MODELAGEM PARA PREVISÃO DE PERDAS DE SINCRONISMO ASSOCIADAS À CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA PARA OS SINAIS GPS

CLODOALDO DE S. F. JÚNIOR[1], BRUNO C. VANI[2], ALEXANDRE A. CARNIATO[3]
CLAUDINEI R. AGUIAR[4], JOÃO F. G. MONICO[5]

[1] Graduando em Bacharelado em Engenharia Elétrica, IFSP, Câmpus Presidente Epitácio, clodoaldo.souza@aluno.ifsp.edu.br.
[2] Docente, IFSP, Câmpus Presidente Epitácio, brunovani@ifsp.edu.br
[3] Docente, IFSP, Câmpus Presidente Epitácio, carniato@ifsp.edu.br.
[4] Docente, UTFPR, Campus Apucarana, rodriguesaguiar@utfpr.edu.br
[5] Docente, UNESP, Campus Presidente Prudente, galera.monico@unesp.br
Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.06.03-0 Sistemas de Telecomunicações

RESUMO: O GNSS é uma tecnologia de posicionamento importante no século XXI, pois permite a obtenção da posição de qualquer objeto na Terra ou próximo desta. Entretanto, os sinais GNSS, quando se propagam pela atmosfera terrestre, estão propensos a diversos efeitos. Entre estes, se destacam os causados pela ionosfera (camada compreendida entre 50 km a 1000 km de altitude em relação a superfície terrestre). O presente estudo objetiva propor modelos baseados em árvores de decisão empregados juntamente com a transformada discreta de *Karhunen-Loève* (KLT) com a finalidade de prever perdas de sincronismo que podem ocorrer em consequência da cintilação ionosférica. Ressalta-se que a cintilação é caracterizada por uma mudança abrupta na fase e/ou amplitude do sinal quando este se propaga pela ionosfera terrestre. Foram desenvolvidos dois modelos, um baseado em árvores de decisão e outro, empregando juntamente árvore de decisão e KLT. Os modelos propostos se mostraram acurados e com baixo custo computacional. Para validação acerca de desempenho e acurácia, os modelos foram testados com dados diferentes daqueles utilizados para projetá-los. Os resultados mostraram acurácia de 99.90% e foram considerados muito promissores.

PALAVRAS-CHAVE: cintilação ionosférica; modelos preditivos; árvores de decisão; GNSS; GPS;

Modeling for predicting loss of synchronization associated with Ionospheric Scintillation for GPS signal

ABSTRACT: GNSS is an important positioning technology in the 21st century because it allows to obtain the position of any object on or close to the Earth's. surface However, GNSS signals, when propagated through the Earth's atmosphere, are susceptible to various effects. Among these are those caused by the ionosphere (layer between 50 km and 1000 km above the Earth's surface). The present study aims to propose models based on decision trees employed together with the discrete transformation of Karhunen-Loève (KLT) in order to predict losses of lock that can occur as a result of ionospheric scintillation. It is worth mentioning that scintillation is characterized by abrupt changes in the phase and/or amplitude of the signal when it spreads through the Earth's ionosphere. Two models were developed, the first based on decision trees and the second using KLT and decision trees concomitantly. The proposed models were accurate and presented low computational cost involved in their use. For validation of performance and accuracy, the models were tested by applying different data (when compared with data applied to design the models). The results showed accuracy of 99.90% and were considered very promising.

KEYWORDS: ionospheric scintillation; predictive models; decision trees; GNSS; GPS;

INTRODUÇÃO

Quando sinais GNSS (*Global Navigation Satellite System* ou Sistema Global de Navegação por Satélite) - por exemplo, sinais GPS - se propagam pela atmosfera terrestre podem sofrer diversos

efeitos. Os diferentes efeitos impõem limitações na aplicação desta tecnologia, principalmente em aplicações onde é necessária alta confiabilidade (VANI, 2018; VANI et al., 2019).

A cintilação ionosférica é um dos principais efeitos e impõe limitações ao sistema GNSS em determinadas regiões, sendo que esta é caracterizada por variações rápidas na amplitude e/ou fase do sinal, ocorrendo quando o sinal refrata por ela devido a variação de elétrons livres e, consequentemente, na formação de campo magnético nos pontos por onde se propagam (CONKER et al., 2003; SOUZA; ALVES; VANI, 2015).

O campo magnético é alterado durante a passagem do sinal, podendo ocorrer perdas de ciclo, perdas de sincronismo – sendo que este problema é o objeto de estudo do presente trabalho – e até mesmo perdas de serviço de posicionamento (em casos extremos em que não há o número mínimo de satélites para se determinar a posição). O Brasil é um dos países mais afetados pelas irregularidades e cintilações ionosféricas, principalmente em períodos de máximo solar que ocorrem entre setembro até abril. Este aspecto se deve ao fato de que a maior concentração de elétrons livres na ionosfera, principalmente no início da tarde, é observada na faixa de 20º ao Sul e 20º ao Norte do equador magnético (MENDONÇA, 2013; MOURA, 2012).

O presente trabalho tem como principal contribuição apresentar a metodologia para o desenvolvimento de modelos capazes de prever as perdas de sincronismo associadas a cintilação ionosférica nos sinais GNSS, com ênfase no sinal GPS na frequência L1. Os modelos foram baseados na utilização da KLT (ROSSI, 2017) e Árvores de Decisão.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização da aquisição dos dados utilizou-se a plataforma *ISMR Query Tool* (disponível em <http://ismrquerytool.fct.unesp.br/is/>) (VANI et al., 2017). Foram realizados *downloads* de dados da estação SJCU (São José dos Campos/SP) e POAL (Porto Alegre/RS). Os dados da estação SJCU foram utilizados para a construção do modelo. Posteriormente o modelo foi testado com dados diferentes daqueles utilizados na sua construção, tanto para a estação SJCU, como para a estação POAL. Com isto, obteve-se uma visão geral acerca da capacidade de generalização do modelo. Seguindo recomendações de Mendonça (2013), deve-se utilizar máscaras de elevação superiores a 22º e 26º para as estações SJCU e POAL, respectivamente, deste modo, a utilização de dados se torna otimizada, possibilitando maior abrangência das estações de rastreio, sem que haja interferência de outras fontes, senão, atmosféricas.

Também foram realizados testes construindo o modelo a partir dos conjuntos de treinamento normais e com a utilização da KLT, observando assim a melhoria do modelo em relação ao custo computacional, justificando-se a utilização da KLT.

As variáveis de entrada foram calculadas em intervalos de dez segundos, dividindo-se os conjuntos de dados em dois *clusters* (categorias): os conjuntos que precedem uma perda de sincronismo e os que não precedem uma perda de sincronismo, resultando-se em saídas esperadas de valor 1 e 0, respectivamente.

Estes momentos que precedem uma perda de sincronismo podem ser identificados a partir da dupla diferença do atributo TOW (*Time of Week*). Quando a diferença obtida é superior a 0,02 segundos, significa que houve uma perda de sincronismo. Isto se justifica pelo fato de que os dados utilizados possuem uma frequência de amostragem de 50 Hz.

Foram calculadas quatorze variáveis a partir dos dados brutos (50 Hz), as quais foram utilizadas posteriormente para a construção dos modelos: desvio padrão da fase filtrada pelo filtro IIR (*Infinite Impulse Response*, ou em português, resposta ao impulso de duração infinita) *Butterworth* de 6ª ordem do tipo passa-alta com uma frequência de rejeição de 0,1Hz (com este filtro é possível remover o efeito da geometria orbital do satélite e o erro do relógio do receptor); Índice S4, que quantifica a variação da intensidade média do sinal; Índice Sigma-phi, o qual quantifica a variação da fase; Índice SI, que quantifica a variação da intensidade, entretanto, diferentemente do S4, este utiliza somente valores de máximos e mínimos; Desvio padrão da dupla diferença entre o ângulo formado entre as componentes da quadratura do sinal, os componentes *in-phase* (*I*) e *quadrature-phase* (*Q*); Erro quadrático médio do resíduo da fase, calculado a partir da diferença entre o funcionamento ideal da fase (estimado a partir de um polinômio interpolador de grau três) e os valores reais (obtidos nos dados brutos com taxa de amostragem de 50Hz, obtidos na plataforma *ISMR Query Tool*); Quantidade de vezes que a intensidade variou abaixo de -6dB, -9dB, -12dB e -15dB; Média dos dez maiores valores absolutos da fase filtrada; O valor do desvanecimento (*fading*) mais profundo; Os parâmetros α e μ da distribuição estatística da

intensidade do sinal α-μ (MORAES et al., 2014); E por último, a flutuação pico-a-pico, sendo que esta é uma relação empírica proposta por Ippolito (2008) e Mendonça (2013), estimada a partir da variação da amplitude e o índice S4.

Foram utilizadas duas abordagens distintas para a construção do modelo baseado em Árvore de Decisão e ambas utilizaram dados do ano de 2013.

A primeira abordagem utiliza a KLT, transformando as *N* variáveis ortogonais em novas *N* variáveis. Neste caso, as primeiras *K* variáveis contabilizam a maior parte da variação dos dados originais, sendo que *K* é muito menor que *N*, tornando-se possível desprezar *N-K* dimensões, promovendo assim uma redução de dimensionalidade. Entretanto, deve-se precaver para que se utilize o número correto de dimensões, pois se forem utilizadas menos dimensões do que o necessário, tem-se um cenário de informações perdidas. Por outro lado, caso se utilize mais dimensões do que o necessário, ocorre uma injeção de ruídos, podendo levar a uma interpretação errônea dos dados. Utilizou-se o método do gráfico *Scree* (nome que recebe o histograma que analisa a relação entre explicação da variação dos dados e o número de dimensões), o qual permite identificar um ponto de inflexão na curva que liga os autovalores em um gráfico de escala normal ou logística, considerando o primeiro ponto após a sua primeira inflexão como o número adequado de dimensões a serem retiradas da análise.

A segunda abordagem, consiste na construção de um modelo baseado em árvores de decisão, no entanto, sem o emprego da KLT, possuindo como finalidade, analisar se o uso desta técnica se justifica ou não.

Para a avaliação dos modelos resultantes, foram utilizadas inúmeras métricas, tais como Verdadeiro Positivo, Falso Positivo, Falso Negativo, Verdadeiro Negativo, Acurácia, Precisão, *Recall*, Pontuação F1 e *Missclassification*, comparando também a complexidade do modelo obtido.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao utilizar a KLT, obteve-se o gráfico *Scree* apresentado na Figura 1 para os dados de treinamento do modelo. Para a estação SJCU, utilizando 6 dimensões, é obtido 97.97% da variação dos dados originais, enquanto com a utilização de 7 dimensões tem-se apenas um aumento de 1% na explicação da variação dos dados originais. Por conta disto, foi adotada a utilização de 6 dimensões, com a finalidade de otimizar o custo computacional.

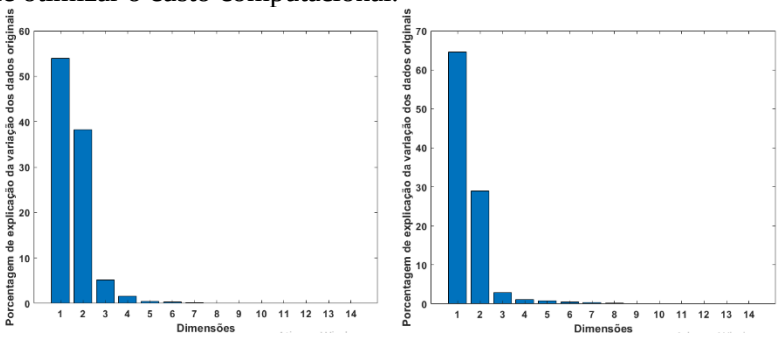

FIGURA 1. Gráfico *Scree* para dados da estação SJCU e POAL, respectivamente.

Outro ponto importante é que quando a KLT é utilizada para dados da estação POAL, com 6 dimensões, obtém-se 99.21% da variação dos dados originais. Neste caso, para obter um valor aproximado daquele obtido para os dados da estação SJCU, seriam necessárias apenas três dimensões, já que seriam capazes de explicar 97.63% da variação dos dados originais.

Ressalta-se que a estação POAL sofre menos cintilações do que a estação SJCU, o que acaba refletindo nos dados, com isto, recomenda-se investigações adicionais, uso de modelos regionais, ou até mesmo, treinamento específico de um modelo para uma determinada estação.

O modelo obtido baseado em Árvore de Decisão sem o emprego da KLT é apresentado na Figura 2. Suas métricas são apresentadas na Tabela 1, e a Matriz de Confusão obtida é apresentada na Figura 3a e 3b. Ressalta-se que as métricas e a matriz de confusão são apresentadas considerando dados da estação SJCU diferentes daqueles utilizados para treinamento do modelo, bem como dados da estação POAL. Desta forma, foram realizados testes acerca da assertividade e verificação da generalização do modelo construído com dados independentes.

O modelo construído utilizando a KLT obteve as matrizes de confusão da Figura 3c e 3d, desta forma, não se justifica a utilização desta técnica, pois o modelo resultante se torna extremamente complexo em relação ao obtido sem o emprego desta técnica de redução de dimensionalidade.

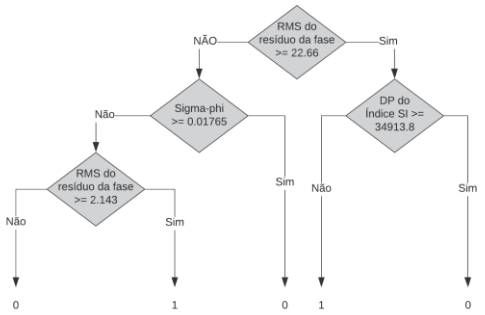

FIGURA 2. Modelo obtido para classificação de momentos que precedem uma perda de sincronismo.

TABELA 1. Métricas de avaliação do modelo baseado em Árvore de Decisão sem o emprego da KLT para dados da estação SJCU diferentes dos utilizados para o treinamento do modelo e dados da estação POAL.

Métricas	Valor (%) para SJCU	Valor (%) para POAL
Missclassification	0.0009	0.0013
Acurácia	0.9990	0.9987
Precisão	0.9997	0.9989
Recall	0.9993	0.9998
Pontuação F1	0.9995	0.9993

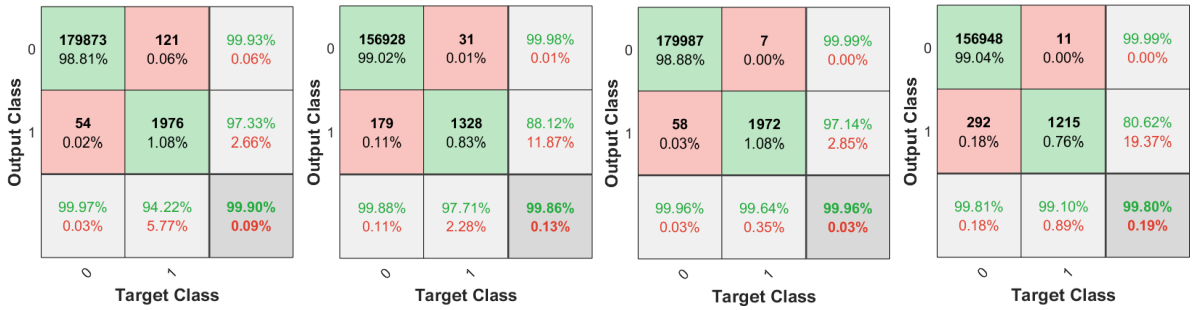

FIGURA 3. Matriz de confusão resultantes dos modelos, (a) para o teste do modelo utilizando dados diferentes dos utilizados para treinamento do modelo das estação SJCU, (b) teste realizado com dados da estação POAL, (c) teste realizado para a estação SJCU utilizando KLT, (d) teste realizado para a estação POAL utilizando a KLT.

Para a previsão de momentos que precedem uma perda de sincronismo baseado nas características do sinal GNSS pode-se usar qualquer um dos dois modelos apresentados, entretanto, ressalta-se que o sem KLT, é menos custoso computacionalmente e menos complexo para interpretação.

CONCLUSÕES

Por meio do presente estudo, foi possível a validação e a verificação da importância de determinadas variáveis em momentos que precedem (ou não) uma perda de sincronismo, além de destacar variáveis e índices que não são comumente utilizados na literatura em pesquisas relacionadas ao desempenho de receptores GNSS associado à incidência de cintilações.

Observou-se também que com a utilização da transformada discreta de *Karhunen-Loève*, foi possível desenvolver modelos com um número menor de dimensões. Entretanto, esta técnica deve ser utilizada com cautela, pois quando a mesma foi empregada na construção do modelo baseado em árvore de decisão, o modelo resultante obteve um ganho de 1% na acurácia para dados da estação SJCU e uma perda de acurácia para dados da estação POAL. Neste caso, mesmo que se utilize menos dimensões do que as quatorze dimensões propostas inicialmente, o modelo resultante é mais complexo do que o obtido sem a utilização desta técnica, concluindo assim, a desnecessidade de utilização da técnica de redução de dimensionalidade de dados no presente estudo.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Alexandre Ataíde Carniato e Bruno César Vani, por terem sido meus orientadores e terem desempenhado tal função com dedicação e amizade.

Ao projeto *Ionosphere Studies* (Project Agreement 2019-GT-141), que também envolve a UNESP Campus de Presidente Prudente e a BOEING RESEARCH & TECHNOLOGY – BRAZIL, com interveniência da Fundunesp. Agradecimentos ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Tecnologia GNSS no Suporte à Navegação Aérea (INCT GNSS-NavAer), financiado pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – processo 465648/2014-2), FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – processo 2017/50115-0) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – processo nº 88887.137186/2017-00).

REFERÊNCIAS

CONKER, R. S.; EL-ARINI, M. B.; HEGARTY, C. J.; HSIAO, T. **Modeling the effects of ionospheric scintillation on GPS/satellite-based augmentation system availability**. *RADIO SCIENCE*, v. 38, 2003. https://doi.org/10.1029/2000RS002604 .

IPPOLITO, L.J., **Satellite Communications Systems Engineering:** Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance, John Wiley & Sons, 2008.

MENDONÇA, Marco Aurelio Moraes. **Investigação da cintilação ionosférica no Brasil e seus efeitos no posicionamento por GNSS**. 2013. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 2013.

MORAES, Alison de Oliveira; PAULA, Eurico Rodrigues de; MUELLA, Marcio Tadeu de Assis Honorato; PERRELLA, Waldecir João. On the second order statistics for GPS ionospheric scintillation modeling. **Radio Science**, [S.L.], v. 49, n. 2, p. 94-105, fev. 2014. American Geophysical Union (AGU). http://dx.doi.org/10.1002/2013rs005270.

MOURA, L. C. M. ; Oliveira, Kelias . **Os efeitos da cintilação ionosférica na propagação de ondas eletromagnéticas aplicados nos sistemas GPS.**. In: MOMAG-2012: CBMag-Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo e SBMo-Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, 2012, João Pessoa - PB. Propagação de ondas eletromagnéticas e espalhamento. João Pessoa - PB, 2012. v. 1. p. 1-33.

PEREIRA, Vinícius Amadeu Stuani. **Monitoramento das irregularidades ionosféricas e cintilação dos sinais GNSS**: em tempo real e pós-processado. 2015. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 2015.

ROSSI, Rafael Germano. **Análise de componentes principais em data warehouses.** 2017. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. doi:10.11606/D.45.2018.tde-07012018-182730. Acesso em: 2020-09-21.

SOUZA, J. S.; ALVES, D. B. M.; VANI, B. C. Estudo do comportamento da cintilação ionosférica em diferentes regiões brasileiras e seu impacto no posicionamento GNSS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n. 1, 28 fev. 2015.

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**, v. 104, p. 125-134, 2017.

VANI, Bruno César. **Investigações sobre modelagem, mitigação e predição de cintilação ionosférica na região brasileira**. Orientador: João Francisco Galera Monico. 2018. 182 p. Dissertação (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 2018.

VANI, Bruno César; FORTE, Biagio; MONICO, Joao Francisco Galera; SKONE, Susan; SHIMABUKURO, Milton Hirokazu; MORAES, Alison de Oliveira; PORTELLA, Igor Ponte; MARQUES, Haroldo Antonio. A Novel Approach to Improve GNSS Precise Point Positioning During Strong Ionospheric Scintillation: theory and demonstration. **Ieee Transactions On Vehicular Technology**, [S.L.], v. 68, n. 5, p. 4391-4403, maio 2019. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). http://dx.doi.org/10.1109/tvt.2019.2903988.