



Cálculo e estudo do TEC utilizando os sinais modernizados do GNSS por meio do desenvolvimento de um software em python

Calculation and study of TEC using modernized GNSS signals through the development of software in Python

Daniel Martins de Carvalho¹, Claudinei Rodrigues de Aguiar²

RESUMO

Várias investigações estão em curso no âmbito do GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite), com o objetivo de aprimorar sua precisão, uma vez que esse sistema pode ser suscetível a diversas fontes de erros sistemáticos. Estes incluem perdas de ciclo, multicaminho ou sinais refletidos, erros relacionados ao relógio, efeitos da atmosfera neutra e da ionosfera, entre outros. Neste contexto, este estudo concentra-se na análise de dois tipos de erros sistemáticos. O primeiro está relacionado com a propagação do sinal na atmosfera, com ênfase na camada ionizada conhecida como ionosfera. O segundo erro diz respeito à Tendência Diferencial do Código (DCB), que se refere à diferença entre os caminhos percorridos pelos sinais e códigos no hardware do satélite e no receptor. O DCB influencia a precisão no cálculo do erro causado pela ionosfera ao utilizar os sinais GNSS. Para alcançar esse objetivo, está em desenvolvimento um programa em Python que utiliza dados de múltiplas frequências e constelações para calcular o Conteúdo Total de Elétrons (TEC) e analisar o DCB, utilizando os sinais provenientes do GPS, GALILEO e GLONASS nas frequências L1, L2 e L5 GPS e GLONASS, E1, E5b e E5a GALILEO, bem como os códigos modulados em cada sinal.

PALAVRAS-CHAVE: GNSS; DCB; Ionosfera.

ABSTRACT

Several investigations are underway within the scope of the GNSS (Global Navigation Satellite System), with the aim of improving its accuracy, as this system can be susceptible to several sources of systematic errors. These include cycle losses, multipath or reflected signals, clock-related errors, neutral atmosphere and ionosphere effects, among others. In this context, this study focuses on the analysis of two types of systematic errors. The first is related to the propagation of the signal in the atmosphere, with emphasis on the ionized layer known as the ionosphere. The second error concerns Differential Code Bias (DCB), which refers to the difference between the paths taken by signals and codes in the satellite hardware and the receiver. The DCB influences the accuracy in calculating the error caused by the ionosphere when using GNSS signals. To achieve this objective, a Python program is being developed that uses data from multiple frequencies and constellations to calculate the Total Electron Content (TEC) and analyze the DCB, using signals from GPS, GALILEO and GLONASS at frequencies L1, L2 and L5 GPS and GLONASS, E1, E5b and E5a GALILEO, as well as the codes modulated in each signal.

KEYWORDS: GNSS; DCB; Ionosphere.

INTRODUÇÃO

O GNSS (*Global Navigation Satellite System* – Sistema Global de Navegação por Satélite) é uma rede de satélites que viabiliza o posicionamento em tempo real de objetos, assim como a orientação tanto em ambientes terrestres quanto marítimos. Ele é amplamente utilizado em diversos setores, como topografia, geodésia, aviação, demarcação de fronteiras, agricultura de precisão e muito mais (IBGE, 2023). Sua

¹ Bolsista do Programa Institucional De Bolsas De Iniciação científica Nas Ações Afirmativas (PIBIC-AF). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: danielc.2020@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 7955548744612047.

² Coordenação de Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: rodriguesaguiar@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8291654390257535.



importância cresce em vários campos da sociedade, especialmente em aplicações civis e científicas. Além de determinar coordenadas tridimensionais, o GNSS é utilizado para monitorar parâmetros atmosféricos, com foco na troposfera e na ionosfera (Aguiar, 2010).

Em aplicações de posicionamento e navegação, a obtenção de parâmetros como posição, velocidade e tempo (PVT) está sujeita a vários erros sistemáticos, como perdas de ciclo, ocorrência de multicaminho ou sinais refletidos, erros no relógio, influências da atmosfera neutra e ionosfera, e diversos outros fatores. A principal razão para a degradação da qualidade dos resultados de posicionamento do GNSS está relacionada à propagação do sinal na atmosfera, com destaque para a influência da ionosfera.

O erro decorrente da propagação do sinal na ionosfera está diretamente relacionado ao TEC (*Total Electron Content* - Conteúdo Total de Elétrons). O TEC é definido como a quantidade de elétrons livres presentes ao longo do trajeto do sinal, entre a antena do satélite e o receptor, e é expresso em unidades de elétrons por uma coluna com uma área de 1m^2 (el/m^2). Nesse contexto, 10^{16} el/m^2 representam 1 unidade de TEC, denominada TECU (*TEC Units*) (Carvalho; Aguiar, 2022).

Devido à natureza dispersiva da ionosfera, é viável empregar sinais GNSS de múltiplas frequências para calcular o TEC ao longo do trajeto do sinal. No entanto, essa estimativa é suscetível à fonte de erro associada ao hardware do sistema, como os erros relacionados aos DCBs (*Differential Code Biases* - Tendências Diferenciais de Código). Esses erros surgem devido às discrepâncias nos trajetos percorridos pelos sinais e códigos nos componentes de hardware do satélite e do receptor.

Os valores de DCB são de extrema importância para o cálculo do valor absoluto do TEC, sendo necessário estimá-los durante o processamento ou calibrá-los independentemente (Mônico, 2008). O cálculo do TEC ao longo do trajeto do sinal pode ser efetuado utilizando uma combinação linear livre de geometria, fazendo uso das observações GNSS (Aguiar, 2010).

As observações mais comuns se baseiam nos sinais L1 e L2 do GPS. O software científico GIB (Grade Ionosférica Brasileira) (Aguiar, 2022) utiliza pseudodistâncias suavizadas pela fase da portadora desses sinais. Contudo, devido à modernização dos sistemas GNSS, como GPS e GLONASS, e à introdução de novas constelações, como Galileo e Beidou, há agora mais sinais e códigos disponíveis. Nesse contexto, este trabalho se concentra na análise do cálculo do TEC, fazendo uso dos sinais e códigos atualizados e novos (Carvalho e Aguiar, 2022).

Neste contexto, o objetivo do trabalho é o desenvolvimento de um algoritmo em Python, para a calcular o TEC e conduzir a análise do DCB com base nas observações disponíveis. No qual, serão utilizados os sinais L1, L2 e L5 GPS e GLONASS, e E1, E5b e E5a GALILEO, juntamente com os códigos modulados, com o objetivo de avaliar a qualidade e as particularidades das combinações desses sinais de múltiplas frequências em distintas condições de atividade solar. Além disso, será examinada a discrepância no TEC entre essas diferentes combinações e sua relação com o DCB.

METODOLOGIA

A técnica utilizada neste trabalho para correção do efeito da refração ionosférica é baseada em medidas da pseudodistância ou da fase da portadora obtidas por receptores de dupla frequência. Assim, o atraso ionosférico absoluto em L1 é estimado por meio da



combinação linear livre da geometria das observáveis de pseudodistância (Aguiar, 2010), isso ocorre da seguinte maneira:

$$I_r^s = \frac{(P_2 - P_1)_r^s}{\gamma - 1} - \frac{c(ds_p^s + dr_p)}{\gamma - 1} \quad (1)$$

com,

$$\gamma = (f_{l1}/f_{l2})^2 = (1572,42/1227,60)^2 = (77/60)^2 \cong 1,6470, \quad (2)$$

$$ds_p^s = \frac{(S_{p2} - S_{p1})^s}{\gamma - 1}, \quad (3)$$

$$dr_p = \frac{(R_{p2} - R_{p1})_r}{\gamma - 1}, \quad (4)$$

Onde:

I_r^s - Atraso ionosférico em unidade de metros, na direção satélite/receptor (*slant*);

P_r^s - Distância geométrica entre a antena receptora e o satélite, cujas coordenadas estão implícitas neste termo;

c - Velocidade da luz (299792458 m/s)

S_p - Tendência devido ao atraso de hardware do satélite, em unidade de segundos;

R_p - Tendência devido ao atraso de hardware do receptor, em segundos;

A equação 3, é referente ao DCB para o satélite s , em unidade de segundos. Os valores desta tendência (ds_p^s), já projetados para L1 (através da eq. 5), são transmitidos nas mensagens de navegação com o nome de TGD (*Time Group Delay*) ou podem ser obtidos nos arquivos IONEX (*IONosphere map EXchange*).

Já a equação 4, se refere a DCB em L1 para o receptor r , em unidade de segundos. ds_p^s e dr_p ocorrem devido à diferentes caminhos percorridos pelo código em L1 e L2 no hardware dos satélites e dos receptores, bem como o não sincronismo na modulação destes sinais, além de ser a constante que permite converter para L1 ou L2, os erros dependentes da frequência do sinal.

Dessa forma, é importante lembrar que é necessário realizar a projeção de I_r^s para L1 ou E1, quando trabalhado com GALILEO. Através da seguinte equação:

$$I_r^s = S * (P_2 - P_1)_r^s = \frac{fx^2}{f_r^2 - fx^2} * (P_2 - P_1)_r^s \quad (5)$$

Onde:

S = Fator de conversão;

fx = Distância geométrica que está subtraindo, no caso P_{1r}^s ;

f_r = Distância geométrica que está sendo subtraída, no caso P_{2r}^s ;

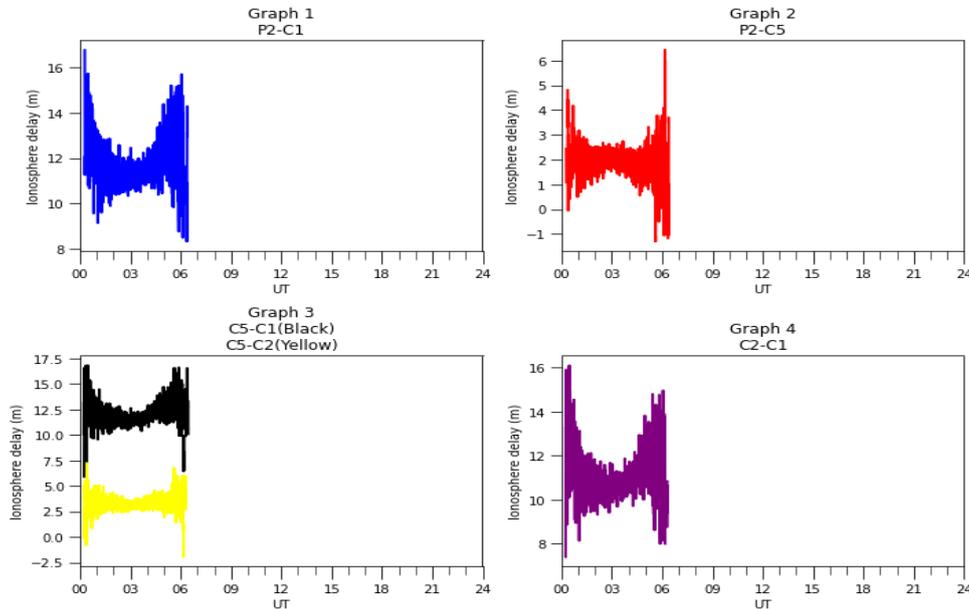
Tem-se ainda que, caso I_r^s não esteja sendo projetado na frequência L1 ou E1, então deverá ser realizado a projeção para as mesmas, da seguinte forma:

$$I_{l1}^s = I_{fx}^s * \frac{fx^2}{f_{l1}^2} \quad (6)$$

Conforme obtido Carvalho e Aguiar (2022), na combinação livre da geometria (eq. 1), o atraso ionosférico obtido é influenciado pelo multicaminho e ruído das observações utilizadas. A Figura 1 exibe quatro gráficos que representam as combinações das

pseudodistâncias calculadas a partir dos códigos P2, P1, C1 e C5, medidos nas portadoras L1, L2 e L5 do satélite PRN 1 do GPS (G01).

Figura 1 - Atraso ionosférico para o satélite PRN 1 do GPS



Fonte: Carvalho e Aguiar (2022).

Nos gráficos, é visível uma representação ruidosa do atraso ionosférico, que é atribuível ao ruído presente na própria observação da pseudodistância (calculada a partir do código). Como resposta a isso, foram desenvolvidos dois algoritmos: um para suavizar os dados do código (Equação 5) e outro para calcular o atraso com base na fase.

Uma maneira eficaz de reduzir a influência do ruído nas observações é utilizar as pseudodistâncias suavizadas em L1 e L2, que são obtidas a partir da fase da onda portadora. Isso permite mitigar os efeitos de multicaminho, erros decorrentes do não sincronismo dos relógios do satélite e do receptor, bem como erros nas efemérides e na refração troposférica, que na prática podem ser desprezados.

Para atingir esse objetivo, existem vários métodos de suavização disponíveis, sendo que, inicialmente, foi empregado e obtidos em Carvalho e Aguiar (2022) o método conhecido como Filtro de Hatch (*Hatch filter*). A equação associada a esse filtro, conforme definida por Park et al. (2017), é a seguinte:

$$\begin{cases} \hat{p}(k) = \frac{k-1}{k} [\hat{p}(k-1) + \Delta\phi(k)] + \frac{1}{k} p(k), k \leq K \\ \hat{p}(k) = \frac{K-1}{K} [\hat{p}(k-1) + \Delta\phi(k)] + \frac{1}{K} p(k), k > K \end{cases} \quad (8)$$

Com,

$$\Delta\phi(k) \equiv \phi(k) - \phi(k-1), \quad (9)$$

Onde:

$\hat{p}(k)$ é o valor da pseudodistância suavizada da época atual;

$\hat{p}(k-1)$ é o valor da pseudodistância suavizada da época anterior;

$p(k)$ é o valor bruto da pseudodistância;

k é a época atual. O máximo de k é K ;



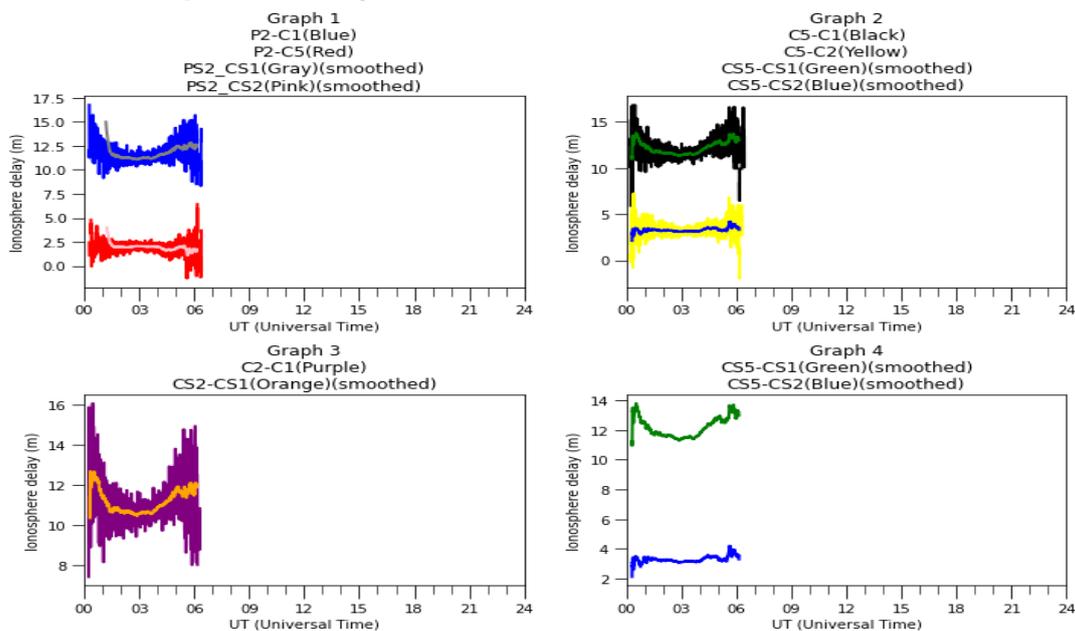
K é valor da janela de suavização;

$\Delta\phi(k)$ é a mudança de fase da portadora na janela de suavização.

RESULTADOS

Desta forma, pode-se trabalhar com medidas mais precisas, obtendo resultados muito mais confiáveis de um modo geral, como pode-se observar na figura 2.

Figura 2 - Relação Pseudodistâncias brutas e suavizadas



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Analisando a Figura 2, especialmente os gráficos 1, 2 e 3, nota-se uma grande diferença entre as pseudodistâncias não suavizadas (brutas) e as suavizadas (smoothed). As pseudodistâncias suavizadas são mais estáveis e possuem menos ruído. No entanto, no gráfico 4, há uma notável discrepância entre os valores de duas combinações distintas, embora ambas deveriam representar o mesmo trajeto entre a antena do receptor e o satélite (PRN 1 do GPS). Isso sugere que a disparidade nos resultados pode ser atribuída à falta da correção relacionada aos DCBs do receptor.

Em Carvalho e Aguiar (2022), as medidas brutas obtidas, não estavam devidamente tratadas para serem usadas de acordo com o propósito final, devido ao alto nível de ruído, como ilustrado na Figura 1. Nesse contexto, foi aplicado um filtro de suavização (eq. 5) para tornar as medidas mais precisas, conforme mostrado na Figura 2. Além disso, foi realizada a correção do DCB relacionado ao satélite, embora a correção do DCB do receptor ainda não tenha sido aplicada, como mencionado anteriormente.

CONCLUSÕES

Ao analisar e comparar os gráficos das diferentes combinações de observáveis, torna-se evidente a importância da aplicação da suavização e das projeções do atraso



ionosférico em uma frequência comum (L1). Isso assegura que os resultados sejam mais apropriados e contribuam de maneira mais eficaz para o desenvolvimento do trabalho.

Observa-se também que, no caso de observáveis pertencentes ao mesmo satélite e que percorrem o mesmo trajeto na ionosfera e troposfera, os gráficos deveriam se sobrepor. No entanto, isso não ocorre devido ao erro do DCB, que ainda será abordado. Apesar disso, os resultados estão alinhados com a teoria e os testes realizados em trabalhos conceituados.

Portanto, como próximos passos, planeja-se realizar as correções necessárias referentes ao DCB e desenvolver uma interface gráfica para o *software* em questão. É importante ressaltar que, até o momento desta transcrição, o trabalho ainda não atingiu seu objetivo final, o que significa que as conclusões finais permanecem pendentes.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná (FA) pelo auxílio financeiro, através do Programa Institucional De Bolsas De Iniciação Científica Nas Ações Afirmativas (PIBIC-Af), Edital UTFPR-PROPPG 02 – PIBIC/PIBIC-Af.

Disponibilidade de código

O código não está disponível para terceiros, pois ainda está em desenvolvimento.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, C. R. Grade Ionosférica para Aplicações em Posicionamento e Navegação com GNSS. 2010. 256 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, Presidente Prudente.

CARVALHO, D. M.; AGUIAR, C. R. Cálculo e Análise das Estimativas do TEC Utilizando os Sinais Modernizados do GNSS. Apresentado no XII Seminário de Extensão e Inovação & XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, 2022. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/seisicite2022/548823-calculo-e-analise-das-estimativas-do-tec-utilizando-os-sinais-modernizados-do-gnss>. Acesso em: 19 set. 2023.

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações. 2.ed. São Paulo: Editora UNESP, p. 476, 2008.

PARK B, LIM C, YUN Y, KIM E, KEE C. Optimal Divergence-Free Hatch Filter for GNSS Single-Frequency Measurement. *Sensors (Basel)*, [S. l.], v. 17, n. 3, p. 1-20, 24 fev. 2017. DOI 10.3390/s17030448. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5375734/?report=reader>. Acesso em: 25 out. 2022.