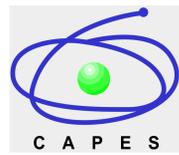


Astrometria de Urano e de seus satélites principais: duas décadas de observações no OPD/LNA



Magalhães, F.P.^{1,4}, Camargo, J.I.B.¹, Vieira-Martins, R.¹, Assafin, M.², Braga-Ribas, F.¹, da Silva Neto, D.N.³, Andrei, A.H.¹, Oliveira, A.D.²
(¹Observatório Nacional/MCT – ²Observatório do Valongo/UFRJ – ³Univ. Estadual da Zona Oeste/RJ – ⁴INPE/MCTI)

Introdução

Efemérides planetárias modernas do JPL (DE's) estão alinhadas com o referencial celeste extragaláctico da UAI (ICRF [1] – *International Celestial Reference Frame*) o qual, atualmente, encontra-se em sua segunda versão (ICRF2). Técnicas de radar, de medidas de distância laser-Lua, e de VLBI sobre sondas próximas a planetas, permitem que os quatro planetas internos, o Sol, e a Lua, estejam alinhados ao referencial extragaláctico com incertezas próximas a 1 milésimo de segundo de grau (*mas*) para a DE405 [2]. O conhecimento das órbitas dos planetas externos, por outro lado, não se encontra no mesmo patamar. A DE421 é a efeméride planetária mais atual e representa a melhor estimativa atual das órbitas da Lua e dos planetas. Nela, as órbitas de Júpiter e Saturno são anunciadas com precisões de dezenas de quilômetros [3]. No entanto, as órbitas de Urano, Netuno [4], e Plutão ainda não são bem determinadas [3]. Plutão, por exemplo, apresenta um erro confirmado de 100 *mas* em declinação nos dias atuais [5]. Através de cerca de 20 anos de observações do Sistema Solar, realizadas no OPD/LNA, este projeto (mestrado concluído no ON/MCTI por F.P. Magalhães) tem como objetivo oferecer uma real contribuição ao melhor conhecimento da órbita de Urano. Aqui, apresentamos um breve levantamento de todo o material observacional utilizado, descrevemos as ferramentas e os procedimentos básicos para determinarmos as posições de Urano e de seus satélites principais, e os ilustramos com os principais resultados obtidos.

Observações

O grupo de astrometria do ON/MCT e OV/UFRJ possui um acervo de mais de 2 décadas de observações do Sistema Solar realizadas no OPD/LNA. Esse acervo foi garimpado em busca daquelas envolvendo o sistema de Urano. A Fig. 1 apresenta um levantamento, em função do ano (1992 a 2011), do total bruto de imagens que foram tratadas. Esse levantamento leva em conta os telescópios de 60cm (IAG e Zeiss) e o de 1.60m, com uma variedade de detectores. Exceto pela Fig. 1, apenas resultados oriundos do 1.60m e do IAG serão mostrados neste trabalho.

Tratamento das imagens – de coordenadas instrumentais para equatoriais (ICRF)

As imagens cruas são primeiramente corrigidas por *bias* e *flatfield* com auxílio do IRAF. O segundo passo consiste, então, na aplicação de um procedimento de coronografia digital [6]. Isto é importante para atenuar a influência da luz espalhada de Urano sobre a determinação de coordenadas sobre a imagem. Feito isto, o pacote PRAIA [7] determina, de forma automática, coordenadas equatoriais dos objetos detectados nessas imagens e as compara com coordenadas selecionadas (neste caso, oriundas das efemérides do sistema de Urano). O referencial celeste é dado pelo catálogo UCAC2 [8]. Vale notar que o sucesso da coronografia aplicada depende de uma boa determinação do centróide de Urano, valor que poderia ser utilizado para uma determinação direta de sua posição. Enfatizamos que, neste trabalho, as posições de Urano são determinadas a partir daquelas de seus satélites principais. Finalmente, os dados passam por uma série de filtragens para eliminar medidas de má qualidade.

Efemérides planetárias

Parte dos resultados oriundos do PRAIA são dados na forma de diferenças angulares entre coordenadas equatoriais observadas e calculadas (oriundas de efeméride). Neste projeto, utilizamos o sistema SPICE [9] para gerar efemérides de Urano (JPL – ura090 [10]) e de seus satélites principais (JPL – GUST86 [11] e modelo dinâmico LA07 [12]) tendo como base a DE421. Aqui, apenas comparações com efemérides do JPL são mostradas.

Resultados

Diferenças no sentido observações menos efemérides são apresentadas, na Tabela 1, para os satélites principais de Urano. Nesta tabela, as colunas 8 e 9 comparam as diferenças em posição no sentido (Satélite – Oberon), como oriundas das observações, com as diferenças (Satélite – Oberon) como oriundas das efemérides. Essas colunas indicam a coerência entre observações e efemérides para a órbita dos satélites ao redor de Urano. Quando comparadas com as colunas 4 e 5, que mostram as diferenças entre as posições observada e de efeméride dos satélites, conclui-se que a posição do baricentro do sistema de Urano, dado pela DE421, possui desvios sistemáticos. Isto pode ser verificado nos painéis esquerdos da Fig. 2. Vale notar a dependência temporal dos desvios em ascensão reta. Já os painéis direitos da Fig. 2 mostram diferenças no sentido observação menos efemérides, como função da anomalia verdadeira, para Titânia. O comportamento sinusoidal das diferenças indica que a descrição da órbita dos satélites ao redor de Urano pode ser melhorada e que nossas observações constituem material para isso.

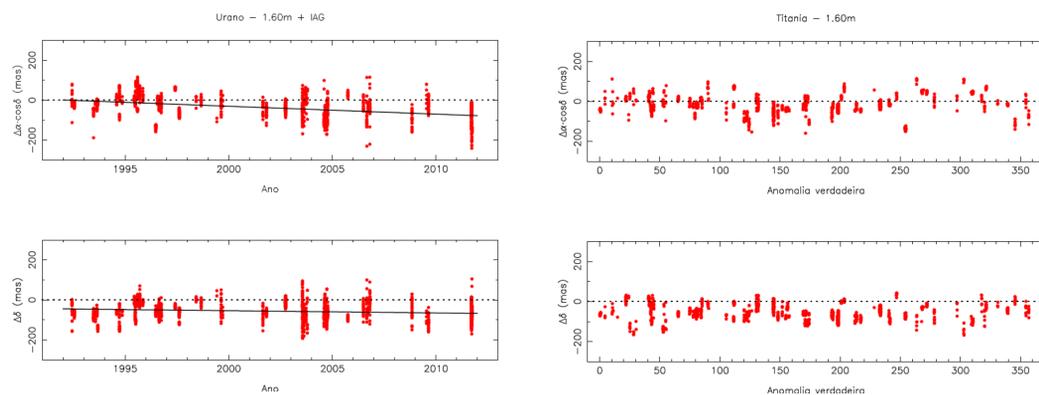


Figura 2. Painéis superior e inferior esquerdos: Valores de $\Delta\alpha\cos\delta$ e $\Delta\delta$ respectivamente, no sentido observação menos efemérides, para todo o conjunto de dados oriundos do 1.60m e do IAG como função do tempo. Painéis superior e inferior direitos: Valores de $\Delta\alpha\cos\delta$ e $\Delta\delta$ respectivamente, no sentido observação menos efemérides, para todo o conjunto de dados de Titânia oriundos do 1.60m e do IAG como função da anomalia verdadeira.

Conclusões & Comentários:

1. Posições de Urano foram determinadas através daquelas de seus satélites principais, cujas observações oferecem maior precisão e são praticamente livres de efeitos de fase no que diz respeito à astrometria. A coronografia digital mostrou-se importante para a qualidade do trabalho. O período envolvido compreende os anos de 1992 a 2011.
2. O painel do lado esquerdo da Fig. 2 mostram claramente a existência de desvios sistemáticos nas ascensões retas e declinações para as efemérides de Urano quando comparadas com valores observacionais. A reta ajustada por mínimos quadrados em ambos os painéis é indicativo apenas de que esses desvios, como função do tempo, comportam-se de forma diferente segundo a coordenada estudada.
3. Os painéis do lado direito na Fig. 2 mostram o potencial do material observacional aqui apresentado e tratado em contribuir também para uma melhor descrição do movimento dos satélites estudados ao redor de Urano.
4. Veiga, Vieira-Martins & Andrei (2003) [14] apresentaram resultados oriundos de parte do acervo observacional aqui utilizado. Uma comparação com o trabalho aqui realizado indica que nosso principal ganho veio por conta da utilização de catálogos mais densos e precisos como referência astrométrica.
5. Vale mencionar que, no início deste mestrado, partiu-se de um conjunto de aproximadamente 700GB de imagens astronômicas, das quais 250GB pertenciam a observações do Sistema de Urano (incluindo-se aquelas destinadas aos estudos baseados nos fenômenos mútuos ocorridos em 2007). Neste contexto, torna-se relevante ter-se à disposição ferramentas confiáveis, como o pacote PRAIA, para o tratamento automático das imagens. Isto reflete um cenário atual em astronomia, onde os grandes *surveys* disponibilizam grandes quantidades de informações e ferramentas para o devido garimpo tornam-se essenciais.

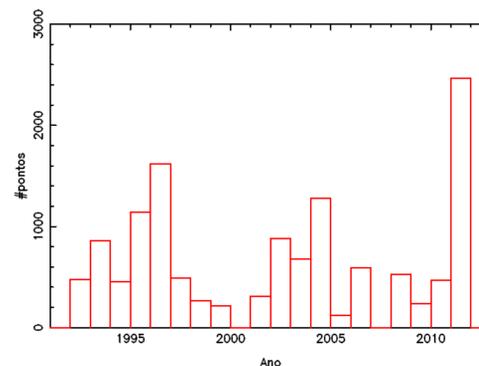


Figura 1. Distribuição bruta das observações do sistema de Urano, ao longo do tempo, realizadas com os telescópios de 0.60cm (IAG e Zeiss) e 1.60m e que fazem parte do acervo utilizado neste projeto. O número de observações realizadas em 2007 (> 18.000) foi eliminado do histograma ao lado. Elas dizem respeito a imagens obtidas com resolução temporal da ordem de segundos ou de fração de segundos. Essas imagens fazem parte do acervo utilizado no estudo dos satélites principais de Urano a partir de fenômenos mútuos [13] e não foram tratadas neste trabalho.

| (1) Tel. | (2) Satélite | (3) Mag. (V) | (4) $\Delta\alpha\cos\delta$ | (5) $\Delta\delta$ | (6) $\sigma_{\alpha}\cos\delta$ | (7) σ_{δ} | (8) $\Delta(O-C)_{\alpha}\cos\delta$ | (9) $\Delta(O-C)_{\delta}$ | (10) $\sigma(O-C)_{\alpha}\cos\delta$ | (11) $\sigma(O-C)_{\delta}$ | (12) #Obs. Usadas |
|-------------|-----------------|--------------------|---------------------------------|-----------------------|------------------------------------|--------------------------|---|-------------------------------|--|--------------------------------|-------------------------|
| 1.60m | Miranda | 16.4 | -43 | -56 | 87 | 54 | -7 | +3 | 53 | 44 | 458 |
| | Ariel | 14.3 | -31 | -53 | 65 | 40 | +5 | +9 | 24 | 30 | 810 |
| | Umbriel | 14.9 | -31 | -57 | 62 | 48 | +3 | +7 | 23 | 38 | 909 |
| | Titânia | 13.8 | -19 | -54 | 48 | 39 | +11 | +14 | 33 | 42 | 883 |
| | Oberon | 14.0 | -39 | -69 | 69 | 55 | - | - | - | - | 1004 |
| IAG | Ariel | 14.4 | -88 | -50 | 120 | 63 | +12 | 0 | 52 | 40 | 405 |
| | Umbriel | 15.0 | -47 | -55 | 51 | 56 | +1 | -9 | 40 | 40 | 410 |
| | Titânia | 13.9 | -53 | -57 | 66 | 55 | +4 | -8 | 35 | 38 | 716 |
| | Oberon | 14.0 | -61 | -44 | 57 | 54 | - | - | - | - | 859 |

Tabela 1. Estatística sobre o total (de 1992 a 2011) dos dados oriundos do 1.60m e do IAG. Medidas angulares são dadas em milésimos de segundo de grau (*mas*). Dados relativos a Miranda para os telescópios de 60cm possuem qualidade ruim e não são considerados. As grandezas $\Delta\alpha\cos\delta$ e $\Delta\delta$ indicam diferenças em ascensão reta e declinação, respectivamente, no sentido observação menos efemérides. Note a similaridade entre os valores para $\Delta\delta$. Eles reproduzem o desvio dado pelo painel esquerdo inferior mostrado na Fig.2. Note que, para a ascensão reta, as incertezas $\sigma_{\alpha}\cos\delta$ são mais elevadas que aquelas associadas à declinação. Isto pode ser explicado por uma dependência temporal dos valores de $\Delta\alpha\cos\delta$, como indicado no painel superior esquerdo da Fig. 2, dependência que não foi levada em conta no cálculo de $\sigma_{\alpha}\cos\delta$ apresentado na tabela acima. As grandezas $\Delta(O-C)_{\alpha}\cos\delta$ e $\Delta(O-C)_{\delta}$ indicam, em ascensão reta e declinação respectivamente, o seguinte: [(posição observada de um dado satélite – posição observada de Oberon) – (posição de efeméride desse mesmo satélite – posição de efeméride de Oberon)]. Os valores apresentados na tabela para essas grandezas refletem a coerência entre as posições relativas dos satélites como dadas pelas observações e pelas efemérides. Essas diferenças mostram que as efemérides bem descrevem as órbitas dos satélites ao redor de Urano. As incertezas para $\Delta\alpha\cos\delta$, $\Delta\delta$, $\Delta(O-C)_{\alpha}\cos\delta$, $\Delta(O-C)_{\delta}$ seguem nas respectivas colunas adjacentes (colunas 6, 7 e colunas 10, 11).

Referências

- [1] Ma, C., Arias, E.F., Eubanks, T.M., *et al.* 1998, AJ, 116, 516.
- [2] Standish, M. 1998, Highlights in Astronomy, *Linking the Dynamical Reference Frame to the ICRF*, 11, 310.
- [3] Folkner, W.M., Williams, J.G., Boggs, D.H. 2008, Memorandum IOM 343R-08-003, *The Planetary and Lunar Ephemeris DE 421*.
- [4] da Silva Neto, D.N., Assafin, M., Andrei, A.H., Vieira-Martins, R. 2005, *The Three-Dimensional Universe with GAI*, ESASP, 285, 576.
- [5] Assafin, M., Camargo, J.I.B., Vieira-Martins, R. *et al.* 2010, A&A, 515, 32.
- [6] Assafin, M., Campos, R.P., Vieira-Martins, R. *et al.* 2008, P&SS, 56, 1882.
- [7] Assafin, M. 2006, Bol. Soc. Astron. Bras. 26 (1), 189.
- [8] Zacharias, N., Urban, S.E., Zacharias, M.I., *et al.* 2004, AJ, 127, 3043.
- [9] <http://naif.jpl.nasa.gov/naif/>
- [10] naif.jpl.nasa.gov/pub/naif/generic_kernels/spk/satellites/
- [11] Laskar, J. & Jacobson, R.A. 1987, A&A, 188, 212.
- [12] Lainey, V. 2008, P&SS, 56, 1766.
- [13] Assafin, M., Vieira-Martins, R., Braga-Ribas, F., *et al.* 2009, AJ, 4046, 137.
- [14] Veiga, C.H., Vieira-Martins, R., Andrei, A.H. 2003, AJ, 125, 2714.