



RELEVÂNCIA DO MONITORAMENTO DA OPACIDADE IONOSFÉRICA NO RIO GRANDE DO NORTE PARA APLICAÇÕES ENVOLVENDO SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO SATELITAL

ROSA, Emily^{1C}; VIVACQUA, Lucas^{2M};

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, RN, emilly.rosa.429@ufrn.edu.br, Bacharelado em Ciências e Tecnologia (BC&T)

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal, RN, lucasgvivacqua@gmail.com, Programa de Pós-graduação em Engenharia Aeroespacial (PPGEA)

Introdução

Ionosfera é o termo destinado para a região ionizada da atmosfera terrestre que possibilita as comunicações de longa distância pois esta camada reflete ondas de rádio de até 30 MHz, possibilitando a radiocomunicação. Ela é formada pela atmosfera neutra e uma fonte de ionização, por exemplo o processo de fotoionização (MORO, 2011) portanto, o meio ionosférico é considerado eletricamente neutro, requisito básico para um gás ser classificado como um plasma, bem como a absorção da radiação ionizante proveniente de raios x e raios gama. Devido às características físico-químicas da nossa atmosfera durante algumas épocas geomagneticamente perturbadas há a influência das regiões aurorais e polares no equador, propagando abalos atmosféricos originados de tempestades magnéticas que ocorrem devido às perturbações da magnetosfera da terra ao ser atingida por ondas de choque dos ventos solares.

As camadas da Ionosfera são classificadas em três diferentes altitudes, a mais baixa é chamada de camada D, a camada média intitulada como E e a camada mais alta nomeada como F. Cada uma possui diferentes altitudes e pode ser caracterizada pelo perfil da distribuição da concentração de elétrons livres ou pela densidade eletrônica (BRUM, 1999). A absorção de sinais de rádio feita pelas camadas da Ionosfera pode ser monitorada com o Riômetro do inglês Relative Ionospheric Opacity Meter (RIOMETER). Este equipamento é essencial para o monitoramento do nível de absorção do ruído cósmico que é fortemente influenciado por alguns fatores como a atividade dos ventos solares e tempestades geomagnéticas.

Para realizar o cálculo da absorção Ionosférica do ruído cósmico utiliza-se o Dia Quietos (BRUM, 1999) que se refere a um período de tempo em que as condições Ionosféricas estão calmas, ou seja, livres de perturbações de qualquer origem. A classificação do Dia Quietos é útil para operadores de sistemas de navegação por satélite pois dependem de comunicações de rádio, desse modo, é possível planejar suas operações de acordo com as condições Ionosféricas esperadas.

A navegação por satélite é uma técnica aplicada para a estimativa da posição de um receptor na Terra a partir da distância deste em relação a um conjunto de satélites. Para isso é construída uma constelação de veículos orbitais que enviarão continuamente um sinal a uma frequência portadora na banda L (1 a 2 MHz) com uma potência limitada da ordem de -128 dB (10^{-18} W/m). Esta onda carrega um sinal digital chamado de C/A Code (Coarse acquisition code), que contém uma série de +1 e -1 em uma ordem definida como PRN (Pseudo-Random Noise) que identifica o satélite dentro da constelação. Para precisar sua posição o usuário deve processar este sinal para cada um dos satélites em sua visada. Esse processamento será suficiente para que este estime a distância entre si e o satélite emissor, com a distância relativa a ao menos quatro satélites tem-se um ponto no sistema cartesiano correspondente àquele usuário. Esse ponto se caracteriza, na prática, como uma região devido a incertezas na medição da distância. A essas incertezas dá-se o nome de atrasos e a principal fonte de atraso de sinal é a ionosfera.

A distância é calculada como o produto da velocidade de propagação do sinal, a velocidade da luz, com o tempo medido entre a emissão e a recepção do sinal, "tempo de chegada". Para se obter este tempo, o dispositivo do usuário gera localmente uma réplica do sinal emitido e opera uma convolução entre este e o sinal recebido. Esta operação consiste em somar globalmente o produto ponto a ponto dos dois sinais, incrementando o atraso até que se obtenha o valor máximo da convolução que ocorre quando estes estão em fase.

Além do atraso que corresponderá ao tempo de deslocamento, a convolução é feita com incrementos na frequência para compensar o efeito doppler causado pela velocidade orbital do



satélite em relação ao usuário. Sendo assim, o que chamamos de espaço de busca é um domínio formado por uma dimensão de frequência e uma dimensão de tempo que o processador do usuário deverá varrer a fim de encontrar o pico da convolução para travar no sinal daquele veículo orbital.

Uma vez que o dispositivo encontra o sinal correspondente ao satélite, este pode reduzir o espaço de busca se tiver uma boa previsão de tempo e frequência. Isso economiza processamento e diminui o tempo de resposta do sistema, importante para aplicações em tempo real como no setor de transportes.

Essa previsão, tanto do tempo quanto da frequência vêm de um bom mapeamento das condições ambientais que os afetam. Por isso este trabalho discorrerá sobre a importância da implementação de um riômetro na região do Rio Grande do Norte e como este pode ser usado para se obter um melhor mapeamento e resposta para o conteúdo eletrônico total (TEC), relacionado ao atraso do sinal, e para fenômenos como tempestades magnéticas e bolhas de plasma que podem causar um efeito chamado de cintilação.

Materiais e métodos

O trabalho faz uso de métodos qualitativos de análise para estabelecer uma relação entre eventos ionosféricos que possam ser monitorados com o uso do riômetro e os impactos que este provocam na precisão do sinal dos sistemas GNSS, a fim de justificar a necessidade de instalação deste equipamento no Rio Grande do Norte.

Para isso, investigamos diversos trabalhos que apresentam dados de tempestades magnéticas, bolhas de plasma e até mesmo dos chamados dias calmos observados por riômetros em diversas localidades. Foi feita, da mesma maneira, uma investigação de como cada um destes fenômenos interfere no sinal emitido pelos satélites de geonavegação.

Resultados e Discussões

Como foi discutido na introdução, o riômetro tem excelente desempenho ao mapear a camada inferior da atmosfera, não apenas em suas descontinuidades, mas durante os dias calmos (BRUM, 1999). Essa descrição é especialmente importante para o Brasil pelo fato de a anomalia magnética do Atlântico Sul (SAMA) estar localizada sobre seu território, o que aumenta a precipitação de partículas na região (MORO, 2011). Soma-se a isso, para a região do Rio Grande do Norte, a Anomalia de Ionização Equatorial (EIA). Ambas aumentam os gradientes de ionização, em especial durante o crepúsculo e a alvorada (SOUSASANTOS, 2021).

Além disso, a baixa ionosfera, principalmente a camada E, é onde ocorrem com frequência as chamadas bolhas de plasma (SOBRAL, 1980), descontinuidade na densidade de íons na camada carregada da atmosfera. Podem ser causadas, muitas vezes, por ondas de gravidade vindas da atmosfera neutra à baixo (TAORI, 2011), mas que são complicadas de prever e têm maior incidência em zonas equatoriais (MOHKAR, 2019). Por fim, o riômetro exerce papel importante na identificação de tempestades magnéticas (BLAGOVESHCHENSKY, 2018; WATSON, 2011; PITKÄNEN, 2013).

Para a instalação do Riômetro é necessário que o local seja livre de ruído eletromagnético, portanto, locais são investigados antes de estabelecer o equipamento, para isso é preciso utilizar uma antena passiva para monitorar o ruído da área e após a análise certificar a adequabilidade do ambiente para o monitoramento da Ionosfera. Estudos recentes feitos pela autora em sua iniciação científica, avaliaram três possíveis locais no Rio Grande do Norte, sendo eles: A Escola de Ciências e Tecnologia (ECT), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Centro de Lançamentos da Barreira do Inferno (CLBI).

Existem dois efeitos principais que a ionosfera gera no sinal dos satélites de navegação, o primeiro é o atraso ionosférico. Esse efeito é mais previsível e depende do conteúdo eletrônico total na trajetória do sinal. A maneira que os sistemas GNSS hoje em operação lidam com este atraso é transmitir seu sinal em mais de uma frequência (FEES, 1987). Tira-se proveito deste efeito afetar a velocidade de deslocamento da onda de maneira proporcional a sua frequência para contorná-lo. Mas mesmo para isso é necessário um mapeamento preciso dos dias calmos. O sistema indiano IRNSS, por exemplo, faz uso de um sinal na frequência S de 2494,048 MHz, acima da banda L (BETZ, 2015). Isso é necessário porque a Índia, assim como o Brasil, está localizado em cima do equador magnético onde o TEC tem gradientes maiores em latitude (KINTNER, 2009).

O segundo efeito é um efeito estocástico que pode ocorrer por uma série de fatores. A este se dá o nome de cintilação, este afeta o sinal GNSS de duas maneiras: em sua amplitude e em sua frequência. Como dito na introdução o sinal emitido pelo GPS é fraco e por isso pode, a depender da



intensidade da cintilação faz com que o usuário perca temporariamente contato com os satélites afetados (KINTNER, 2009). O que pode acarretar em perda de precisão ou até falhas na estimativa da posição. A variação na amplitude do sinal é medida por um fator S4 que descreve a intensidade da cintilação (BORRIES, 2020).

Além do impacto na amplitude, a cintilação pode afetar a fase do sinal, como vimos na introdução, aplicações em tempo real dependem de um mapeamento de frequência acurado por conta da redução do espaço de busca. O que é incompatível com a imprevisibilidade da cintilação. Existe para a frequência uma quantidade análoga ao S4, o fator σ_ϕ . O que causa problemas principalmente em operações de duas frequências (MORAES, 2014) que como vimos é importante para superar o atraso ionosférico.

Pode-se perceber que tanto S4 quanto σ_ϕ são úteis para caracterizar e fazer diagnósticos de eventos ocorridos, mas pouco úteis como modelos que expliquem o fenômeno. Existem na literatura tais modelos como os apresentados por Vasylyev, mas seu caráter estocástico produz modelos demasiado complexos para que fossem aplicáveis em nosso caso. Priyadarshi aponta ainda que os modelos existentes têm pouca aplicabilidade próximos a anomalias como a equatorial.

A natureza imprevisível deste fenômeno tem relação com suas fontes, igualmente imprevisíveis. Tempestades magnéticas têm origem em atividades solares como flares, ejeções de massa coronal ou no processo de recombinação dos ventos solares com a camada mais externa da magnetosfera e, por isso, deve se levar em conta os ciclos solares quando se pensa em cintilação (MARINI-PEREIRA, 2021). Sua intensidade pode ser medida principalmente pelo índice DST (Disturbance storm-time) que mede a assinatura das correntes ionosféricas (SOUZASANTOS, 2021).

Dentre outros efeitos, tempestades geomagnéticas podem causar uma variação em escala global do TEC (AHMEDOV, 2020), que como visto é a origem do atraso ionosférico. Blagoveshchensky investiga a correlação entre o índice DST e a variação no TEC e a encontra, evidentemente, em tempestades ditas fracas e moderadas. As tempestades e sub-tempestades magnéticas também têm maior efeito em zonas equatoriais. Skone aponta que quase o dobro dos receptores foram corrompidos durante esses eventos em uma região próxima ao equador se comparados com testes em altas latitudes. Perturbações desta fonte podem ser observadas na camada D, a mais baixa, da ionosfera (SOKOLOV, 2011) e assim observadas pelos riômetros a serem instalados.

Bolhas de plasmas são descontinuidades na densidade de carga na ionosfera e, apesar de se ter um mapeamento no sentido de onde e quando ocorrem mais frequentemente, não se tem um modelo adequado que determine o início do fenômeno (KIL, 2015). Ao contrário das tempestades magnéticas que são fenômenos globais, as bolhas de plasma podem ter poucos quilômetros de comprimento o que é um problema para o posicionamento relativo (JEREZ, 2015), uma técnica muito usada para compensar erros que tem sua origem nos satélites como atrasos nos relógios atômicos e erros na estimativa da efemérides. (Oliveira Moraes, 2018) ao investigar a cintilação em diferentes localidades do Brasil constata a maior incidência em zonas equatoriais onde ocorrem em altitudes mais baixas.

Considerações Finais

Em síntese, o trabalho discute a importância do monitoramento da opacidade da ionosfera, devido a sua relação direta com a radiocomunicação e a navegação por satélite. Suas condições são afetadas por perturbações geomagnéticas como as tempestades magnéticas provocadas por ventos solares que atingem o nosso planeta causando alterações físico-químicas nas camadas da ionosfera desfavoráveis a estes sistemas. A instalação do Riômetro no estado do Rio Grande do Norte é de extrema relevância no monitoramento das condições ionosféricas, possibilitando os cálculos do dia quieto para mitigar a imprecisão envolvendo os sistemas de navegação satelital. Ademais, o mapeamento das camadas da ionosfera possibilita entender os efeitos de alguns fatores imprevisíveis como as bolhas de plasmas e a cintilação que possuem modelos muito complexos de exemplificação devido a sua natureza estocástica. Portanto, os impactos das tempestades magnéticas advindas de atividades solares podem afetar a intensidade da cintilação e agravar o atraso ionosférico. Para buscar reduzir algumas imprecisões e fazer o estudo adequado da ionosfera, foram estudados possíveis locais para a instalação do Riômetro avaliando o ruído eletromagnético do ambiente e foi possível obter bons resultados para o Centro de Lançamentos da Barreira do Inferno (CLBI), concluindo como sendo um ótimo candidato para a instalação do equipamento na capital do Rio Grande do Norte.

Referências

- AHMEDOV, Bobomurat J. et al. Integrating of gis and gps for ionospheric perturbations in d-And f-layers using vlf receiver. InterCarto, InterGIS, v. 26, p. 547-560, 2020.
- BASU, Sunanda et al. Ionospheric effects of major magnetic storms during the International Space Weather Period of September and October 1999: GPS observations, VHF/UHF scintillations, and in situ density structures at middle and equatorial latitudes. Journal of Geophysical Research: Space Physics, v. 106, n. A12, p. 30389-30413, 2001.
- BETZ, John W. Engineering satellite-based navigation and timing: global navigation satellite systems, signals, and receivers. John Wiley & Sons, 2015.
- BLAGOVESHCHENSKY, Donat V.; MALTSEVA, Olga A.; SERGEEVA, Maria A. Impact of magnetic storms on the global TEC distribution. In: Annales geophysicae. Copernicus GmbH, 2018. p. 1057-1071.
- BLAGOVESHCHENSKY, D. V.; SERGEEVA, M. A.; RAITA, T. Riometer absorption during four similar storms. Advances in Space Research, v. 69, n. 1, p. 176-186, 2022.
- BORRIES, Claudia et al. Assessment of the capabilities and applicability of ionospheric perturbation indices provided in Europe. Advances in Space Research, v. 66, n. 3, p. 546-562, 2020.
- BRUM, C. **A importância do “Dia Quiet” na absorção ionosférica da camada D da Ionosfera e sua aplicação para os dados de Riômetros da estação Antártica Comandante Ferraz.** Dissertação (Pós-graduação em Geofísica-Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, p. 111. 1999.
- DE OLIVEIRA MORAES, Alison et al. Extended ionospheric amplitude scintillation model for GPS receivers. Radio Science, v. 49, n. 5, p. 315-329, 2014.
- DE OLIVEIRA MORAES, Alison et al. Statistical evaluation of GLONASS amplitude scintillation over low latitudes in the Brazilian territory. Advances in Space Research, v. 61, n. 7, p. 1776-1789, 2018.
- FEES, W. A.; STEPHENS, S. G. Evaluation of GPS ionospheric time-delay model. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, n. 3, p. 332-338, 1987.
- JEREZ, G. O.; ALVES, D. B. M.; SOUZA, J. S. Análise do uso combinado GPS/GLONASS no posicionamento sob efeito de cintilação ionosférica. Revista Brasileira de Cartografia, v. 67, n. 1, p. 201-214, 2015.
- KIL, Hyosub. The morphology of equatorial plasma bubbles-a review. Journal of Astronomy and Space Sciences, v. 32, n. 1, p. 13-19, 2015.
- KINTNER, P. M.; HUMPHREYS, Todd; HINKS, Joanna. GNSS and ionospheric scintillation. Inside GNSS, v. 4, n. 4, p. 22-30, 2009.
- LI, Guozhu et al. Effects of geomagnetic storm on GPS ionospheric scintillations at Sanya. Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics, v. 70, n. 7, p. 1034-1045, 2008.



MARINI-PEREIRA, Leonardo et al. Ground-based augmentation systems operation in low latitudes-Part 1: Challenges, mitigations, and future prospects. *Journal of Aerospace Technology and Management*, v. 13, p. e4621, 2021.

MOKHTAR, M. H. et al. Ionospheric perturbation: A review of equatorial plasma bubble in the ionosphere. In: 2019 6th International Conference on Space Science and Communication (IconSpace). IEEE, 2019. p. 23-28.

MORO, J. **Absorção Ionosférica do Ruído Cósmico utilizando dados de Riômetros da rede SARINET**. Dissertação (Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciência do Ambiente Solar-Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, p.163. 2011.

PITKÄNEN, Timo; AIKIO, Anita T.; JUUSOLA, Liisa. Observations of polar cap flow channel and plasma sheet flow bursts during substorm expansion. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 118, n. 2, p. 774-784, 2013.

PRIYADARSHI, Shishir. **A review of ionospheric scintillation models**. *Surveys in geophysics*, v. 36, p. 295-324, 2015.

REN, Xiaodong et al. Global ionospheric modelling using multi-GNSS: BeiDou, Galileo, GLONASS and GPS. *Scientific reports*, v. 6, n. 1, p. 33499, 2016.

SKONE, S.; KNUDSEN, K.; DE JONG, M. Limitations in GPS receiver tracking performance under ionospheric scintillation conditions. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, v. 26, n. 6-8, p. 613-621, 2001.

SOKOLOV, S. N. Magnetic storms and their effects in the lower ionosphere: Differences in storms of various types. *Geomagnetism and Aeronomy*, v. 51, p. 741-752, 2011.

SOBRAL, Jose Humberto Andrade et al. Association between plasma bubble irregularities and airglow disturbances over Brazilian low latitudes. *Geophysical Research Letters*, v. 7, n. 11, p. 980-982, 1980.

SOUSASANTOS, Jonas et al. Ground-based augmentation system operation in low latitudes-part 2: Space weather, ionospheric behavior and challenges. *Journal of Aerospace Technology and Management*, v. 13, p. e4821, 2021.

TAORI, A.; PATRA, A. K.; JOSHI, L. M. Gravity wave seeding of equatorial plasma bubbles: An investigation with simultaneous F region, E region, and middle atmospheric measurements. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 116, n. A5, 2011.

VASYLYEV, Dmytro et al. Modeling of ionospheric scintillation. *Journal of Space Weather and Space Climate*, v. 12, p. 22, 2022.

WATSON, Chris. Gps tec and riometer techniques for observing absorption events in the high latitude ionosphere. University of New Brunswick, Department of Physics, 2011.