



ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA
DIVISÃO DE ENSINO
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 1º/2024

CARLOS EDUARDO DE SA AMARAL OLIVEIRA, Cap Av

Utilização de radares para obtenção de Consciência Situacional do Espaço

Rio de Janeiro

2024

ESCOLA DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS DA AERONÁUTICA
DIVISÃO DE ENSINO
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS 1º/2024

CARLOS EDUARDO DE SA AMARAL OLIVEIRA, Cap Av

Utilização de radares para obtenção de Consciência Situacional do Espaço

Trabalho de conclusão de curso apresentado no Curso de Aperfeiçoamento de Oficiais da Aeronáutica como requisito parcial para aprovação no Curso de Pós-graduação *Lato Sensu* em Liderança com Ênfase em Gestão no COMAER.

Linha de Pesquisa: Ciência, Tecnologia e Inovação

Orientador: Daniel Rodrigues Figueiredo, Maj Av

Rio de Janeiro

2024

CARLOS EDUARDO DE SA **AMARAL** OLIVEIRA, Cap Av

Utilização de radares para obtenção de Consciência Situacional do Espaço

Trabalho de conclusão de curso apresentado
no Curso de Aperfeiçoamento de Oficiais da
Aeronáutica.

Aprovado por:

Daniel Rodrigues **Figueiredo**, Maj Av
EAOAR

Mellina dos Santos Ferreira Barbosa, Maj Int
EAOAR

Rio de Janeiro

2024

RESUMO

De acordo com estatísticas da Agência Espacial Europeia (ESA, 2023), há mais de 30 mil objetos espaciais sob monitoramento constante por sistemas de Consciência Situacional do Espaço (CSE) para que sejam garantidos níveis adequados de segurança nas operações espaciais. O projeto Laboratório de Monitoramento de Objetos Espaciais, sob coordenação do Centro Espacial ITA, tem por objetivo estabelecer e gerenciar um catálogo nacional e independente de objetos espaciais, utilizando, inicialmente, uma rede de telescópios controlados remotamente. Contudo, tendo em vista a grande quantidade de objetos catalogados e a frequência mínima com que tais objetos devem ser revisitados para que alertas de colisão sejam gerados com a antecipação e precisão adequadas, a utilização exclusiva de telescópios torna-se insuficiente e deve ser complementada com informações de catálogos de outros países ou com a utilização de radares. Neste contexto, defende-se a adição de um radar à atual configuração de sensores ópticos. Isso aumentará a quantidade de objetos revisitada por período de observação, devido a maiores disponibilidade e persistência. Além disso, a fusão de dados entre radares e telescópios proporcionará a redução de incertezas dos dados de posição e velocidade, agregando valor à tomada de decisão, contribuindo para a redução da quantidade de falsos alertas de colisão e maior confiabilidade nas previsões realizadas. Por fim, são apresentados exemplos de sistemas de CSE em operação e dados experimentais que comprovam a adequabilidade da solução proposta, bem como sua importância para o Programa Estratégico de Sistemas Espaciais e para a manutenção da Soberania brasileira no espaço.

Palavras-chave: Consciência Situacional do Espaço. Redução de Incertezas. Telescópio. Radar. Fusão de dados.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com estatísticas divulgadas pela Agência Espacial Europeia (ESA,2023), atualmente, existem mais de 30 mil objetos espaciais maiores do que 10 cm catalogados e monitorados diariamente em órbitas terrestres. Em altitudes próximas a 400 km, tais objetos chegam a velocidades da ordem de 28.000 km/h. Conseqüentemente, a probabilidade de colisão entre dois objetos, ainda que de reduzidas dimensões, traz conseqüências catastróficas para a operação dos referidos sistemas e, portanto, deve ser mitigada. Como forma de prover meios para uma tomada de decisão eficaz e assertiva, governos, empresas e instituições detentoras de ativos espaciais têm investido em sistemas de obtenção de Consciência Situacional do Espaço (CSE).

A nível mundial, grande parte dos sistemas de CSE utilizam dados produzidos e distribuídos pela Força Espacial dos Estados Unidos. Em âmbito nacional, destacam-se dois principais operadores de satélites: a Força Aérea Brasileira (FAB) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Ambos utilizam os referidos dados para manutenção de adequados níveis de segurança nas operações, inteligência operacional e cálculo de manobras anticolisão para os seus satélites. No contexto da FAB, o Centro de Operações Espaciais (COPE), subordinado ao Comando Aeroespacial (COMAE), é responsável pela parte operacional de CSE e, por sua vez, o Centro Espacial ITA (CEI), subordinado ao Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), é responsável pelo desenvolvimento de atividades de pesquisa e desenvolvimento na área. Apesar dos diferentes enfoques no tipo de operação, os meios são compartilhados.

As atividades de manutenção de catálogo e determinação de órbita de objetos de interesse são comumente realizadas por dois tipos de sensores - telescópios e radares. Contudo, por questões de disponibilidade e adequabilidade de meios, a FAB tem utilizado prioritariamente sensores ópticos para a produção de dados de CSE. Este tipo de sensor apresenta uma série de vantagens, sendo as principais o baixo custo e a alta resolução angular. Por outro lado, apresenta algumas restrições como operação exclusivamente noturna e sujeita a boas condições meteorológicas.

No que lhe dizem respeito, apesar do custo comparativamente mais elevado, radares não possuem restrições de operação relacionadas a condições de tempo e de luminosidade. Conseqüentemente, em função de maior persistência e

disponibilidade, são capazes de observar uma quantidade maior de objetos para um mesmo período de referência.

Além de maior quantidade de objetos monitorados por dia, a fusão de dados oriundos de radares e telescópios mitiga a quantidade de falsos alertas de colisão, bem como provê maior antecipação para a tomada de decisão. No que tange a dados de posição e velocidade, condições iniciais de propagação mais precisas permitem que as estimativas de posições futuras sejam consideradas válidas por um intervalo de tempo estendido. Por conseguinte, uma maior antecipação no processo de tomada de decisão permite que, por exemplo, manobras evasivas desnecessárias sejam mitigadas ou, até mesmo, que estas sejam conjugadas com manobras de correção orbital que são realizadas rotineiramente.

Diante do exposto, uma vez que o objetivo do projeto Laboratório de Monitoramento de Objetos Espaciais (LMOE) é a criação e gerenciamento de um catálogo nacional e independente de objetos espaciais, é necessária a adição de um radar à atual configuração de sensores ópticos para pleno desempenho de capacidades. Como consequência, dados de posição e velocidade mais precisos agregarão valor à tomada de decisão e irão conferir maior validade e confiabilidade nas previsões realizadas.

2 DESENVOLVIMENTO

De acordo com Skinner *et al.* (2021), o termo CSE é definido como a compreensão, conhecimento, caracterização e monitoramento do ambiente espacial, incluindo-se tanto objetos naturais e artificiais, bem como aspectos que influenciam a dinâmica dos mesmos - níveis de atividade solar e radiação, com o intuito de avaliar potenciais riscos para pessoas e propriedades no espaço, devido a reentradas controladas ou não, interferência eletromagnética ou eventos singulares como explosões e colisões no espaço.

Idealmente, uma vez conhecida a posição de determinado objeto, por meio de modelos matemáticos, seria possível prever posições futuras e, com isso, evitar possíveis colisões com outros satélites. Contudo, além de limitações inerentes aos modelos matemáticos utilizados, existe considerável imprecisão decorrente da estimativa de grandezas não conhecidas como, por exemplo, arrasto atmosférico e pressão de radiação solar (Hobson, 2014). Consequentemente, os dados orbitais

apresentados em catálogos são válidos apenas quando considerados dentro de um intervalo de referência e devem ser interpretados segundo uma abordagem estatística - intervalos de confiança, valores médios e níveis de incerteza (Vallado, 2001).

Desta forma, a custódia de objetos catalogados é realizada de forma contínua e recorrente. No caso de satélites em operação, as estimativas de posição são apenas consideradas válidas quando dentro de um intervalo de três dias para objetos abaixo de 2000 km de altitude e cinco dias para órbitas mais altas (Krage, 2023).

2.1 Utilização de radares para CSE: um incremento de performance

O objetivo central do LMOE é desenvolver uma infraestrutura capaz de realizar atividades de detecção, rastreamento e identificação de objetos espaciais de forma independente, permitindo a criação e o gerenciamento de um catálogo de dados orbitais nacional (FINEP, 2021). A configuração inicial do referido sistema é composta exclusivamente por sensores ópticos, com possibilidade de integração de radares. Telescópios são bastante utilizados para objetos em órbitas mais altas, onde o custo de utilização de radares torna-se inviável, e para atividades de caracterização de objetos, de inteligência operacional e estimativa indireta da atitude do mesmo, pela análise da curva de emissão espectral do objeto (Lal *et al.*, 2022).

Contudo, é notável a preferência pela utilização de radares para atividades de manutenção de catálogo e custódia de objetos espaciais, especialmente no contexto de órbitas baixas - até 2000 km, em que o custo dos referidos sistemas ainda é considerado baixo (Choi *et al.*, 2017). Radares operam sob quaisquer condições meteorológicas e de luminosidade, telescópios, por sua vez, além de serem obstruídos por nebulosidade, dependem de condições bastante específicas de iluminação do objeto, fazendo com que, para grande parte das atividades em órbitas baixas, a operação esteja restrita de duas a quatro horas por noite (Flohner, 2012).

Ainda que Flohner *et al.* (2005) comprove que telescópios são o tipo de tecnologia dominante para observações em órbitas geoestacionárias (GEO), médias (MEO) e altamente elípticas (HEO), é importante destacar que, segundo dados da Agência Espacial Europeia (ESA, 2023), 70% dos objetos atualmente catalogados estão em altitudes inferiores a 2000 km e, portanto, em altitudes consideravelmente inferiores aos perfis mencionados. Similarmente, todos os satélites nacionais em operação, com exceção do Satélite Geoestacionário de Defesa (SGDC) e os previstos

no Programa Estratégico de Sistemas Espaciais (PESE), também estão em órbitas baixas (Leonardi; Côrrea, 2020; Andrade; Okado; Hillebrand, 2021).

Adicionalmente, grandes constelações, como *Starlink* e *OneWeb*, operam no referido regime, sendo a primeira responsável por 90% dos alertas anticolisão recebidos para o satélite ITASAT no mês de outubro de 2023, por exemplo (Tonaco, 2023). Radares são capazes de acompanhar centenas de objetos simultaneamente (Krag; Klinkrad, 2009), enquanto telescópios apresentam restrições de campo de visada, tempo de exposição, ângulo de elevação e distorções por efeitos ópticos, o que limita consideravelmente a quantidade de objetos observados, ainda que estejam dentro do campo de visada do sensor, mas não estejam centrados na imagem (Ackermann *et al.*, 2015).

Portanto, fica evidente que a utilização de radares permitirá considerável aumento na quantidade de objetos observados por dia, tanto por possuírem maior disponibilidade e persistência, como pelo comprovado melhor custo-benefício no regime de órbitas baixas, região em que estão localizados 70% dos objetos espaciais.

2.2. Fusão de dados de radares e telescópios para mitigação de incertezas

Conforme apresentado por Sánchez *et al.* (2013), tão importante quanto as estimativas de posição e velocidade fornecidos pelos sensores, seriam as incertezas e, portanto, o grau de confiabilidade das informações e estimativas produzidas. Muelhaupt *et al.* (2019) apresentam o modo como tais incertezas são utilizadas para um assessoramento quantitativo de risco e estabelecimento de critérios de tomada de decisão e parâmetros de referência para a operação de um sistema de CSE.

Neste contexto, Hobson (2014) demonstra que, devido a características construtivas e tipo de tecnologia envolvidos na aquisição dos dados, radares e telescópios produzem dados com diferentes tipos de incerteza. Por exemplo, usualmente, sensores ópticos apresentam elevada resolução angular, uma vez que tais informações de apontamento são obtidas a partir de sensores de estrela, mas estão associadas a grandes imprecisões no sentido radial da observação, pois determinam as informações de distância de forma indireta. Por outro lado, radares apresentam um excelente desempenho no sentido radial da observação associado a imprecisões na direção de deslocamento do objeto, ou seja, no sentido tangente à órbita. Portanto, afirma-se que os tipos de incerteza produzidos são complementares e, juntos, reduzem a incerteza total estimada (Sánchez *et al.*, 2013).

Dados orbitais imprecisos geram maior quantidade de falsos alertas de colisão, bem como reduzem o tempo de validade das previsões de posição e velocidade de objetos de interesse que, por sua vez, são utilizadas no processo de tomada de decisão para critérios de manobra (Muelhaupt *et al.*, 2019). Em um cenário onde apenas um dos tipos de sensores pode ser utilizado, as referidas incertezas seriam mitigadas por uma maior frequência de aquisição de medidas, conduzindo a uma utilização não otimizada do referido sistema (Hobson, 2014).

Por outro lado, a utilização simultânea de ambos os tipos de dados, por meio da fusão de sensores, é uma opção otimizada e igualmente viável para mitigação das referidas incertezas (Hobson, 2014). Krag *et al.* (2011) e Jilte *et al.* (2019) documentam resultados experimentais consistentes com as afirmações apresentadas, os dados foram obtidos em campanhas de testes e simulações do sistema de vigilância e rastreamento da Agência Espacial Europeia (ESA), contudo, com enfoque no desempenho de radares. Já a utilização conjunta com telescópios é documentada em Lal *et al.* (2022), Choi *et al.* (2017) e Sánchez *et al.* (2013), que comprovam a consistência e viabilidade técnica da solução proposta para o contexto de atividades de manutenção de catálogos de objetos espaciais.

Portanto, fica evidente que a possibilidade de fusão de sensores ópticos e radares trará benefícios em termos de confiabilidade e maior validade dos dados. O que é essencial para atividades de manutenção de catálogo, pois demandará menos revisitas e atualizações de posição de objetos de interesse.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo central do Projeto Laboratório de Monitoramento de Objetos Espaciais (LMOE) é a criação e gerenciamento de um primeiro catálogo nacional e independente de objetos espaciais, de forma que o Brasil tenha capacidade efetiva de garantir operações seguras para os seus satélites, quer sejam civis ou militares. Contudo, foi demonstrado que a utilização exclusiva de telescópios para a referida atividade requer a consideração complementar de dados produzidos por outras nações, ou a utilização de sensores adicionais, como radares, por exemplo.

Radares são caracterizados por maior capacidade de observação simultânea de alvos, conjugada a maior persistência e disponibilidade total do sistema, traduzindo-se, portanto, em acrescida capacidade efetiva na quantidade de objetos observados por período de observação. O que é essencial, uma vez que,

aproximadamente, dois terços dos objetos catalogados encontram-se em órbitas baixas e, portanto, dentro da região onde comprovadamente possuem melhor relação custo-benefício.

Adicionalmente, foi demonstrado que a referida configuração permite que seja realizada a fusão de sensores para mitigação de incertezas associadas às observações, trazendo maior antecipação na tomada de decisão e reduzindo a quantidade de falsos alertas de colisão.

Em virtude das considerações apresentadas, é evidente que a criação e gerenciamento de um catálogo independente de objetos espaciais, que é o objetivo primordial do LMOE, só pode ser realizado mediante a adição de um radar à atual configuração de sensores ópticos. A utilização exclusiva dos últimos para a referida atividade demanda o compartilhamento de dados por nações aliadas e, portanto, configura dependência externa. Comprovadamente, na análise demonstra-se que a configuração mais utilizada nos sistemas de CSE de nações relevantes no cenário espacial, como Estados Unidos, União Europeia, Rússia e China utiliza radares e telescópios de forma conjunta para atividades de CSE.

Além disso, destaca-se que a adoção dos referidos sensores, ainda que, inicialmente restritos ao âmbito do LMOE, também trará benefícios para manutenção de altos níveis de CSE no âmbito operacional, uma vez que a infraestrutura de operação e pesquisas é compartilhada e mantida por unidades do COMAE e do DCTA, como o COPE e o CEI, respectivamente.

Por fim, é importante destacar que o LMOE, na configuração proposta, com radares e telescópios, é a infraestrutura básica para implementação do Sistema de Monitoramento de Objetos Espaciais (SMOE), previsto no Programa Estratégico de Sistemas Espaciais (PESE). Portanto, o referido sistema trará ao Brasil a capacidade inédita de gerenciar o seu próprio catálogo de objetos espaciais de forma segura e independente, sendo capaz de realizar, com autonomia, os seus próprios cálculos de probabilidade de colisão e análise de reentrada de objetos em território nacional. Fator fundamental para a garantia da soberania nacional no espaço exterior.

REFERÊNCIAS

ACKERMANN, M. R. *et al.* A systematic examination of ground-based and space-based approaches to optical detection and tracking of artificial satellites. *In: SPACE*

SYMPOSIUM, 31., 2015, Colorado Springs. **Proceedings** [...]. Albuquerque: Sandia National Lab, 2015. p. 1–46.

ANDRADE, I.O; OKADO, G.H.C; HILLEBRAND, G.R.L.. The Brazilian Strategic Space Systems Program (PESE): Challenges, Opportunities, and Future Perspectives. **Journal of the Americas**, Montgomery, v.3, n.3, p.220-240, dez. 2021.

CHOI, E.J. *et al.* Performance analysis of sensor systems for space situational awareness. **Journal of Astronomy and Space Sciences**, Daejeon, v. 34, n. 4, p. 303-313, dez. 2017.

EUROPEAN SPACE AGENCY. ESA Space Debris Office. Technical Report GEN-DB-LOG-00288-OPS-SD. **ESA annual space environment report**. Darmstad, 2023.

FINANCIADORA DE ESTUDOS E PROJETOS. Termo de compromisso que entre si celebram a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) e a Fundação Casimiro Montenegro (FCMF). São José dos Campos. 2021.

FLOHRER, T. **Optical survey strategies and their application to space surveillance**. 1. ed. Zurich: Schweizerische Geodätische Kommission, 2012.

FLOHRER, T *et al.* Performance estimation for GEO Space Surveillance. **Advances of Space Research**, Paris, v. 35, n. 7, p. 1226-1235, mar. 2005.

HOBSON, T. A. **Sensor management for enhanced catalogue maintenance of resident space objects**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Tecnologia da Informação e Engenharia Elétrica, Universidade de Queensland, Queensland, BI, 2014.

JILETE, B. *et al.* Acquiring observations for test and validation in the space surveillance and tracking segment of ESA's SSA Programme. **Journal of Space Safety Engineering**, Amsterdam, v. 6, n. 3, p. 197-200, set. 2019.

KRAG, H.; KLINKRAD, H. Surveillance radar design options as a function of cataloguing performance requirements. *In*: EUROPEAN CONFERENCE OF SPACE DEBRIS, 5., 2009, Darmstad. **Proceedings** [...]. Paris: European Space Agency, 2009. p. 1-9.

KRAG, H. *et al.* **Requirements for a LEO surveillance radar in response to collision avoidance user needs**. EMR, v. 2, n. 5, 2011.

KRAGE, F. J. **NASA spacecraft conjunction assessment and collision avoidance best practices handbook**. Washington: NASA/SP-20205011318, 2020. *e-book*. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20205011318>. Acesso em: 04 abril 2024.

LAL, B. *et al.* **Global Trends in Space Situational Awareness (SSA) and Space Traffic Management (STM)**. Washington: IDA Space and Policy Institute, 2022.

LEONARDI, R.; CORRÊA, A.E.A.. An Overview of Small Satellite Initiatives in Brazil. **Handbook of Small Satellites: Technology, Design, Manufacture, Applications, Economics and Regulation**, p. 1-14, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-36308-6. Disponível em: <https://link.springer.com/referencework/10.1007/978-3-030-36308-6>. Acesso em: 04 abril 2024.

MUELHAUPT, T. J. *et al.* Space traffic management in the new space era. **Journal of Space Safety Engineering**, Amsterdam, v. 6, n. 2, p. 80-87, jun. 2019.

SÁNCHEZ, J.F. *et al.* Radar and Optical Sensor Data Fusion for Orbital Determination of HEO Objects. *In*: EUROPEAN CONFERENCE ON SPACE DEBRIS, 6., 2013, Darmstad. **Proceedings** [...]. Paris: European Space Agency, 2013. p. 163-170.

SKINNER, M. A. *et al.* Space Traffic Management Terminology. **Journal of Space Safety Engineering**, Amsterdam, v. 9, n.4, p. 644-648, dez. 2022.

TONACO, T.R.O. **Análise de alertas anticolisão do ITASAT-1**. 2023. Trabalho de Conclusão do Curso (Especialização em Operação de Sistemas Espaciais) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2023.

VALLADO, D. A. **Fundamentals of astrodynamics and applications**. 2. ed. Berlin: Springer Science & Business Media, 2001.