

# REDUZINDO O EFEITO DA CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA MEDIANTE O USO DAS CONSTELAÇÕES GPS E GLONASS

JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO  
ÍTALO TSUCHIYA

Universidade Estadual Paulista - Unesp  
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT  
Departamento de Cartografia, Presidente Prudente - SP  
{galera, italo}@fct.unesp.br

**RESUMO** - Este artigo apresenta os resultados da redução do efeito da cintilação ionosférica mediante o uso simultâneo de duas constelações GNSS: o GPS e o GLONASS. Os dados utilizados advêm de um experimento de posicionamento realizado em tempo real durante o desenvolvimento do projeto CALIBRA. Os resultados do experimento mostraram que o uso simultâneo das duas constelações proporciona uma condição muito apropriada para a redução dos efeitos adversos da cintilação ionosférica mediante a exclusão de dados de satélites nos períodos mais afetados. Os resultados mostraram a importância do uso das duas constelações, haja vista que a solução somente com GPS em casos com dois satélites afetados não mostraram bons resultados. Investigações adicionais deverão ser realizadas em outros períodos utilizando a base de dados dos projetos CIGALA e CALIBRA.

**Palavras chave:** GNSS, Cintilação Ionosférica, RTK, S4, Rede CALIBRA.

**ABSTRACT**-. This paper presents the results coming from the reduction of the ionospheric scintillation via the simultaneous use of the constellation GNSS: GPS and GLONASS. The used data are from a real time positioning experiment carried out during the realization of the CALIBRA project. The results from the experiments showed that the use of these two constellations provided an appropriated condition for the reduction of the adverse effects of the ionospheric scintillation considering the exclusions of data of the satellites most affected from such effect. The results showed the importance of the use of both constellations since the use only of GPS satellites in cases when two satellites have to be excluded did not show good results. However, with GLONASS satellites present in the processing, the results are quite better. Additional investigations have to be carried out for other periods with scintillation occurrence using the base data from CIGALA and CALIBRA project.

**Key words:** GNSS, Ionospheric Scintillation, RTK, S4, CALIBRA network.

## 1 INTRODUÇÃO

O GNSS (*Global Navigation Satellite System*) vem proporcionando um impacto significativo no suporte às operações onde alta acurácia é requerida, como em agricultura de precisão, onde aplicações meticulosas de pesticidas e fertilizantes traduzem em eficiência e ganho em produtividade. Outros exemplos são levantamentos topográficos e geodésicos, gerenciamento de terra e operações *off-shore*. Métodos de posicionamento como RTK (*Real Time Kinematic*), WARTK (*Wide Area RTK*) e PPP (*Precise Point Positioning*), que exploram a precisão dos sinais GNSS, em especial a fase da onda portadora, são os principais métodos destas aplicações e são especialmente sensíveis as perturbações e distúrbios da ionosfera, as quais são dependentes de diversas

variáveis: ciclo solar, época do ano, hora local, localização geográfica e atividade geomagnética (Monico, 2008; Camargo, Monico & Ferreira, 2000).

O Brasil está localizado numa das regiões mais afetadas da Terra e pode ser considerado como um local excelente para realizar testes, pois materializa um dos piores cenários. Problemas relacionados com a solução das ambiguidades, crucial nos métodos de alta acurácia, tem se manifestado mesmo antes de se atingir o ápice do ciclo solar 24 (2013–2014), impedindo-se a obtenção dos níveis de acurácia esperados pela indústria. O impacto das altas atividades solares proporciona certos riscos, como a indisponibilidade do serviço de posicionamento GNSS e a ausência de confiabilidade para aplicações de alta acurácia.

O projeto CALIBRA (*Countering GNSS high Accuracy applications Limitations due to Ionospheric disturbances in BRAzil*), finalizado em 2015, teve como objetivo principal mitigar os efeitos da ionosfera no posicionamento GNSS de alta acurácia para a região brasileira, dando enfoque à cintilação ionosférica e aos efeitos provocados pelo ciclo solar 24. A Figura 1 ilustra distribuição das estações monitoras de cintilação ionosférica estabelecida no Brasil em função do projeto CALIBRA, seu predecessor CIGALA (*Concept for Ionospheric-Scintillation Mitigation for Professional GNSS in Latin America*) e do projeto Temático FAPESP GNSS-SP (Vani, Shimabukuro and Monico, 2016).

Cintilação ionosférica advém de uma rápida variação na densidade de elétrons no meio ionosférico, o que causa uma variação na fase e na amplitude de ondas eletromagnéticas. Como consequência há uma degradação do sinal, podendo levar a ocorrência de perdas de ciclos no GNSS (CONKER et al., 2002). Essas ocorrências podem ser identificadas por alguns parâmetros advindos de medidas realizadas com o GNSS, em especial com alta taxa de coleta de dados (50 Hz, por exemplo). Dentre os principais parâmetros destacam-se o S4 e Sigma Phi, que caracterizam a cintilação em amplitude e fase. Valores de S4 acima de 0,8 são considerados como representativos de períodos com ocorrência de forte cintilação (Tiwari et al. 2011). O parâmetro S4 será utilizado neste trabalho para identificar os períodos de ocorrência de cintilação ionosférica, em especial os considerados fortes.

A mitigação do efeito da cintilação ionosférica tem sido investigada por vários autores, mas restrita ao uso da constelação GPS (Aquino et al., (2009); Elmas (2013) and Park et. al, (2017)).

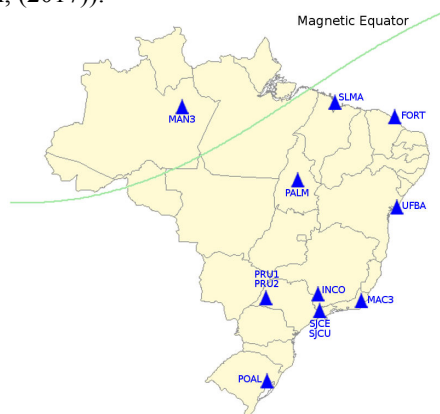


Figura 1 – Rede CIGALA-CALIBRA

### 1.1 Objetivos

Neste trabalho objetiva-se analisar os efeitos da mitigação da cintilação ionosférica mediante o uso de dados coletados pelas constelações GPS e GLONASS.

### 1.2 Organizações do trabalho

O trabalho está organizado da seguinte forma. Após a apresentação da introdução, descreve-se o experimento realizado dentro do contexto do projeto

CALIBRA e a utilização da ferramenta ISMR Query Tool para identificação dos parâmetros de cintilação ionosférica. Na sequência apresentam-se os resultados e análises dos processamentos considerando ou não a presença de satélites com ocorrência de cintilação. O trabalho se encerra com comentários finais e as conclusões seguidas da apresentação de investigações adicionais para obtenção de resultados mais conclusivos.

## 2 EXPERIMENTOS REALIZADOS

Na etapa final do projeto CALIBRA foram realizados vários experimentos de posicionamento, dentre eles um com dados coletados em tempo real. A estação base, um receptor capaz de realizar monitoramento da cintilação ionosférica (PolarXs: GNSS L1 e L2 da Septentrio), foi instalada na região do experimento, o qual transmitia, além das mensagens usuais do RTK, informações a respeito da cintilação ionosférica, em especial o parâmetro S4, o qual é disponível a cada 1 minuto. O receptor móvel Altus APS3 GNSS L1 & L2, rastreava as constelações GPS e GLONASS e recebia as mensagens RCTM (*Radio Technical Commission for Maritime Services*) da estação base. Acrescida a essas mensagens acompanhava uma informação adicional referente à cintilação ionosférica. A distância entre eles não excedia 400m. O experimento escolhido para apresentação neste artigo foi iniciado no dia 26 de Janeiro às 22h 42min 56seg e finalizado no dia 27 de Janeiro de 2015 às 03h 31min 03seg (tempo GPS). A Figura 2 ilustra as configurações utilizadas.



Figura 2 – Configuração do Experimento mostrando as estações Base e Rover.

Os dados utilizados em tempo real também foram armazenados para posterior realização de pós-processamento dos mesmos.

## 3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a realização da análise, inicialmente foram obtidos os arquivos que proporcionam indicadores da cintilação ionosférica, utilizando a ferramenta ISMR Query tool. Na Figura 3 mostram-se os parâmetros S4 (corrigido) para a estação PRU2 (localizada nas imediações do experimento, com distância aproximada de 300 m) para as constelações GPS e GLONASS,

separadamente. Apenas observações coletadas acima de 30 graus de elevação foram consideradas como indicador de cintilação ionosférica, evitando assim o efeito de multicaminho proveniente de obstruções como árvores e edificações adjacentes a essa estação.

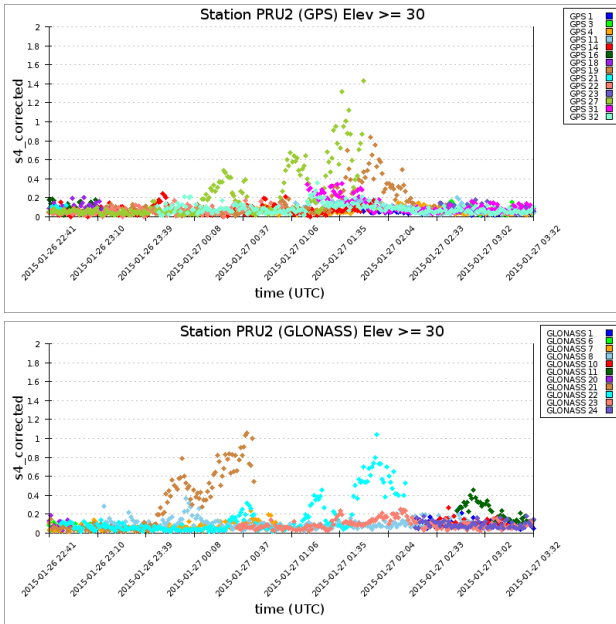


Figura 3 – Parâmetros S4 para as constelações GPS e GLONASS

Da análise da Figura 3, numa visão macro, pode-se observar que ocorreu cintilação ionosférica no período do experimento, uma vez que se pode observar valores de S4 maiores que 0,4 para ambas as constelações. A Figura 4 mostra os satélites que tiveram cintilação com índice S4 maior que 0,4. No caso do GPS os PRNs G19 e G27 foram os afetados, sendo mais predominante no satélite G27. No caso do GLONASS, observa-se ocorrência em três satélites, mas com especiais ocorrências nos satélites R21 e R22.

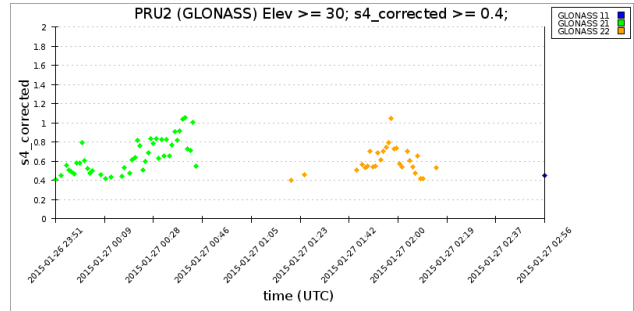
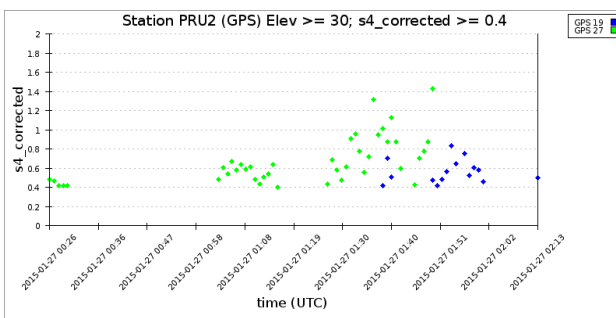


Figura 4 – Parâmetro S4 (corrigido) maior que 0,4 constelações GPS e GLONASS

A precisão da solução obtida em tempo real (RTK) é mostrada na Figura 5. Observa-se período sem solução (*stand alone*) com precisão de alguns metros, solução com ambiguidades real (*float*) com precisão sub métrica e solução com ambiguidades solucionadas (*fix*) com precisão centimétrica, para as três componentes (N, E e U).



Figura 5 – Precisão das componentes N, E e U para a solução em tempo real (RTK).

Pode-se notar que o período sem solução (*stand alone*) ocorre por volta das 23h 26min aproximadamente, quando iniciou o processo de cintilação nos satélites GPS e GLONASS. Mas numa análise mais detalhada pode-se constatar que se trata de um período em que ocorreram falhas na transmissão das correções, sem relação alguma com a ocorrência de cintilação.

Numa etapa posterior, o processamento foi realizado no modo pós-processado, com os dados que foram armazenados durante a operação em campo. Utilizou-se o programa computacional PPSDK (*Pós-processing Software Development Kit*), que permite realizar o processamento dos dados coletados. A Figura 6 mostra a precisão obtida para esse caso.

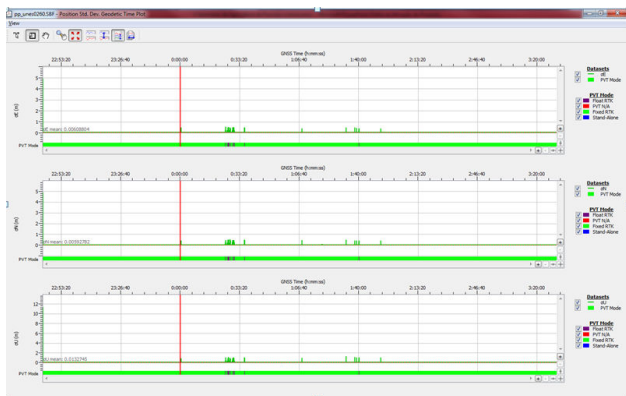


Figura 6 – Precisão das componentes N, E e U para a solução no modo pós-processado.

Analisando as Figuras 5 e 6 pode-se observar uma considerável melhoria na qualidade das soluções. O período que estava sem solução devido à falha na transmissão das correções foi solucionado e ocorreu uma melhoria geral na qualidade nos demais períodos. Enquanto no modo RTK ocorreram 705 soluções *float*, no modo pós-processado elas foram reduzidas para 196. A Tabela 1 mostra o número de instantes sem solução, com solução *Stand Alone* (posicionamento por ponto simples), com ambiguidade real (*float*) e com ambiguidade fixa (*fix*), bem como o número total de soluções, considerando a solução RTK e a pós-processada.

Tabela 1 – Indicadores de qualidade advinda da solução RTK e do pós-processamento (GPS e GLONASS)

Solução	Sem solução	Stand Alone	Float	Fixed	Total de soluções
RTK	0	757	705	15826	17288
Pós Processado	1	1	196	17090	17288

Os resultados sem solução das ambiguidades (*float*) ocorreram por volta das 00h27min, 01h06min e 01h40min. Observando a Figura 4 pode-se constatar que foram instantes próximos a ocorrência de cintilação ionosférica no satélite G27, além do G19 para as 01h40min. O satélites R21 e R22 apresentam cintilação próximos aos instantes 00h27min e 01h40min respectivamente.

Numa etapa posterior realizou-se novamente o pós-processamento, mas agora com a eliminação de alguns dos dados dos satélites do processamento, em especial aqueles com índice S4 maior que 0,7, caso que pode ser considerado de alto nível de cintilação e fora de um padrão normal. A Figura 7 mostra os satélites afetados por tal situação. São os satélites G27, G19, R21 e R22.

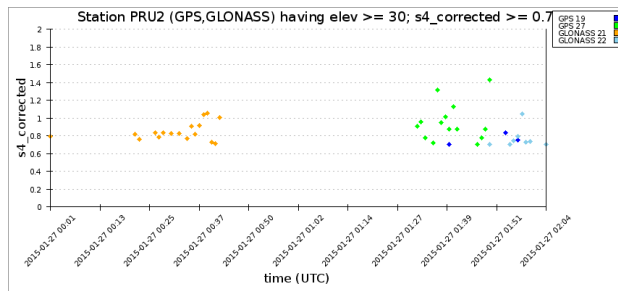


Figura 7 – Parâmetro S4 maior que 0,7 para as constelações GPS e GLONASS simultaneamente.

Na sequência foi realizado no modo pós-processado o processamento dos dados GPS e GLONASS sem a inserção dos dados de alguns dos satélites GPS e GLONASS mais afetados. Especial atenção foi dada para os casos em que ocorreu cintilação em dois satélites simultaneamente. A Figura 8 mostra num gráfico tipo *skyplot* a localização dos satélites para um determinado instante (23:30 UTC), destacando os satélites com maior nível de cintilação, tais como o G19 e G27 e R22.

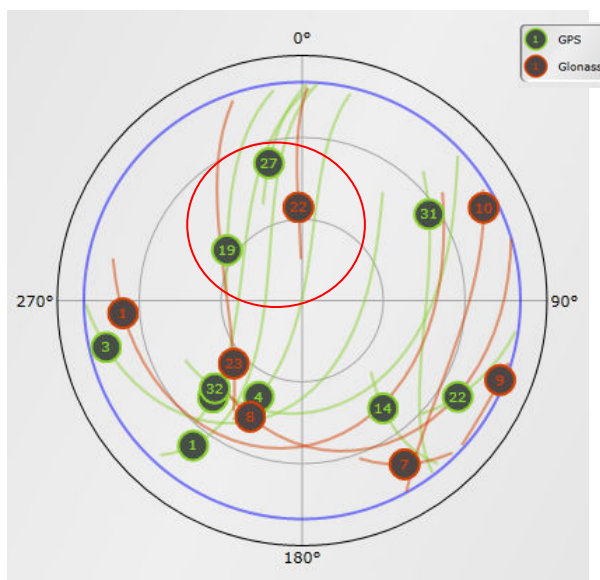


Figura 8 – Skyplot mostrando a localização dos satélites no instante 23:30 UTC.

Nota-se neste horário que os satélites mais afetados pela cintilação (G19 e 27 e R22), estão localizados aproximadamente numa mesma região do espaço, onde provavelmente há o deslocamento de uma bolha de plasma, algo que será investigado em conjunto com outros experimentos.

Tal como na Tabela 1, a Tabela 2 mostra os indicadores de qualidade considerando a eliminação dos dados de um e de dois satélites simultaneamente.



Tabela 2 – Indicadores de qualidade advinda do pós-processamento (GPS e GLONASS) com eliminação de pares de satélites afetados pela cintilação ionosférica.

Satélites excluídos	Sem solução	Stand Alone	Float	Fixed	Total de soluções
G27 e G19	1	1	7	17279	17288
G27 e R21	1	1	11	17275	17288
G27 e R22	1	1	18	17268	17288
G19 e R21	1	1	227	17059	17288
R21 e R22	1	1	287	16999	17288
G19 e R22	1	1	335	16951	17288
G27	1	1	8	17278	17288

Fica evidente a importância do satélite G27, muito embora ele tenha alto nível de cintilação, desempenha papel importante também na geometria envolvida, tal como evidenciado na Figura 7. Os resultados advindos da exclusão dos dados desse satélite comprova tal afirmativa.

A melhor solução foi àquela obtida com a exclusão dos satélites G27 e G19. Mas para processamento utilizando apenas a constelação GPS, para tal situação os resultados não seriam satisfatórios. Neste caso, ocorreriam 667 casos sem solução, 06 com posicionamento por ponto simples, 398 com ambiguidades reais (*float*) e apenas 16184 solucionadas como fixas, contra 17279 para o melhor caso, uma diferença de quase 1000 soluções. A utilização somente da constelação GLONASS também não proporcionaria bons resultados, os quais seriam de pior qualidade que os do GPS. Esses resultados mostram a importância da utilização da constelação GLONASS em conjunto com o GPS para situações que ocorrem cintilação ionosférica, tal como a situação no Brasil.

#### 4 CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado um experimento realizado sobre efeito de cintilação ionosférica considerando as constelações GLONASS e GPS. Foram utilizados dados advindos do projeto CALIBRA com suporte da ferramenta ISMR Query Tool.

Os resultados mostraram que ocorreram períodos com parâmetro S4 maior que 0,7 para até dois satélites, indicando alto índice de cintilação. O processamento de dados foi realizado utilizando o software PPSDK da Septentrio, além da utilização dos resultados advindos do RTK.

A melhor solução foi àquela obtida com a exclusão dos satélites G27 e G19. Mas para processamento utilizando apenas GPS, os resultados não foram satisfatórios. Isto mostra a importância da utilização da constelação GLONASS em conjunto com GPS nas situações em a cintilação ionosférica é passível de ocorrência, tal como a situação no Brasil.

Estudos de casos adicionais deverão ser realizados utilizando a base de dados dos projetos CIGALA e

CALIBRA visando apresentar uma conclusão mais robusta a partir de dados reais.

#### AGRADECIMENTOS

As estações de monitoramento da ionosfera foram implantadas no contexto dos Projetos CIGALA e CALIBRA, ambos financiados pela European Commission (EC) no framework do FP7-GALILEO-2009-GSA e FP7-GALILEO-2011-GSA-1a, respectivamente, além de suporte da FAPESP (Processo 06/04008-2).

#### REFERÊNCIAS

AQUINO, M., MONICO, J. F. G., DODSON, A. H., MARQUES, H., FRANCESCHI, G., ALFONSI, L., ROMANO, V., AND ANDREOTTI, M., “Improving the GNSS Positioning Stochastic Model in the Presence of Ionospheric Scintillation,” *Journal of Geodesy*, Vol. 83, No. 10, 2009, pp. 953–966.

CONKER, R. S.; EL-ARINI, B.; HEGARTY, C. J.; HSIAO, T. Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS/Satellite-Based augmentation system availability. *Radio Science*. vol. 37, 2002.

ELMAS, Z. G., **Exploiting New GNSS Signals to Monitor, Model and Mitigate the Ionospheric Effects in GNSS**, PhD dissertation, Nottingham Geospatial Institute, The University of Nottingham, Nottingham, UK, 2013

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**. Editora UNESP, 2008.

PARK J., SREEJA, V., AQUINO, M., YANG, L. Mitigation of Ionospheric Effects on GNSS Positioning at Low Latitudes Navigation - *Journal of The Institute of Navigation*. May 2017

TIWARI R, SKONE S, TIWARI S, STRANGWAYS HJ (2011) **WMod Assisted PLL GPS Software Receiver for Mitigating Scintillation Affect in High Latitude Region**. In: General Assembly and Scientific Symposium, XXXth URSI, pp 1-4.

VANI, B. C; SHIMABUKURO, M. H.; MONICO, J. F. G.. Visual exploration and analysis of ionospheric scintillation monitoring data: The ISMR Query Tool. *Computers & Geosciences* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2016.08.022>