou DDEF) que resultam de distúrbios termosféricos causados por aquecimento devido à aurora, que alcançam as regiões equatoriais 4 a 5 horas após a PPEF.

3.3. BOLHAS DE PLASMA E “SPREAD F” EQUATORIAL

Dentre os diversos processos eletrodinâmicos na ionosfera equatorial, a missão EQUARS é particularmente interessada no desenvolvimento do “spread F” equatorial e das bolhas de plasma, que são regiões de baixa densidade de plasma que se formam na borda inferior da camada F da ionosfera e derivam verticalmente para cima. Elas são causadas por uma combinação de força gravitacional, campos elétricos e ventos neutros induzindo a instabilidade de Raleigh-Taylor. As condições favoráveis para a ocorrência dessa instabilidade ocorrem no



terminador solar (pôr do sol), quando uma intensificação do vento zonal combinado com o gradiente longitudinal (dia/noite) de condutividade e o acoplamento entre as camadas E e F através das linhas de campo geomagnético, produzem uma intensificação do campo elétrico na direção leste (pico pré reversão ou “pre-reversal enhancement zonal electric field” - PRE), causando uma deriva vertical EXB para cima da camada F. A subida da camada F aumenta o gradiente da densidade da borda inferior desta camada, favorecendo o aparecimento da instabilidade e a formação das bolhas de plasma ascendentes que evoluem para um espectro amplo de irregularidades com escalas espaciais menores, que constituem o “spread F” equatorial.

3.4. ANOMALIA MAGNÉTICA DO ATLÂNTICO SUL (SAMA) E SEUS EFEITOS NA IONOSFERA EQUATORIAL

Os efeitos da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (SAMA) sobre o desenvolvimento das bolhas de plasma se devem basicamente a dois fatos: 1) a declinação do campo geomagnético, que é uma característica regular durante períodos não perturbados, e 2) a intensificação da ionização devido à precipitação de partículas e conseqüentemente a intensificação da condutividade na região da SAMA que acontece em períodos não perturbados e é ainda maior durante tempestades magnéticas.

A declinação magnética afeta a variação mensal da ocorrência de “spread F” porque a PRE depende do gradiente de condutividade longitudinal integrada na linha de campo, que ocorre durante o terminador solar, que tem uma contribuição maior das camadas E conjugadas e portanto é maior quando o terminador solar se move paralelamente ao meridiano magnético. A grande declinação do campo geomagnético na região brasileira (~21° para oeste) resulta em um máximo de ocorrência em dezembro, ao passo que na região peruana, onde a declinação é muito pequena, o máximo acontece durante os equinócios.



3.5. O INSTRUMENTO GROM E OUTRAS MISSÕES

Histórico do instrumento IGOR

Sinais de satélites do sistema de posicionamento global (GPS) agora estão sendo usados para mais do que apenas informações de localização e navegação. Ao observar as ondas de rádio dos satélites GPS, uma tecnologia desenvolvida no Jet Propulsion Laboratory (JPL) da NASA não apenas calcula precisamente sua posição, mas também pode usar uma técnica conhecida como ocultação de rádio para ajudar os cientistas a estudar a atmosfera e o campo gravitacional da Terra. previsões meteorológicas, monitorar as mudanças climáticas e melhorar a pesquisa sobre clima espacial.

A Corporação Universitária para Pesquisa Atmosférica (UCAR), um grupo de universidades sem fins lucrativos em Boulder, Colorado, compara a ocultação de rádio com a aparência de um lápis quando visto através de um copo de água. As moléculas de água mudam o caminho das ondas de luz visível, de modo que o lápis aparece dobrado, assim como as moléculas no ar entortam os sinais de rádio do GPS quando passam (ou são ocultadas) pela atmosfera. Através de medições da quantidade de flexão nos sinais, os cientistas podem construir imagens detalhadas da ionosfera (a parte superior energética da atmosfera) e também coletar informações sobre a densidade atmosférica, pressão, temperatura e umidade. Uma vez coletados, esses dados podem ser inseridos em modelos de previsão do tempo e clima para previsão do clima e estudos climáticos. Tradicionalmente, essa informação é obtida através do uso de balões meteorológicos.

Em 1998, O Jet Propulsion Laboratory (JPL) da NASA começou a desenvolver uma nova classe de receptores de ciência espacial GPS, chamada Black Jack, que poderia fazer medições precisas de como os sinais de GPS são distorcidos ou atrasados ao longo do caminho até o receptor. Em 2006, a primeira demonstração de uma constelação de ocultação de rádio GPS foi lançada através de uma colaboração entre o National Science Council e National Space Organization de Taiwan, a National Science Foundation, NASA, a Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA) e outras entidades federais. Chamado de Constellation Observing System para Meteorologia, Ionosfera e Clima (COSMIC), o JPL foi responsável por



projetar o principal instrumento da COSMIC - baseado em seu revolucionário receptor Black Jack. Para produzir os receptores de ocultação de rádio Black Jack GPS necessários para a COSMIC, a JPL mudou para a Broad Reach Engineering Company (BRE), de Tempe, Arizona. O BRE fez melhorias na tecnologia existente do JPL, incluindo a adição de um recurso de redundância interna e memória interna de massa. A BRE construiu os novos receptores e, ao entregar o hardware de voo para o programa COSMIC, firmou um contrato de licença para a tecnologia que se estende até 2017.

Como resultado do contrato de licença, a BRE comercializou um novo produto chamado IGOR (Integrated GPS Occultation Receiver), baseado no dispositivo Black Jack da NASA. Após a transferência da tecnologia comercial para o BRE, aumentou-se a confiabilidade das peças e a capacidade de modificar os algoritmos de processamento de sinal digital em órbita.

Características do instrumento

Como um receptor de frequência dupla (frequências L1 e L2), o IGOR foi disponibilizado em duas versões para baixa órbita terrestre: como um receptor para determinação de órbita de precisão (POD) simplesmente, ou como um receptor para POD e rádio-ocultação, como é o caso do GROM. Portanto, o GROM fornece determinação de órbita e a capacidade de se fazer medidas de rádio-ocultação que resultam em dados científicos de temperatura, pressão, vapor de água e conteúdo de elétrons na atmosfera.

O IGOR rastreia ambas as frequências portadoras do GPS (L1, L2) para separar o atraso ionosférico dependente da frequência (dispersivo) do atraso refrativo não-dispersivo da atmosfera neutra. Uma técnica patenteada "semi-codeless" é usada para obter medições precisas do sinal L2, tanto fase de portadora quanto da pseudodistância, com o anti-spoofing ativado. Além dessas medições, o instrumento GPS pode gravar amplitudes de sinal GPS para monitoramento de cintilação ionosférica em órbita e correção de efeitos de difração de sinal no pós-processamento. IGOR também é conhecido como GOX (GPS Occultation Experiment).

O instrumento também possui um gravador de estado sólido que permite a gravação de dados extras no caso de haver problemas com o downlink nas estações terrestres, e um con-



trolador de payloads que pode controlar instrumentos adicionais no satélite. É importante notar que as mudanças realizadas no acondicionamento e hardware feitos pela BRE para o IGOR não alteraram os algoritmos de aquisição e rastreamento de sinal originalmente desenvolvidos no JPL que chamaram a atenção para os receptores Black Jack pela sua eficiência em medidas precisas do sinal GPS.

O receptor IGOR possui recursos de rádio definido por software (SDR) que permitem a reprogramação de algumas funções de processamento de sinal (o projeto inclui um FPGA - Field-Programmable Gate Array), ou seja, se necessário é possível fazer a reprogramação remota do IGOR quando este já estiver em órbita. Depois de estabelecidas, essas modificações do receptor podem ser ligadas ou desligadas do solo.

No GROM existem quatro antenas estilo "microstrip" que recebem frequências L1 e L2. Duas das antenas são de alto ganho dirigidas para frente e para trás em direção ao limbo da Terra para RO. As outras duas antenas fornecem um amplo campo de visão para determinação de órbita precisa e ciência ionosférica.

O IGOR é programado para rastrear simultaneamente até 16 satélites GPS, enquanto processa a magnitude de amplitude e fase dos sinais L1CA ("Carrier Amplitude" ou amplitude do sinal em L1), L1P ("Phase" ou fase em L1) e L2P ("Phase" ou fase em L2). Cada loop de rastreamento L1P e L2P é guiado primeiramente pelo loop de rastreamento L1CA, permitindo larguras de banda mais estreitas nesses sinais com baixa SNR (relação sinal ruído).

Outras missões que utilizam o IGOR

Projetado para atender a todos os requisitos de experimentos científicos de ocultação, o IGOR foi ou está sendo usado pela NASA, bem como por organizações alemãs, coreanas e brasileiras. Vários receptores IGOR foram colocados em órbita: seis unidades de voo para o COSMIC, uma unidade de voo para o alemão TerraSAR-X, uma unidade de voo para o alemão Tandem-X, uma unidade de voo para o TACSAT do Laboratório de Pesquisa da Força Aérea dos EUA, uma unidade para o coreano KOMPSAT-5, outra para o espanhol PAZ, além do instrumento que irá ao espaço no satélite EQUARS, chamado de GROM.

Tabela I: Dados de ocultações ionosféricas do COSMIC (IGOR), CHAMP (BlackJack), e GRACE (BlackJack) comparadas às de ocultações atmosféricas de outras missões

MISSION	Total Atm Occs	Total Ion Occs
CHAMP	468029	306318
CNOFS	152610	0
COSMIC	6940301	4638082
GPSMET	5002	0
GPSMETAS	4577	0
GRACE	565148	260561
KOMPSAT5	504260	0
METOPA	2524153	0
METOPB	1351193	0
SACC	353944	0
TSX	807625	0
Total	13676842	5204961

A missão COSMIC

O COSMIC consiste em seis microsatélites idênticos projetados pela Orbital Sciences Corporation, integrados, testados e operados pela Organização Espacial Nacional de Taiwan (NSPO), com os produtos de dados científicos gerados pela UCAR (University Corporation for Atmospheric Research). Além de um receptor RO, cada satélite carrega dois instrumentos meteorológicos de espaço secundário: um Fotômetro Ionosférico Minúsculo (TIP) e um Tri-Band-Beacon (TBB), que aumentam sinergicamente a precisão e a utilidade das observações ionosféricas COSMIC. A alta precisão das medidas de RO do COSMIC foi verificada por comparações de ocultações estreitamente colocadas que estavam disponíveis imediatamente após o lançamento dos satélites [Schreiner et al., 2007]. O COSMIC demonstrou a utilidade do RO para aplicações de previsão numérica do tempo (meteorologia), estudos climáticos e



monitoramento de clima espacial (através de uma constelação). Em termos de produtos de dados sobre o espaço, em outubro de 2014, o COSMIC forneceu 4 milhões de PDE (perfis de densidade eletrônica) ionosféricos, arcos de TEC e perfis de índice S4, assim como mais de 17800 h de radiâncias noturnas de TIP com controle de qualidade. Dentro de sua duração nominal de missão de 2 anos, o COSMIC forneceu 2000-2500 ocultações por dia. Embora os satélites COSMIC tenham sofrido degradação desde o lançamento, eles continuam a produzir de 1000 a 1500 ocultações por dia.

Comparação entre as capacidades de RO das missões COSMIC (IGOR) e COSMIC-2 (TGRS)

Os Estados Unidos e Taiwan estão colocando em órbita a missão de RO (FORMOSAT-7 / COSMIC-2) que lançará seis satélites em órbitas de baixa inclinação planejado para o início de 2016 e alterado posteriormente para 2019, além de outros seis satélites em alta inclinação órbita para 3 anos depois. Agências dos Estados Unidos, lideradas pela Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA) estão em parceria com a NSPO de Taiwan para executar o programa COSMIC-2 [Cook et al., 2014]. A carga útil do GNSS RO COSMIC-2, denominada Sistema de Rádio-Percussão TriG GNSS (TGRS), foi desenvolvida pelo Laboratório de Propulsão a Jato da NASA (National Aeronautics and Space Administration - NASA) sob financiamento da USAF e será capaz de medir mais de 12.000 perfis ionosféricos por dia após todos os 12 satélites estarem totalmente implantados [Meehan et al., 2012]. A USAF também está fornecendo duas cargas de clima espacial que voarão em cada um dos primeiros seis satélites: um transmissor RF Beacon de frequência ultra alta / banda L / banda S e o instrumento IM Velocity Meter (IVM) para medir a densidade de íons e o deslocamento de plasma em três dimensões in situ [Straus e Betz, 2014]. A missão COSMIC-2 proporcionará um aumento revolucionário no número de observações atmosféricas e ionosféricas que beneficiarão grandemente as comunidades de pesquisa e operacionais [Fong et al., 2012]. As observações de tração de plasma IVM, das quais campos elétricos podem ser derivados, será de particular importância para a comunidade de pesquisa ionosférica, uma vez que uma quantidade significativa da variação ionosférica está diretamente ligada à variabilidade do campo elétrico. Os primeiros seis satélites COSMIC-2 fornecerão especificações de campo elétrico espacial / temporal sem precedentes em baixas latitudes. Os dados do COSMIC-2

serão processados e distribuídos gratuitamente para as comunidades de pesquisa e operação pelo Centro de Arquivo e Análise de dados da UCAR COSMIC (CDAAC) e o INPE manterá um espelho no seu programa de Clima Espacial EMBRACE.

O TGRS do COSMIC-2 emprega quatro antenas - duas antenas RO e duas antenas POD (Precision Orbit Detection), com uma de cada tipo voltada para as direções "ram" e "antiram". A maior antena de RO é usada exclusivamente para medições troposféricas e fornece sinais que suportam o direcionamento (steering) do feixe digital a bordo para aumentar a quantidade de medição na baixa atmosfera. As medições ionosféricas são feitas pelas duas antenas POD, que são inclinadas ligeiramente para cima em relação à direção da velocidade. O sensor IVM está montado na superfície da haste da espaçonave e a antena RF Beacon está com apontamento para o nadir. O COSMIC-2 observará uma variedade de parâmetros ionosféricos, cobrindo tanto fenômenos ionosféricos de pequena escala quanto de grande escala. Em comparação com o COSMIC, a missão COSMIC-2 fornecerá maior quantidade e qualidade de dados de clima espacial. A figura abaixo mostra a comparação entre as duas missões em termos de configuração de constelação, cobertura de dados de RO e parâmetros-chave. Lee et al. [2013] e Yue et al. [2014] realizaram a observação de experimentos de simulação de sistema baseados na órbita das constelações do COSMIC-2 e os resultados mostram que as medidas de RO ionosféricas do COSMIC-2 aumentarão significativamente a capacidade de "nowcast" e "forecast" de média e grande escalas ionosféricas.

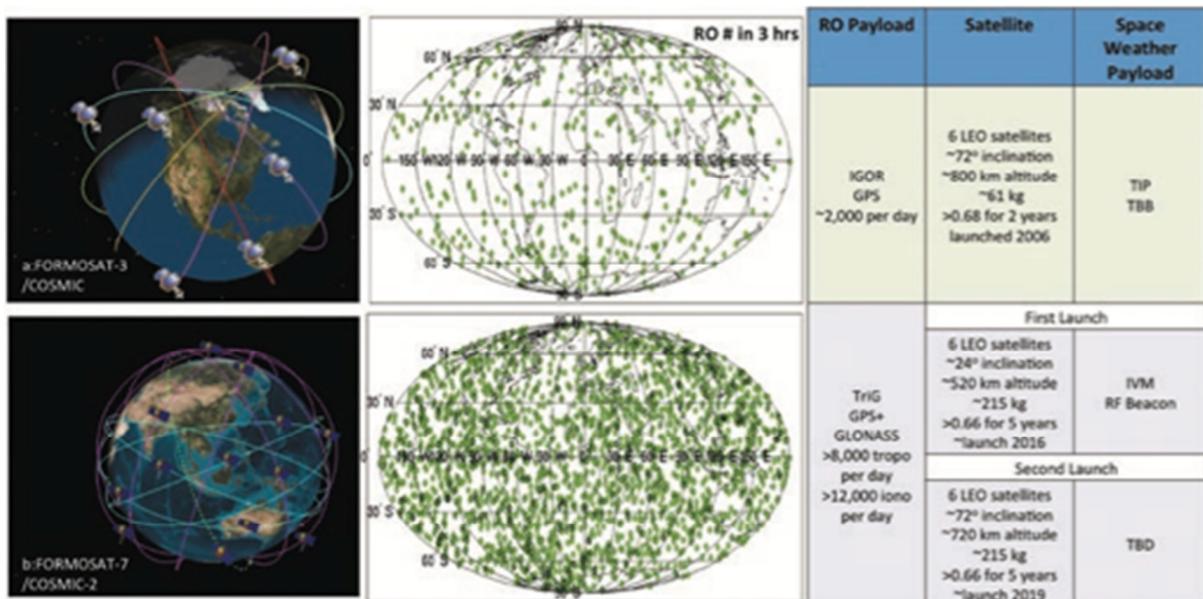




Tabela II: Alguns dados de missões que contém instrumentos de rádio-ocultação (em vermelho são missões que ainda não foram lançadas ou foram lançadas recentemente - as datas são da previsão inicial para o lançamento)

Mission	Launch Time	Mission Life	RO Profiles per Day	Note
GPS/MET	1995/4	2	125	Proof of Concept
CHAMP	2000/11	5	250	Improved receiver, tracking
SAC-C	2000/11	3	300	Improved receiver, open loop tracking test
GRACE	2002/5	5	500	RO data publicly not available
FORMOSAT-3/COSMIC	2006/4	5	2000	World Only Near-real-time Operational Constellation
MetOp-A	2006/10	5	500	Near-real-time operations
TerraSAR-X	2007/6	5	400	IGOR RX & Antennas
OceanSat-2	2009/9	5	500	ROSA RX
TanDEM-X	2010/6	5	400	FORMOSAT-3 RX
KOMPSAT-5	2010	5	300	IGOR+ RX & Antennas
EQUARS	2012 On-hold	3	400	IGOR RX & CHAMP Antennas
MetOp-B	2012	5	600	GRAS RX & Real-time operations
PAZ	2012	5	500	IGOR+ RX
Megha-Tropiques	TBD	5	500	ROSA RX
SAC-D	TBD	5	500	ROSA RX
CICERO	TBD	5	>10,000	Pyxis/TriG RX and Real-Time Ops for GPS-RO & GPS-SR
FORMOSAT-7/COSMIC-2	2014 2016	5	>8,000	Real-Time Ops with TriG RX

A missão COSMIC-2 e sua relação com o Brasil

Existe uma tentativa de se organizar o conjunto de dados global de rádio-ocultação por várias agências internacionais, um exemplo notável é a distribuição dos dados fornecidos pelos satélites da constelação COSMIC através do portal do CDAAC (COSMIC Data Analysis and ArchiveCenter).

O programa de Clima Espacial, EMBRACE, dentro de uma cooperação entre a UCAR ("University Corporation for Atmospheric Research") e o MCTIC, irá atuar cooperativamente no recebimento de dados ("downlink") e em seu processamento em território brasileiro para a constelação COSMIC 2. Os dados de RO do EQUARS serão uma importante contribuição do satélite brasileiro para a caracterização da ionosfera e na obtenção de mais informações troposféricas sobre a região equatorial. Dessa forma o Brasil passa a ter um papel também



na geração de dados de RO além de no seu armazenamento e processamento. Diversos estudos poderão ser realizados utilizando-se dados de RO do EQUARS e o COSMIC-2 de forma comparativa ou complementar.



4. REQUISITOS CIENTÍFICOS

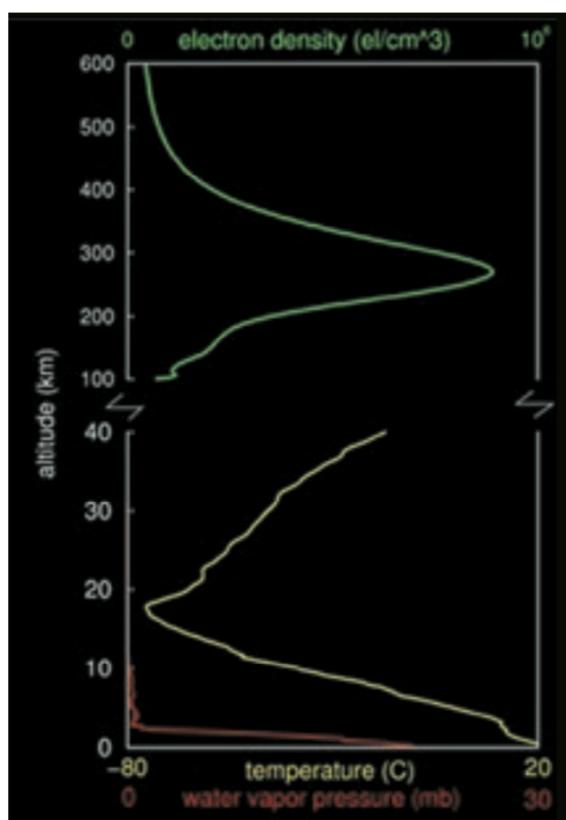
Os principais objetivos do COSMIC são usar o GPS RO para traçar o perfil da atmosfera neutra da superfície para ~50 km e a ionosfera. Atualmente, as observações da ionosfera UCAR CDAAC incluem a linha de visada integrada do conteúdo eletrônico total de elétrons absoluto (TEC) e os perfis verticais de densidade eletrônica que são obtidos usando a inversão de Abel [Yue et al., 2014]. A maioria dos estudos científicos é baseada nos perfis verticais de densidade eletrônica. No processamento da UCAR(CDAAC), os perfis de densidade eletrônica são derivados com base nas observações da fase das portadoras L1 e L2 e na aplicação da inversão de Abel. A inversão de Abel assume uma ionosfera esfericamente simétrica, e isso pode levar a erros grandes e sistemáticos na densidade eletrônica recuperada abaixo do pico da região F mas existem métodos que visam diminuir estes erros.

Características da observação da atmosfera por rádio-ocultação e resultados científicos esperados

Durante uma ocultação do GPS, um receptor GPS no LEO 'vê' o satélite GPS surgindo ou desaparecendo atrás do limbo da Terra, enquanto o sinal corta a atmosfera. O receptor GPS no LEO observa a mudança do atraso do sinal entre o GPS e o LEO que é relacionado à desaceleração e refração do caminho do sinal. A mudança do atraso permite a reconstrução do ângulo de flexão α_e , em seguida, o perfil de refratividade vertical no ponto tangente ao raio. A refratividade permite a reconstrução da pressão, temperatura e umidade na atmosfera neutra e densidade eletrônica na ionosfera.

Todos os satélites GNSS transmitem sinais em duas frequências de banda L diferentes para fornecer um meio de fazer correções ionosféricas para soluções de navegação. Na geometria RO, nas altitudes tangenciais ionosféricas, o conteúdo total de elétrons (TEC) ao longo do caminho do sinal GNSS pode ser calculado a partir de medições de fase dessas duas frequências. Após considerar os erros e serem feitas as devidas calibrações o TEC ionosférico absoluto pode geralmente ser determinado com precisão de duas a três unidades de TEC (TECU, 1 TECU = 10^{16} el / m²). Os usuários de clima espacial estão frequentemente interessados no

perfil de densidade eletrônica com a altitude (PDE), que é derivado através de uma inversão de Abel sob a hipótese de simetria esférica da densidade ionosférica ao redor do ponto tangente do raio do sinal [Yue et al., 2013]. Embora essa suposição nem sempre seja satisfeita na ionosfera, as medidas de RO geralmente fornecem o pico de densidade iônica da camada ionosférica F com 15% de precisão e a altitude do pico em até 20 km. Alternativamente, as observações do RO TEC podem ser ingeridas diretamente em modelos assimilativos juntamente com outras medições ionosféricas baseadas no solo e no espaço para obter especificações de maior precisão [Komjathy et al., 2010; Yue et al., 2012].



A figura acima apresenta exemplos de perfis (densidade eletrônica, temperatura e pressão de vapor d'água) que podem ser recuperados da ionosfera e atmosfera por RO.

Os sinais da banda L de RO também são sensíveis às irregularidades na densidade ionosférica ao longo do caminho entre o satélite GPS e o LEO. Ao analisar a relação sinal-ruído (SNR) do sinal RO recebido, parâmetros como o índice S4, que caracteriza a cintilação devido a irregu-



laridades da região F, podem ser derivados. As flutuações SNR também revelam a presença de camadas E esporádicas. Yue et al. [2013] resumiram a maioria dos aspectos do processamento de dados de clima espacial de RO, incluindo algoritmos, suposições e características de erro.

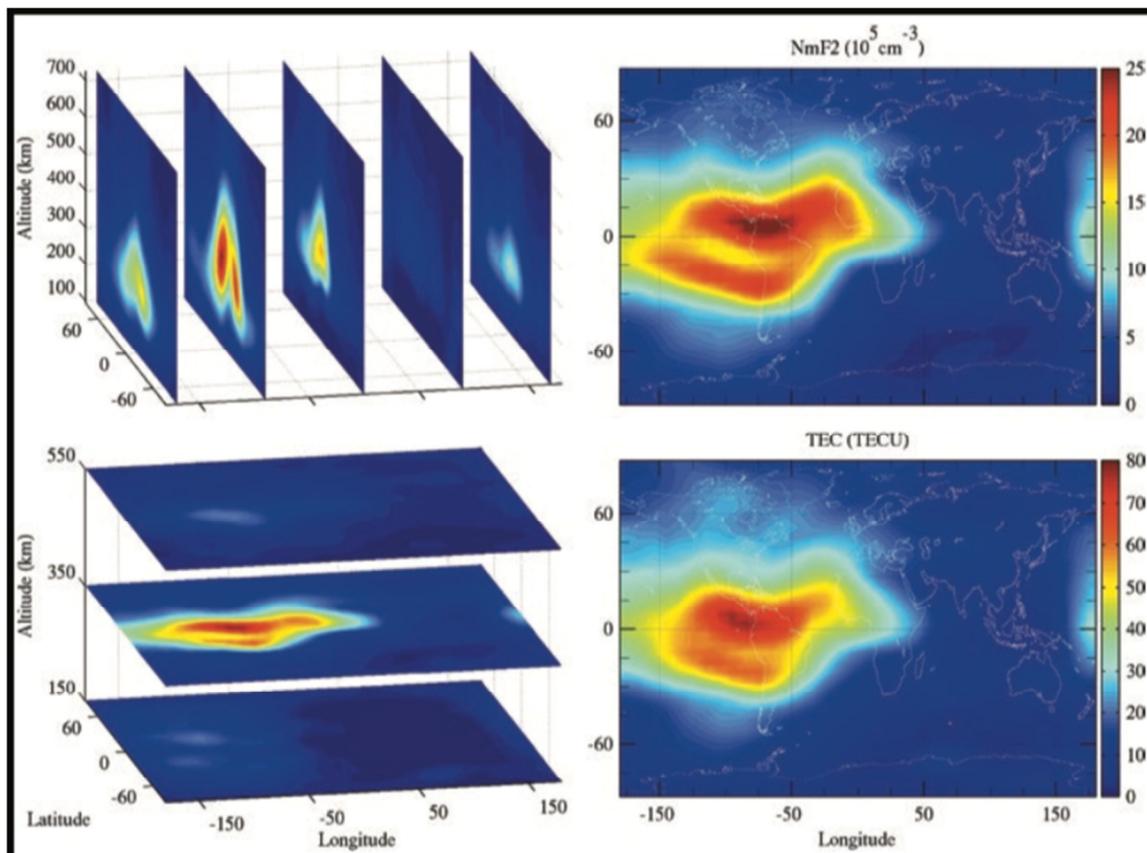
Em comparação com outras técnicas de monitoramento ionosférico, o GNSS RO tem as seguintes vantagens:

- (1) a geometria da varredura obtida por rádio-ocultação é complementar a instrumentos de solo ou instrumentos no espaço com vistas para o nadir,
- (2) alta precisão e exatidão,
- (3) alta resolução vertical e
- (4) total cobertura global.

Os dados de RO podem ser amplamente utilizados para monitorar:

- (1) a variabilidade ionosférica (por exemplo, ciclo solar, sazonal, longitude e altitude),
- (2) clima ionosférico (por exemplo, resposta a tempestades geomagnéticas, resposta a explosões solares e menores perturbações de condução atmosférica) e
- (3) irregularidades ionosféricas (por exemplo, camada E esporádica e cintilação).

Além disso, a cobertura global e a alta resolução vertical fez das observações ionosféricas uma importante fonte de dados para os modelos de assimilação de dados ionosféricos [Scherliess et al., 2009; Komjathy et al., 2010], aprimorando a previsão do tempo e previsões do clima espacial, bem como possibilitando a construção de reanálises da densidade eletrônica de ionosfera quadridimensionais (espaço e tempo) [Yue et al., 2012]. Veja figura abaixo extraída dessa referência.



A Figura acima fornece um exemplo de densidade de elétrons global 3-D mensalmente reanalisada e a densidade de pico correspondente (NmF2) e o mapa TEC vertical às 19:00 UT durante setembro de 2006 para dados obtidos pelo COSMIC. Dados do EQUARS e do COSMIC-2 permitirão a utilização de novos dados em modelos para a criação de mapas como esses com um maior número de dados para a região equatorial e de baixas latitudes, melhorando a resolução e confiabilidade dos mesmos na região da Anomalia Equatorial de Ionização e da Anomalia Magnética da América do Sul. Esses esforços podem auxiliar muito a melhoria dos resultados dos modelos ionosféricos globais sob a região brasileira.



Equação da refração

Temos o índice de refração do sinal de RO considerando-se o índice de refração atmosférica

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{P_w}{T^2} - 40.3 \times 10^6 \frac{n_e}{f^2}$$
 ($n = c/v$), onde c é a velocidade da luz no vácuo e v é a velocidade da luz na atmosfera, a refração é dada por $N = 10^6 (n-1)$ e a equação:

(1)

(2)

(3)

onde:

- Termos hidrostáticos secos (1) e molhados (2) dominam abaixo de 70 km
- O termo úmido (2) se torna importante na troposfera e pode constituir até 30% de refração na superfície nos trópicos
- Na presença de vapor de água, é necessária informação de temperatura e vapor de água
- Água líquida e aerossóis são geralmente ignorados
- Termo ionosférico (3) domina acima de 70 km



Etapas de processamento do sinal de RO para a sua inversão

O processamento dos sinais de RO inclui alguns passos conforme descrito a seguir para a inversão dos dados:

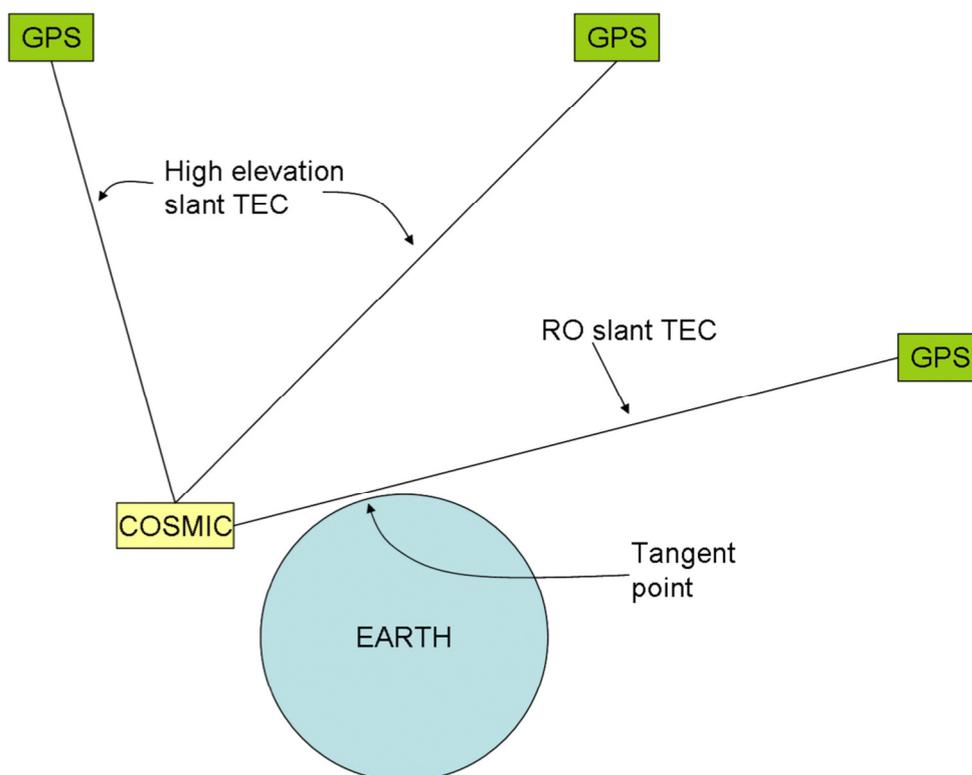
ENTRADA: amplitude e fase, posições e velocidades do satélite

1. Detecção dos erros de rastreamento e truncamento do sinal
2. Filtragem dos dados brutos das frequências de deslocamento Doppler L1 e L2
3. Estimativa do ponto de ocultação
4. Transferência da grade de referência para a curvatura local da Terra
5. Cálculo dos ângulos de refração em L1 e L2 dos dados filtrados Doppler
6. Cálculo do ângulo de refração do sinal bruto complexo de L1
7. Combinação dos perfis de ângulo de refração de 5 e 6
8. Calibração ionosférica do ângulo de refração (SAÍDA)
9. Estimativa otimizada do ângulo de refração
10. Recuperação da refratividade (SAÍDA)
11. Recuperação de P e T (SAÍDA)

5 REQUISITOS DE PROCESSAMENTO

Os dados obtidos pelo instrumento de RO podem conter medições feitas através da rádio-ocultação de fato bem como medições de visada direta entre o LEO e os satélites GPS (em elevações altas). Ambos os tipos de medições podem ser utilizados.

Se for assumido que o receptor pode “ver” oito satélites GPS em elevação alta, então ocorrem (para um satélite da constelação COSMIC como exemplo) cerca de 400 TECs com inclinação elevada em um período de 15 min. Em um caso observado o COSMIC fez aproximadamente 2000 medições de RO por dia. Portanto, aproximadamente 20 medidas de RO podiam ser utilizadas no mesmo período de 15 min.



Abaixo segue a descrição da classificação a ser utilizada para cada tipo de dado.

NÍVEL	DESCRIÇÃO
Pacote de Dados	Fluxo de Dados de telemetria na forma recebida pela estação terrena, com dados de ciência e engenharia embutidos.
Nível 0	Dados científicos de instrumento (e.g. medidas brutas de tensões, contagens) em resolução máxima, ordenadas no tempo, com erros de transmissão e duplicidades removidas. brutas
Nível 1-A	Dados de Nível 0 que foram localizados no tempo e possivelmente transformados (e.g. calibrados, rearranjados) de maneira reversível e empacotado com dados auxiliares de solo e bordo (aplicação de transformações reversíveis).
Nível 1-B	Transformações irreversíveis (e.g. reamostragem, remapeamento, calibração) nos valores de medidas do instrumento (e.g. intensidade do campo magnético).
Nível 2	Parâmetros derivados dos dados de L1, localizados no tempo e espaço de acordo com a localização, apontamento e amostragem do instrumento.
Nível 3	Parâmetros mapeados em um grid uniforme de espaço-tempo.
Nível 4	Saída de modelos ou resultados de análise de dados de nível mais baixo (e.g. parâmetros derivados de múltiplas medidas).

A seguir cada dado gerado do instrumento GROM é classificado conforme a denominação relacionada na tabela anterior.

#	PRODUTO	ENTRADAS	NÍVEL ATUAL	NÍVEL SUGERIDO
1	Tempo do receptor	Sensor no modo PLL (<i>Phase-Locked Loop</i>) ou Elo Travado em Fase (antenas RO)	L0	L0
2	Pseudodistância em L1 e L2	Sensor no modo PLL (<i>Phase-Locked Loop</i>) ou Elo Travado em Fase (antenas RO)	L0	L0
3	Fase da portadora em L1 e L2	Sensor no modo PLL (<i>Phase-Locked Loop</i>) ou Elo Travado em Fase (antenas RO)	L0	L0



4	Relação sinal ruído (SNR)	Sensor no modo PLL (<i>Phase-Locked Loop</i>) ou Elo Travado em Fase (antenas RO)	L0	L0
5	Amostras de fase e quadratura em L1	Sensor no modo OL (<i>Open Loop</i>) ou Elo Aberto (antenas RO)	L0	L0
6	Modelos Doppler e de Distância	Sensor no modo OL (<i>Open Loop</i>) ou Elo Aberto (antenas RO)	L0	L0
7	Posição e Velocidade do Satélite	Sensor com a Determinação de Órbita Precisa (antenas POD)	L0	L0
8	Dados de fase e amplitude do sinal corrigidos em L1 e L2	<ul style="list-style-type: none"> • #1 • #2 • #3 • #4 • #7 	L1B	L1B
9	<i>Bending angle</i> (ângulo de flexão do sinal)	<ul style="list-style-type: none"> • #1 • #5 • #6 • #7 • #8 • Dados geométricos da RO • Conjunto de procedimentos para remoção de erros 	L1B	L1B
10	Índice de Cintilação em amplitude (S4)	<ul style="list-style-type: none"> • #5 • #7 • #8 	L2	L2
11	Conteúdo Eletrônico Total (sTEC) ou <i>Slant Total Electron Content</i>	<ul style="list-style-type: none"> • #7 • #8 • #9 	L2	L2
12	Perfil Vertical de Densidade Eletrônica (NEP)	<ul style="list-style-type: none"> • #7 • #8 • #9 • Dados geométricos da RO 	L4	L4



13	Conteúdo Eletrônico Total Vertical (VTEC) ou <i>Vertical Total Electron Content</i>	<ul style="list-style-type: none"> • #12 	L4	L4
14	Perfil de Refratividade (RP)	<ul style="list-style-type: none"> • #9 • modelo climatológico 	L3	L3
15	Perfil Vertical da Temperatura Estratosférica (TP)	<ul style="list-style-type: none"> • #14 • considerações sobre o equilíbrio hidrostático e a pressão de vapor d'água 	L3	L3
16	Perfil da Variabilidade de Energia ou Pressão, indicador de ondas atmosféricas (EP)	<ul style="list-style-type: none"> • #14 • considerações sobre o equilíbrio hidrostático e a pressão de vapor d'água 	L3	L3
17	Perfil vertical da pressão de vapor d'água (atmosfera úmida) / razão de mistura troposférica (ar seco e ar úmido) (VPP / MRP)	<ul style="list-style-type: none"> • #14 • relação hidrostática • pressão • temperatura 	L3	L3



6. REQUISITOS DE INSTRUMENTO

6.0. DESCRIÇÃO BÁSICA DO INSTRUMENTO GROM

A técnica de RO foi concebida inicialmente para estudos de atmosferas planetárias do sistema solar (*e.g.* Fjeldbo *et al.*, 1971). O êxito nestes resultados pioneiros ampliou a investigação, sobretudo na área de sensoriamento remoto da atmosfera terrestre. Basicamente, a técnica apoia-se no fato de uma atmosfera planetária comportar-se como uma lente esférica para sinais de rádio em escala centimétrica (banda L), refratando e gerando atrasos na propagação destes sinais. O efeito de lente é devido ao decréscimo exponencial da densidade atmosférica com a altitude. Assim, se as posições dos satélites que transmitem e recebem os sinais são precisamente conhecidas, este “atraso atmosférico” (diferença temporal de atraso do sinal ao refratar-se pela atmosfera) pode ser medido com relativa acurácia, determinando-se a refração Doppler do sinal, que por sua vez é transformada (método de inversão) para estimar a densidade em função da altitude. Esta seção sumariza os conceitos básicos da técnica de RO, compreendendo as características das medidas e a obtenção dos perfis atmosféricos com aplicações em ciências da meteorologia e aeronomia.

6.2. CARACTERÍSTICAS DAS MEDIDAS DE RO

Em uma primeira aproximação, os elementos da óptica geométrica e o método quase-clássico WKB fornecem um suporte adequado à descrição dos experimentos de RO (*e.g.* Gorbunov e Kornblueh, 2003). A Figura 1 representa a geometria de um evento de ocultação entre os satélites GPS-oc e LEO. A calibração dos relógios dos receptores e transmissores requer a seguinte configuração: o receptor de ocultação (LEO) deve visualizar simultaneamente o transmissor de ocultação (GPS-oc) e o transmissor de visada direta (GPS-cal); um segundo transmissor de visada direta (GS) deve visualizar simultaneamente o GPS-oc e o GPS-cal. Um exemplo de modelagem dos sinais de GPS envolvidos nestes experimentos, e os respectivos observáveis, pode ser encontrado em Hajj *et al.* (2002).

A Figura 1 também introduz os seguintes elementos importantes: o ângulo de refração (*bending angle*) e o parâmetro de impacto radial. O ângulo de refração, α , é definido como o ângulo entre o raio de visada do sinal antes e depois da passagem pela atmosfera; o parâmetro de impacto, p , é definido como a distância entre o centro de simetria da Terra e o prolongamento do traçado que representa o caminho do sinal no vácuo. Durante um evento de ocultação, seja no modo ascendente (sinais de ocultação acima do ponto de tangência) ou no modo descendente (sinais de ocultação abaixo do ponto de tangência), a variação do ângulo α em relação ao parâmetro de impacto p é dependente do índice de refração atmosférico, n . Teoricamente, a relação $\alpha(p)$ pode ser convertida por intermédio da transformada de Abel (problema inverso) em perfis verticais de índice de refração, $n(r)$ (e.g. Gaykovich, et al. 1983; Hocke, 1997; Holzschuh, 2007).

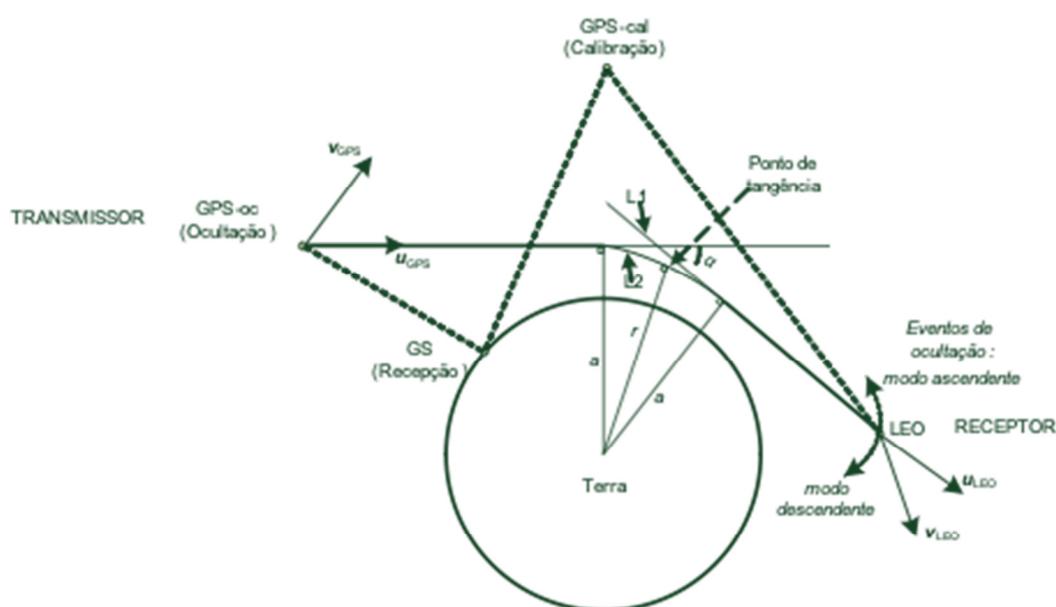


Figura 1 – Geometria da ocultação GPS, usando de conceitos advindos da óptica geométrica aplicada ao problema de RO. Os sinais de frequência L1 e L2 (banda L) percorrem caminhos distintos devido a característica dispersiva do meio ionosférico. (Adaptação de: Chi, 2009).

Em experimentos de RO, medidas diretas de α e p são tecnicamente difíceis de ser realizadas. Para contornar estas dificuldades, medidas do desvio Doppler na frequência do sinal, calculado pela projeção das velocidades dos satélites GPS e LEO (vide Figura 1) em relação ao caminho percorrido pelo sinal entre o transmissor e o receptor, combinada à sua relação geométrica com o traçado da ocultação, podem ser utilizadas para estimar em primeira or-



dem valores para α e p . A dedução formal, passo a passo, deste procedimento, pode ser encontrada em Gorbunov e Kornblueh (2003).

A limitação principal da descrição da RO no contexto da óptica geométrica refere-se à interpretação ambígua das medidas da baixa atmosfera, tendo em vista a estrutura vertical irregular (descontínua) do índice de refração nesta região. Tal comportamento gera um efeito pronunciado de interferência dos sinais de RO no receptor, também denominado de propagação de multicaminho das ondas de rádio. Infelizmente, a ambiguidade introduzida pelo efeito de multicaminho não é uma exceção, mas a regra em RO. Assim, o processo de inversão exige um modelo espectral de propagação de onda, baseado nos conceitos teóricos da teoria escalar de difração (zonas de Fresnel). Uma investigação minuciosa no contexto do modelo de difração é fornecida por Melbourne (2004).

Obtenção dos perfis atmosféricos

Em aplicações atmosféricas, a refratividade do meio é definida por $N = 10^6 (n - 1)$. Na atmosfera neutra, N relaciona-se à temperatura (T), à pressão parcial hidrostática (P_d) e à pressão parcial do vapor de água (P_w) (Kursinski e Hajj, 2001). Aproximadamente 90% do “atraso troposférico” é devido à parcela hidrostática. A parcela ‘úmida’ depende do vapor d’água, que, devido à sua alta variabilidade, é de difícil parametrização. Na ionosfera, que é um meio parcialmente ionizado e dispersivo, N é dependente da frequência do sinal de propagação (f) e da densidade eletrônica (n_e). No espectro das frequências de sinais de GPS, 99.9% do “atraso ionosférico” deve-se à contribuição de N em primeira ordem, proveniente da relação de dispersão básica ionosférica, em que se negligenciam os efeitos do campo geomagnético. Os efeitos de segunda ordem (equação de Appleton-Hartree) são discutidos em Bassiri e Hajj, (1993). Assim, uma parametrização aproximada à refratividade é dada por:

$$N = a_1 \frac{P_d}{T} + a_2 \frac{P_d}{T^2} + a_3 \frac{P_w}{T^2} - b \frac{n_e}{f^2}.$$

Os valores dos fatores dimensionais a e b estão em contínua avaliação experimental (e.g. Bevis *et al.*, 1994).



O atraso temporal do sinal GNSS é a medida fundamental em experimentos de RO, que é uma função da refratividade atmosférica. O atraso temporal contém, basicamente, três tipos de erros: o erro relacionado à precisão da órbita entre GNSS – LEO; o erro devido ao atraso somente relativo à ionosfera e à baixa atmosfera (excesso de fase – na realidade um sinal); e o ruído, representado pelo multicaminho e os efeitos intrínsecos que limitam a resolução do receptor. As técnicas empregadas em processamento dos sinais GNSS envolvem combinações lineares das diferenças de fases (simples e duplas diferenças) entre os atrasos temporais (Hofmann-Wellenhof, et al., 2008). Os dados relacionados a um evento de ocultação, em função do tempo e da altura do ponto de tangência, produzem os perfis de variação da relação sinal/ruído, do atraso do excesso de fase e Doppler.

O processo de obtenção dos perfis atmosféricos é caracterizado por duas etapas. Inicialmente, os perfis de variação da relação sinal/ruído e do atraso do excesso de fase são usados para determinar o perfil do ângulo de refração em função do parâmetro de impacto, $\alpha(p)$. Em seguida, $\alpha(p)$ é invertido (transformada de Abel) para gerar a refratividade e, posteriormente, os perfis verticais de temperatura, pressão, umidade e densidade eletrônica ionosférica são obtidos. Note que somente com a determinação da refratividade, não é possível avaliar as quantidades geofísicas de interesse sem a suposição de condicionantes. Por exemplo, na estratosfera a densidade numérica do vapor d'água é muito pequena, tal que a sua contribuição à refratividade é desprezível. Uma análise semelhante é válida à densidade eletrônica. Assim, tem-se $N = N(P, T)$. A solução para as duas grandezas atmosféricas é alcançada se estabelecermos um modelo de fluido, tal como as equações do equilíbrio hidrostático e a lei dos gases perfeitos (dito, solução hidrostática).

As aplicações das medidas de RO em previsão meteorológica (informação do conteúdo de vapor d'água) têm sido profícuas. Uma nova vertente de pesquisa em assimilação de dados de RO, com o objetivo de incorporá-los aos modelos numéricos de circulação global e regional, tem demonstrado ser promissora para estudos climáticos de longo prazo.

A aplicação fundamental da RO do ponto de vista da aeronomia ionosférica é a possibilidade de medir o perfil vertical da densidade eletrônica. Em princípio, a resolução vertical é elevada; entretanto, os valores obtidos representam o conteúdo eletrônico total (TEC), que é definido por:



$$\text{TEC} = \int_0^{\infty} n_e dz$$

A inversão da medida do TEC pode ser realizada supondo simetria esférica (Lei, *et al.*, 2007). Por conseguinte, na presença de gradientes horizontais da densidade eletrônica, a técnica produzirá um perfil apenas aproximado do perfil real. Faz-se necessário conhecer a variabilidade da estrutura horizontal ionosférica, seja por intermédio de medidas radiométricas de satélite conjuntas (Dymond *et al.*, 2009) ou por modelos numéricos ionosféricos (Jakowski *et al.*, 2002), tornando a inversão um processo laborioso.

Receptor de Ocultação e GPS Integrado

Conforme já dito acima, o Receptor de Ocultação e GPS Integrado (Integrated GPS and Occultation Receiver - IGOR) é uma continuação do receptor BlackJack GPS da JPL para aplicações espaciais. O IGOR corresponde de perto com o projeto CHAMP BlackJack, mas emprega um maior grau de componentes eletrônicos qualificados em espaço do que a versão original do JPL. Os primeiros vôos do receptor IGOR foram em 2005/2006 a bordo da constelação Taiwanese Formo-sat-3 (antiga COSMIC) e da missão alemã TerraSAR-X.

O receptor suporta um total de quatro entradas de antena, que podem ser designadas de forma flexível para medições de navegação e ocultação. Os 48 canais receptores individuais podem ser alocados em conjuntos de três para rastrear códigos C/A-, P1- e P2- para até 16 satélites GPS. Durante a antispoofing, uma técnica de rastreamento patenteada e sem código é usada para estimar o código P a partir do código Y criptografado. Além do modo de rastreamento principal, o receptor pode operar no modo de oclusão para coletar medições quando os satélites do GPS sobem ou se ajustam.

Embora o projeto original do receptor BlackJack envolva um grande número de componentes COTS, testes de solo extensivos e a experiência de voo disponível fornecem evidência adequada para sua sobrevivência em um ambiente espacial.

O receptor IGOR é especificado para tolerar uma dose total de ionização de pelo menos 12 krad, que é adequada para durações de missão de vários anos em uma órbita baixa da Terra (LEO). Um alto nível de tolerância a falhas é fornecido por meio de quatro sequências de entrada R/F independentes e duas seções digitais independentes.



Devido ao seu uso em múltiplas missões espaciais, o receptor Black-Jack é bem caracterizado por testes de laboratório e validações em vôo e resultados semelhantes podem ser esperados para o projeto IGOR. Para os testes atuais, a unidade de vôo TerraSAR-X foi disponibilizada pelo GeoForschungsZentrum (GFZ), Potsdam e o Projeto TerraSAR-X. Ele difere do design padrão IGOR através do uso de amplificadores externos de baixo ruído e filtros adicionais de passagem de banda na entrada R/F.

O IGOR é um receptor GPS avançado que rastreia tanto no modo PLL (fase-locked loop) quanto no modo OL (open-loop); o segundo permite o rastreamento de sinais RO significativamente flutuantes após a propagação através da baixa troposfera úmida, sem rastreamento de erros e perda de bloqueio (Sokolovskiy, 2001, 2004) e, como resultado, redução de erros de inversão e melhor penetração dos perfis recuperados na superfície (Anthes et al., 2008). Cada espaçonave COSMIC utiliza duas antenas de microplaca de alto ganho de microstrip de 1×4 para rastreamento de satélite oculto de 50 Hz para perfilamento atmosférico, e duas antenas de patch único (inclinadas a +15 graus de elevação) para 1Hz POD (e ionospheric profiling) e rastreamento de satélite de referência de 50 Hz para perfilamento atmosférico. A saída bruta de dados de RO do receptor IGOR é contínua e consiste de tempo de receptor, medições de pseudo intervalo L1 e L2, fase de portadora e relação sinal-ruído (SNR) para rastreamento PLL, e L1 I & Q (fase e quadratura).) amostras e modelos Doppler e de alcance para rastreamento OL.

IGOR(Broadreach/JPL)

Pais de origem:	Estados Unidos da América
Tipo:	Receptor com suporte eletrônico e habitação
Sinais:	GPS L1/L2
Raw Data Accuracy:	C/A, P(Y) 0.1 m LA,L1,L2 0.5 mm
Antenas:	4
Canais:	3 x 16
Tipos de medição:	C1,P1,P2 LA,L1,L2
Dimensões:	200 x 240 x 110 mm ³
Peso:	4.6 kg

Potência: 16 W

Temperatura de Operação: $-10^{\circ}\text{C} / +55^{\circ}\text{C}$

Tolerância à Radiação: >12 krad SEE hard

Detalhes técnicos do IGOR as missões:

I) COSMIC (2005), TerraSAR-X (2006)

Nav: 15 m

Nav Acc: 17 m SPP

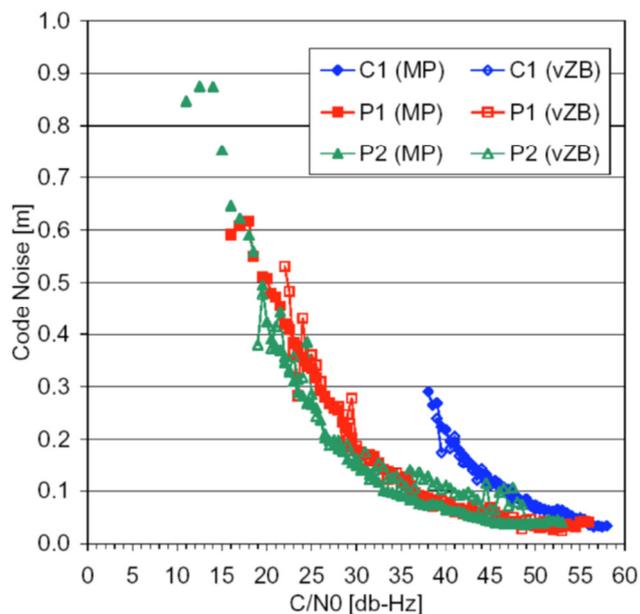
Time to first fix - TTFF: 3-16 min

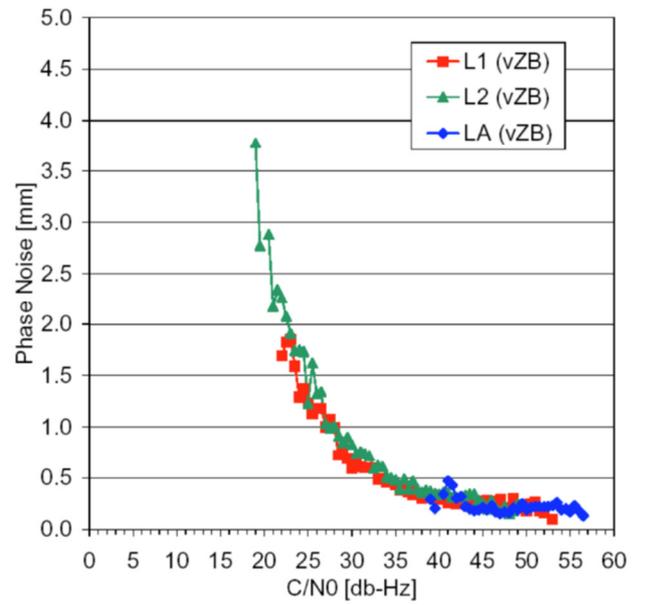
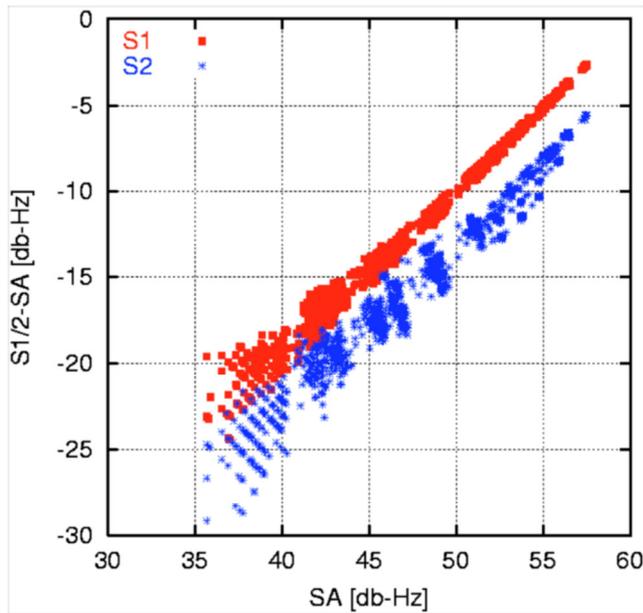
ROM Cost: 500 k€

Missions: TanDEM-X (2006), COSMIC (2006)

Nota: Após a energização, o receptor permanece no estado de inicialização (modo de sinal sonoro) por cerca de 2 minutos antes que a busca real do sinal seja iniciada. Depois disso, demora entre 3 e 14 min para obter uma primeira correção de navegação. O TTFF médio foi de aproximadamente 10 min (incluindo o modo de sinal sonoro).

Ruído de código IGOR e ruído de fase da portadora em função da densidade do portador-ruído. Linhas individuais indicam resultados baseados em combinação de múltiplas vias (MP) e teste virtual de base zero (vZB).





Semi-Codeless Tracking Posses

Erros do Código Diferencial (Differential Code Biases - DCB)

P1-C1: +0.3 m

P2-C1: +4.7 m

P2-P1: +4.4 m



Obs.: DCBs determinados a partir de diferenças de pseudo divisão em teste de simulador de sinal sem atrasos do caminho ionosférico.

Compensações de temporização da fase da portadora (Carrier Phase Timing Offsets)

LA/L1: $-0.45 \pm 0.05 \mu\text{s}$

L2: $-0.45 \pm 0.05 \mu\text{s}$

Obs.: Deslocamento de tempo da fase de portadora relativo à solução de relógio baseada em código. Os valores especificados precisam ser adicionados ao registro de data e hora dado pelo receptor para obter a época de medição verdadeira.

Mapa de deslocamento de tempo de $1\mu\text{s}$ em erro de 7 mm ao longo da pista.

Deslocamentos internos do simulador de sinal podem ser suspeitos, mas o viés inter-receptor permanece.

Total Electron Content (TEC)

Range: 3–300 TECU

Sensitivity: 3–5 TECU

Rate: 10 Hz

II) ADONIS —> Atmospheric Drag, Occultation 'N' Ionospheric Scintillation mission

Com o instrumento IGOR, o A-DONIS e o B-DONIS recebem sinais GNSS que são deslocados pelo Doppler enquanto ganham atraso ionosférico dependente da frequência (dispersivo) devido à refração. Medindo este desvio de frequência - usando os sinais L1 e L2 - e comparando-o com o desvio Doppler teórico não-oculto, o ângulo de refração e o índice de refração podem ser derivados para um ponto tangencial assumido. A partir do índice de refração, os valores do TEC são calculados para uma determinada altura. Conforme a ocultação está



subindo (ou ajustando), o instrumento IGOR faz 10 medições por segundo, de modo que um perfil de densidade eletrônica vertical para uma dada latitude e longitude pode ser derivado. O IGOR tem uma precisão de 3 a 5 unidades do TEC (TECU).

O IGOR está operacional na constelação COSMIC / Formosat-3, portanto, possui um TRL de 9. Sua precisão de posição tridimensional de raiz quadrada média (rms) de 0,5 m e precisão de velocidade orbital de 0,2 mm/s são fornecidas pelo próprio instrumento. Os valores de densidade eletrônica derivados das medidas na órbita requerida estendem a amostragem ionosférica de alta resolução de regiões com cobertura esparsa (regiões árticas, oceanos e hemisfério sul). O desenvolvimento do modelo de engenharia do receptor Tri-GNSS (TriG) (GALILEO, GPS e GLONASS) está concluído, mas seu requisito de energia de 50 W é muito alto para compensar 500 radio-ocultações adicionais diárias (Broadreach Engineering 2014) , daí a escolha do instrumento atual.



7. REFERÊNCIAS

- Fjeldbo G., A. J. Kliore, V Eshleman. The neutral atmosphere of Venus studied with the mariner V radio occultation experiments *Astron. J.*, 76, 2, 123-140, 1971
- Gaykovich, K. P., A. S. Gurevich, A. P. Naumov. On a Reconstruction of Meteorological Parameters from Intra-Atmospheric Measurements of Optical Refraction of Cosmic Sources, *Investiya, Atmos. and Oceanic Phys.*, 19, 7, 507-512, 1983.
- Bevis, M., Businger, S., Chiswell, S., Herring, T. A., Anthes, R. A.,
- Rocken, C., and Ware, R. H.: GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water, *J. Appl. Met.*, 33, 3, 379–386, 1994.
- Bassiri, S., Hajj, G. High-order ionospheric effects on the global positioning system observables and means of modelling them. *Manuscr. Geod.*, 18, 280-289, 1993.
- Kursinski, E. R. e Hajj, G. A. A comparison of water vapor derived from GPS occultations and global weather analyses. *J Geophys. Res.*, 106, D1, 1113-1138, 2001.
- Lei, J.H., S. Syndergaard, A.G. Burns, S.C. Solomon, W.B. Wang, Z. Zeng, R.G. Roble, Q. Wu, Y.H. Kuo, J.M. Holt, S.R. Zhang, D.L. Hysell, F.S. Rodrigues and C.H. Lin. Comparison of COSMIC ionospheric measurements with ground-based observations and model predictions: Preliminary results. *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, A07308, 2007.
- Jakowski, N., A. Wehrenpfennig, S. Heise, C. Reigber, H. Luhr, L. Grunwaldt, T. Meehan. GPS radio occultation measurements of the ionosphere from CHAMP: Early results. *Geophysical Research Letters*, 29, 10, 1-4, 2002.
- Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, E. Wasle *GNSS: Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and More*, Springer ed., 2007.
- Dymond, K. F., Budzien, S. A., Chua, D. H.; Coker, C., J-Y. Liu. Tomographic Reconstruction of the Low-Latitude Nighttime Electron Density Using FORMOSAT-3/COSMIC Radio Occultation and UV Photometer Data. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 20, 1, 215-219, 2009.
- Melbourne, G. W. Radio Occultations Using Earth Satellites: A Wave Theory Treatment. In: *Deep Space Communications and Navigation Series*, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Monograph 6, 2004.
- Gorbunov, M. E., L. Kornbluh. Principles of variational assimilation of GNSS radio occultation data, *Max Planck Institut fur Meteorologie*, Report 350, 2003.
- Hocke, K. Inversion of GPS meteorology data. *Annales Geophysicae*, 15, 4, 443-450, 1997.



Chi O. Atmospheric Sensing Using GNSS Occultations, 381-397. In: *GNSS Applications and Methods* (S.Gleason, D. Gebre-Egziabher), Artech House, 2009.