

# Horizonte ISDEFE: Espacio. Análisis del marco institucional y de las principales líneas de desarrollo e investigación actuales en el área Vigilancia y Seguimiento espaciales (SST)

Sanjurjo-Rivo, Manuel <sup>1,\*</sup>, Fajardo, Pablo <sup>1\*</sup>, Ruiz Díaz-Araque, Vicente <sup>2</sup>, Ibarra Ibaibarriaga, Aitor <sup>2</sup>, Sánchez-Mayorga, Jaime <sup>3</sup>, y Mosquera Benitez, Daniel <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Bioingeniería e Ingeniería Aeroespacial

<sup>2</sup> ISDEFE e ISDEFE para ESA - European Space Agency

<sup>3</sup> Unidad de Espacio de la Jefatura de C4ISR y Espacio, Subdirección General de Planificación y Programas, Dirección General de Armamento y Material

\* Autor responsable del trabajo; manuel.sanjurjo@uc3m.es pablo.fajardo@uc3m.es

---

**Abstract:** El análisis presentado en este artículo se enmarca en una serie de trabajos de prospectiva tecnológica en el área espacial dentro del programa Horizontes ISDEFE. El estudio actual se centra en el área Vigilancia y Seguimiento espaciales (VSE, SST en sus siglas en inglés). La creciente dependencia de las actividades terrestres en el segmento espacial hace necesario asegurar la integridad de los satélites artificiales. La seguridad de los recursos espaciales se ve amenazada por el riesgo de colisión con otros satélites o con desechos espaciales. Las actividades de VSE de objetos orbitales están dirigidas a garantizar su seguridad. La Comisión Europea ha considerado que estas actividades han de estar definidas dentro de la política espacial europea. Esta política establece que la operación de las instalaciones está a cargo de un consorcio de entidades nacionales de los países miembros, mientras que la provisión de servicios es competencia del Centro de Satélites de la Unión Europea (SatCen) bajo el mando del Alto representante de la Unión para Asuntos Exteriores y Política de Seguridad. Los servicios previstos por la Comisión son los de evaluación de riesgo de colisión, detección y caracterización de fragmentaciones, y evaluación del riesgo de re-entrada controlada. Para la provisión de los mismos es necesaria la generación y mantenimiento de un catálogo de objetos orbitales. Dado el carácter sensible de los datos a tratar, la operación será necesariamente dual, civil-militar. Este artículo revisa los resultados preliminares del trabajo de prospectiva tecnológica. El objetivo del mismo es presentar el estado actual de las capacidades de las administraciones públicas, ejército, industria y academia españolas en el ámbito del SST. Asimismo, la adecuación a los requisitos del servicio y la mejora del mismo hace necesaria una inversión en investigación y desarrollo en cada uno de los elementos que configuran el sistema SST.

**Keywords:** Vigilancia y Seguimiento Espaciales (VSE - SST); Prospectiva Tecnológica; Marco institucional

---

## **1. Introducción**

Históricamente, la vigilancia y seguimiento espaciales (VSE) se relacionan con la defensa frente a posibles amenazas procedentes de satélites artificiales o misiles en el contexto de la Guerra Fría [1]. El crecimiento de la población de desechos espaciales (“space debris”) ha cambiado el foco de las actividades VSE. Actualmente, el objetivo de éstas se centra en evitar colisiones órbita de satélites controlados que puedan resultar en una limitación o cesación de su misión. Los servicios que proporcionan estos satélites son fundamentales para garantizar la integridad de infraestructuras críticas o la seguridad de operaciones terrestres. Entre estos servicios se encuentra la navegación GNSS, comunicaciones seguras, asistencia en desastres, mantenimiento preciso de estándar de tiempos para transacciones bancarias, etc. Las actividades de VSE se enmarcan dentro de un contexto más amplio denominado SSA (space situational awareness), cuyo objetivo es identificar y prevenir riesgos de origen espacial (una discusión más en profundidad del concepto SSA se puede encontrar en [2]). El programa SSA de la Agencia Europea del Espacio (ESA) monitoriza además de los desechos espaciales, el space weather (SWE), esto es, las condiciones en el Sol, el viento solar y su influencia en la magnetosfera, ionosfera y termosfera terrestres, así como los objetos cercanos a la Tierra (NEO) potencialmente peligrosos por la posibilidad de colisión con la misma [3]. El conocimiento preciso del entorno es el primer paso para una evaluación correcta de los riesgos asociados a estos fenómenos. Las actividades de VSE están encaminadas a caracterizar la población de space debris que podría causar daños en satélites operativos. A pesar de encontrarse en órbitas próximas a la Tierra, en comparación con los NEOs, por ejemplo, esta población no se conoce con la precisión necesaria. Lo que actualmente sabemos es que el número de objetos residentes en órbita terrestre no ha dejado de crecer desde el lanzamiento del Sputnik. La densidad de desechos espaciales es mayor en órbitas de interés como las heliosíncronas en órbitas bajas (LEO) o en órbita geoestacionaria (GEO). La mayor parte del space debris, aproximadamente un 60 %, procede de explosiones y colisiones en órbita, mientras que los satélites operativos únicamente representan un 6 % del total de objetos que se siguen en órbita [4].

Los problemas asociados al aumento de desechos espaciales requiere de una acción integral. Además de las actividades de mera vigilancia y seguimiento, países y agencias espaciales se han marcado un objetivo más ambicioso dirigido a explotar de manera sostenible el espacio cercano a la Tierra. Dentro de este marco más amplio, existen iniciativas para reducir la población de objetos residentes en el espacio (medidas de mitigación) y recomendaciones para contemplar la eliminación del satélite al final de su vida útil dentro del diseño de nuevas misiones. En este sentido, la Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos de Naciones Unidas (UNCOPOUS, en sus siglas en inglés) ha publicado un documento sobre la sostenibilidad a largo plazo de las actividades en el espacio ultraterrestre en donde promueve la recopilación, el intercambio y la difusión de información sobre vigilancia de los desechos espaciales [5].

Tanto la congestión en órbitas relevantes como el desarrollo del turismo espacial o la consolidación de las misiones tripuladas como una actividad cotidiana, han desencadenado la necesidad de desarrollar posibles sistemas de gestión integral del tráfico espacial [6]. El propósito de este sistema sería garantizar el vuelo espacial seguro, de la misma manera que lo hace el sistema de gestión del tráfico aéreo. La definición detallada de este sistema se puede encontrar en un Cosmic Study preparado por la International Academy of Astronautics [7]. Este y otros trabajos [8–11] proporcionan una primera aproximación al problema de la coordinación entre tráficos aéreo y espacial.

El análisis presentado en este artículo se enmarca en una serie de trabajos de prospectiva tecnológica en el área espacial dentro del programa Horizontes ISDEFE. El objetivo de este trabajo es presentar el contexto internacional de la VSE, su marco institucional en Europa y en España, así como el desarrollo tecnológico existente y los retos futuros. En este artículo presentamos los resultados preliminares de este estudio y su desarrollo continuará en trabajos futuros.

## **2. Situación internacional del la VSE**

Los principales países con capacidad para el seguimiento y la vigilancia espacial son los EEUU y la Federación Rusa. En menor medida, la Unión Europea (además de Francia y Alemania que tienen actualmente un sistema propio independiente del de la Unión), China, Canadá y Japón están desarrollando capacidades de vigilancia independientes [12]. El trabajo de Vallado [13] recoge los principales sensores dedicados a labores de VSE en el mundo, y cuya información se haya publicada. Internacionalmente, el SST es habitualmente competencia del ministerio de Defensa, si bien no todos los agentes que participan son militares. Ejemplos de asociaciones civiles que llevan a cabo actividades de VSE son la International Space Optical Network (ISON) y la Space Data Association (SDA). ISON es una red mundial coordinada por el Instituto Keldysh de Matemática Aplicada de la Academia de Ciencias Rusa (KIAM) para proporcionar datos de objetos espaciales de manera independiente para fines científicos [14]. Por su parte, la SDA es una asociación sin ánimo de lucro formada por cuatro importantes compañías globales de comunicación por satélite (Inmarsat, Intelsat, SES y Eutelsat) [15].

Las capacidades de VSE en EEUU dependen del US Strategic Command (USSTRATCOM). La misión de control espacial es llevada a cabo por el Joint Functional Component Command for Space (JFCC Space) [16]. A su vez, el Joint Space Operations Center (JSPOC), dependiente de este último, gestiona un catálogo con más de 16000 objetos espaciales y proporciona un servicio de evitación de colisión, que desde 2009 es también accesible a operadores civiles o gubernamentales no estadounidenses [17]. Recientemente, se ha establecido el Joint Interagency Combined Space Operations Center (JICSpOC) para facilitar la distribución de datos entre las distintas agencias que participan en la VSE. La colisión en 2009 de el satélite Iridium 33 y el Cosmos 2251 [18] puso de manifiesto las limitaciones de los sistemas actuales. De hecho, EEUU se encuentran en un proceso de mejora de sus capacidades. Las carencias más relevantes identificadas tienen que ver con la cobertura del hemisferio Sur, y el envejecimiento de sensores y software de tratamiento de datos. El presupuesto en el periodo 2015-2020 es de unos \$ 1000 M anuales, de los cuales un 45 % está destinado a la operación, mientras que el otro 55 % se destina a la mejora de las infraestructuras [19]. Por su parte, en la Federación Rusa, la red de vigilancia espacial (SKKP) depende del centro de inteligencia de espacio integrado

en el comando espacial de las fuerzas de defensa aéreas desde 2011. El centro mantiene un catálogo de objetos espaciales [20]. Las capacidades de SST en Rusia derivan de los radares de sistemas de alerta temprana de misiles. También mantiene una estación de seguimiento óptica en Tayikistán, con cobertura únicamente del cinturón GEO sobre Rusia. De la misma manera, los sensores rusos, que se localizan distribuidos en el territorio de la antigua URSS, proporcionan un servicio de calidad limitada debida a la falta de una distribución geográfica adecuada [21]. En el año 2000, se llevó a cabo una comparación de las prestaciones de los sistemas ruso y estadounidense concluyendo que, si bien ambos catálogos contenían información similar, alguno de los elementos era único en cada sistema, y que ambos se beneficiarían de manera muy significativa en el caso de que se compartiesen la información [22]. En los próximos años, la mejora del sistema SST no aparece como línea prioritaria de desarrollo en la política espacial de la Federación Rusa [23]. Sí aparece en cambio una mención genérica a la mejora de infraestructuras terrestres [23] en la que se podría incluir una mejora de los sensores terrestres de SST. Actualmente la Federación Rusa está promoviendo en Naciones Unidas, dentro de la Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos (UNCOPOUS, en sus siglas en inglés), la creación de un organismo que coordine internacionalmente un servicio de VSE unificado [24,25]. UNCOPOUS se creó en 1959 por la Asamblea General para gestionar la exploración y uso del espacio ultraterrestre para beneficio de la humanidad. En ese sentido, es el órgano encargado de la legislación que afecta a los desechos espaciales.

Además de la comisión de las Naciones Unidas, existen organismos internacionales relacionados con la VSE, como ejemplo el Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC), formado por las principales agencias espaciales, realiza actividades relacionadas con mitigación [26]. De hecho, el IADC publica un guía de buenas prácticas para tratar de reducir la población de basura espacial en el futuro próximo [27]. Existen a su vez, otras iniciativas de menor calado son la Global Space Situational Awareness Sensor Database de la Secure World Foundation [28].

### **3. Actual marco institucional en Europa**

Las actividades de seguimiento y vigilancia espaciales en Europa comenzaron con los programas de “Space Debris” de la Agencia Espacial Europea (ESA). La ESA ha estado activa en estas actividades desde mitad de los años 80 [29]. En los 2000, las actividades relacionadas con el Space Debris se incorporaron al SSA junto con los fenómenos de “meteorología espacial” y el seguimiento de NEOs. En noviembre de 2008, el consejo ministerial de la ESA lanza un programa preparatorio de SSA para dotar a Europa de un sistema autónomo que proporcione información acerca de los riesgos espaciales y que permita la operación segura de satélites en el espacio cercano [3]. El programa de SSA se ha estado implementando en tres periodos diferentes entre 2009 y 2019. La inversión de los estados miembros de la ESA en el programa hasta la fecha, es de unos 100 M€[30]. Durante la primera fase de este programa, se llevaron a cabo estudios sobre la viabilidad y la capacidad de un sistema europeo autónomo de VSE. En esa fase se definieron requisitos que se discutirán en la sección 4.

Paralelamente, en el marco de la construcción de una política espacial y de seguridad común en la Unión Europea pronto se identificó la necesidad de desarrollar actividades de VSE y disponer de la capacidad autónoma para detectar e identificar objetos espaciales [31]. En 2008, en los artículos 189.1

y 189.2 del tratado de Lisboa se mejora la visibilidad del espacio estableciendo la responsabilidad de definir una política espacial europea (ESP). También se refuerza en el tratado de Lisboa la política de seguridad y exterior con la creación de la figura del Alto representante de la Unión para Asuntos Exteriores y Política de Seguridad. Esta es el área que tiene competencias en la política espacial [32]. En este periodo desde 2003, se ha producido un movimiento desde el concepto de espacio y seguridad al de seguridad en el espacio.

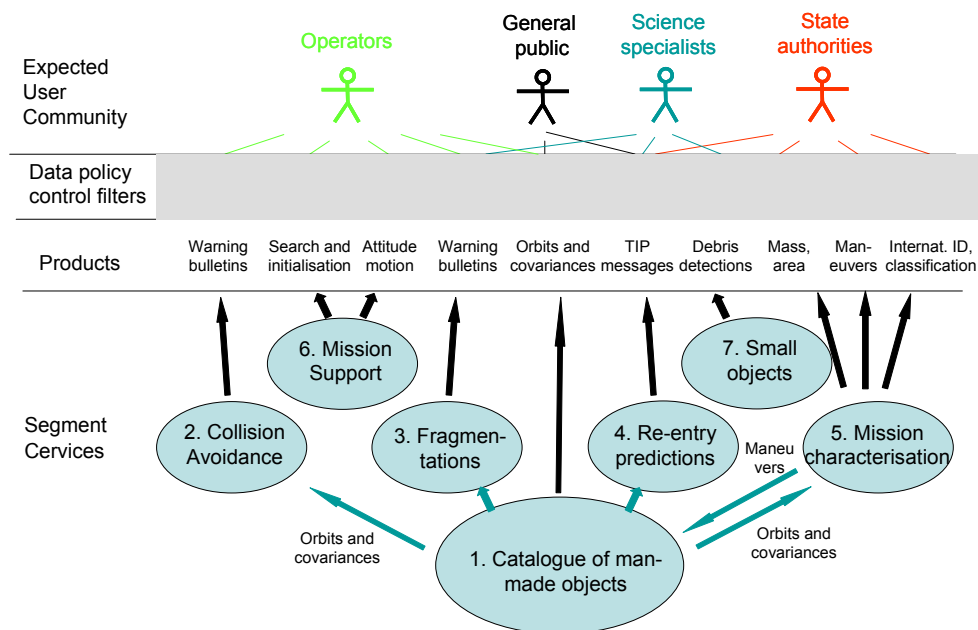
En 2014, el Parlamento Europeo y el Consejo aprobaron la Decisión 541/2014/EU [33] que establece el marco actual del sistema europeo VSE. En esta decisión establece que la operación de las instalaciones está a cargo de un consorcio de entidades nacionales de los países miembros [34], mientras que la provisión de servicios es competencia del Centro de Satélites de la Unión Europea (SatCen) bajo el mando del Alto representante de la Unión para Asuntos Exteriores y Política de Seguridad. El consorcio de entidades de los países miembros se estableció el año siguiente, en 2015, y está constituido por DLR (Alemania), CNES (Francia), UK Space (Reino Unido), ASI (Italia) y CDTI (España). Cada estado miembro ha puesto a disposición del sistema europeo de VSE una serie de sensores, y para 2018 ha de demostrar la capacidad para el procesamiento de la información procedente de estos sensores. Alemania y Francia disponían de redes de VSE y mantenían una colaboración bilateral desde 2006. En esta red se encuentran el radar bi-estático GRAVES [35], desarrollado en los 90 por ONERA, antenas de seguimiento SATAM [36], los telescopios TAROT (CNES) [37] y el alemán TIRA [38], más potente y preciso pero adecuado únicamente para labores de seguimiento, no de vigilancia. En Francia, el Systeme de Commandement et de Conduite des Operations Aeriennesair (SCCOA) del ejército del aire es el encargado del procesado de la información. Este se realiza en el centro de seguimiento Cosmos (Centre Operationnel de Surveillance Militaire des Objets Spatiaux) [39], que espera poder desarrollar un sistema propio de información Space Information System (SIS). Por su parte, en Alemania, el ejército del aire y el DLR han llegado a un acuerdo para crear el German Space Situational Awareness Center (GSSAC) en Udem de carácter dual, civil y militar [38]. Además de TIRA, GESTRA (German Experimental Surveillance and Tracking Radar) forma parte de la contribución alemana. El Reino Unido, por su parte, participa, al mismo tiempo que en el consorcio europeo, en la iniciativa Five Eyes Combined Space Operations que reúne a Australia, Canadá, Nueva Zelanda, EEUU y el Reino Unido [40]. Algún ejemplo de los trabajos llevados a cabo en el Reino Unido se puede encontrar en [41]. En Italia, se ha creado un órgano, OCIS (Organismo di Coordinamento e di Indirizzo delle attività relative all'iniziativa "Space Surveillance and Tracking Support"), que reúne ejército (AM), instituto nacional de astrofísica (INAF) y la agencia espacial italiana (ASI), encargado de la coordinación de las actividades VSE [42]. Los sensores italianos que entran en la red europea son el radio telescopio Croce del Nord en Bolonia, así como un nuevo radio telescopio en Cerdeña (Sardinia Radio Telescope).

En los últimos años, España realizó un esfuerzo significativo dentro del marco del programa SSA de la ESA, si bien no de manera sostenida. En estos años, la industria española se ha posicionado adquiriendo una notable capacidad tecnológica e industrial. De hecho, de acuerdo a TEDAE, en 2013 se esperaba un crecimiento del sector de un 140 % siendo el sector espacial con más crecimiento en esta década. La academia española también ha iniciado o continuado líneas de investigación en este ámbito. En el apartado 4, revisamos algunos de los trabajos llevados a cabo.

#### 4. Requisitos y retos tecnológicos

Durante el programa preparatorio de la ESA se estudió el diseño del futuro sistema europeo de vigilancia y seguimiento (ESSAS) [43]. Los elementos de diseño que se consideraron como críticos para la evaluación del coste del sistema y su calidad del servicio proporcionado son el tamaño mínimo de objeto a seguir, la calidad de la información orbital y la complejidad tecnológica del sistema [44]. Uno de los requisitos de alto nivel del sistema [45] se refería a la capacidad para ayudar a la operación segura de los vehículos espaciales así como una gestión activa del riesgo. Este requisito se traduce en la necesidad de identificar y emitir avisos de posible colisión catastrófica con el tiempo necesario para actuar. La definición de colisión catastrófica permite entonces definir los tamaños mínimos de los objetos que han de ser seguidos en función del régimen orbital. Una de las conclusiones que se extrae de [46] es que, en las órbitas LEO críticas, es necesario seguir objetos de más de 5 cm a una altura de 800 km con una precisión de decenas de metros para cumplir con los requisitos establecidos. Estos requisitos se plasmaron en el documento [47]. Un análisis pormenorizado de las implicaciones tecnológicas de los mismos (en términos de la precisión necesaria) se recoge en [48]. La arquitectura del sistema propuesta responde a las necesidades establecidas por el Consejo de la ESA en [45] y están basadas en la existencia y mantenimiento de un catálogo. Asimismo, también se llevaron a cabo estudios acerca de la gobernanza del sistema y de la política de gestión de datos [49].

Figura 1. Sketch of the ESSAS services [46]



Por su parte, los informes que asesoraron la toma de Decisión del Parlamento Europeo y el Consejo definen el riesgo en términos económicos [50]. El impacto esperado de la política establecida en la Decisión es de una reducción del riesgo en un factor de 3 a 5. Los requisitos de alto nivel planteados no han seguido un proceso similar al de el ESSAS y no se han traducido en términos cuantitativos de las

capacidades necesarias del sistema, y se centra, en esta fase inicial, en conseguir la operación integrada de los distintos actores.

En cualquiera de las aproximaciones, la capacidad de proporcionar un servicio adecuado se traduce en la capacidad para mantener un catálogo preciso y lo más amplio posible, y proporcionar la información a los agentes interesados en el momento adecuado [51]. En Europa, distintas campañas de observación llevadas a cabo por la ESA (entre otros) han demostrado la capacidad para generar y procesar medidas de sensores de VSE y generar un catálogo [52]. En este sentido, el principal reto pendiente se cifra en demostrar la capacidad para el mantenimiento de las actividades de VSE y la provisión de los servicios de manera eficiente [53]. En el contexto de un sistema ya operativo, como el americano, el listado de retos a la hora de ampliar el catálogo tiene que ver tanto con los sensores como con la cadena de procesado de datos hasta el usuario final. La Secure World Foundation produjo en 2010 dos trabajos que tratan ambos aspectos de manera separada: en [28] se habla de las necesidades de los sensores, mientras que en [54] se discuten las necesidades de mejora en el procesamiento de datos.

#### *4.1. Sensores*

Un aspecto crítico en el diseño de una red de sensores VSE es su distribución geográfica. Dado que la instalación de sensores en tierra no está directamente relacionado con aspectos técnicos, no se discutirá en este trabajo. Habitualmente se considera que los radares son los sensores adecuados para realizar la detección (y seguimiento) en LEO y los telescopios terrestres los son para órbita GEO. Los telescopios ópticos también cubrirían las MEO, aunque las densidades de space debris en ese área son menores. En general, los telescopios ópticos hacen uso de tecnologías más asequibles y son preferibles siempre que las necesidades lo permiten. Sin embargo, esta categorización por regiones del espacio cubiertas no está completamente cerrada. Por una parte, históricamente, los telescopios se han utilizado también para realizar tareas de VSE en LEO [55]. Además, existen tecnologías que se están explorando como complementarias a las existentes: el uso de medidas láser y de telescopios espaciales.

La investigación relacionada con radar habitualmente tiene un nivel de seguridad alta, con lo que no toda la información es pública. No obstante, una revisión de las técnicas radar para VSE se puede encontrar en [56]. De la información publicada podemos inferir que la investigación está dirigida a conseguir sistemas escalables y eficientes tanto para radares de vigilancia como de seguimiento. En este campo, el desarrollo más significativo es la renovación del Air Force Space Surveillance System (AFSSS) por una nueva Space Fence con capacidades de vigilancia y seguimiento. El nuevo sistema desarrollado por Lockheed Martin será operativo en 2019, el coste ascenderá a \$ 914.7 millones [57] y permitirá mejorar la capacidad del sistema en varios ordenes de magnitud [58].

En cuanto a los telescopios ópticos terrestres, existe una mayor cantidad de información disponible. Asimismo, se trata de una tecnología madura. De hecho, desde los años 80 el Ground Based-Electro-Optical Deep Space Surveillance (GEODSS) [59,60] proporciona cobertura global de la órbita geostacionaria ([28]), si bien la utilización de sensores ópticos terrestres para VSE en MEO y LEO presenta requisitos más demandantes. La detección y seguimiento de desechos espaciales con telescopios ópticos comparte instrumentación y metodologías con la utilización de los telescopios para observación científica, aunque presenta elementos distintivos. La mejora de las prestaciones de estos

sensores puede provenir de la mejora en los instrumentos utilizados, en el procesado de las medidas para la generación de datos y en diseño e instalación de sensores ópticos colaborativos. Los retos a superar para mejorar la detección y precisión de las medidas de objetos GEO están descritas en detalle en este trabajo [61]. Respecto al primer punto de los mencionados, los parámetros clave para la definición de las prestaciones del sensor son el field of view y la apertura, relacionada con la complejidad y la sensibilidad del instrumento [55]. Los trabajos de investigación más recientes están dirigidos a la mejora de la sensibilidad y a producir búsquedas rápidas. Un programa de desarrollo en el que algunas de estas nuevas tecnologías han sido probadas es el Space Surveillance Telescope de DARPA [62]. En él, se ha combinado una cámara CCD de superficie curva con un telescopio Mersenne-Schmidt de apertura 3.5 m. En Europa, la ESA ha llevado a cabo un estudio de un telescopio el Fly-Eye Telescope Core Technology, para detección de NEOs que puede también ser utilizado para tareas VSE [63]. En España, el CDTI ha publicado un documento que recoge las capacidades de la industria en observación astronómica [64]. En cuanto a investigación y desarrollo, se han producido avances en la operación autónoma de telescopios dedicados a VSE [65]. Además, se ha llevado a cabo la implementación de un banco de pruebas para la validación de un sistema de observación autónomo en un escenario realista [66].

La investigación relacionada con los sensores ópticos no se limita únicamente a su instrumentación y a los elementos físicos que los componen. En particular, se han llevado a cabo análisis de redes de sensores ópticos para VSE que pueden trabajar de manera colaborativa. La utilización de sensores en red permitirían obtener prestaciones adecuadas utilizando instrumentos menos sofisticados, y por tanto, reduciendo el coste. Además, podría permitir mejorar las prestaciones de los sistemas ópticos para competir con los radar en el seguimiento de objetos en LEO [67]. El diseño y planificación de las observaciones en estas redes estaría sujeta a optimización [68]. En los últimos años, por ejemplo, se han definido criterios de diseño basados en la efectividad para la determinación de órbita [69]. En la misma línea de reducción de coste, la tecnología CMOS [70,71] se está explorando como alternativa a la CCD.

Habitualmente las tareas de procesamiento de datos relacionados con la generación de información útil para la determinación de órbita se considera ligado al sensor. En el caso de telescopios ópticos, la reducción astrométrica forma parte de este proceso. En el campo de la observación astronómica, se desarrolló en las últimas décadas software que realiza estas tareas como IRAF [72], ESO-MIDAS [73] o IDL [74]. No obstante, las tareas de VSE presentan unas necesidades específicas [75]. Existe actualmente software desarrollado específicamente para estas tareas. Por ejemplo, Apex II que es una plataforma software abierta para el procesado de imágenes astronómicas desarrollado por la Academia de Ciencias Rusa. También existen servicios de calibración astrométrica como Astrometry.net utilizado en un proyecto conjunto entre ASI y la Universidad de Bolonia [76]. Existe una iniciativa de la ESA para estandarizar y mejorar las técnicas de reducción astrométrica [77,78].

Un grupo muy activo en el campo de la observación y generación de información relevante para la determinación de órbita es el de la Universidad de Berna. Un resumen detallado de los desarrollos llevados a cabo por este grupo en los años 2000 se puede encontrar en la tesis [79]. Han realizado diferentes campañas de observación usando el ESA's Space Debris Telescope situado en Tenerife [80, 81]. En la misma línea, en Francia, en la década pasada, se han llevado a cabo mejoras para la red de telescopios TAROT [82]. En los últimos años, académicos chinos se han mostrado muy activos en este



campo presentando nuevos algoritmos para la observación de desechos espaciales[83]. También existe investigación en España relacionada con este tema [84].

Finalmente, revisamos otras tecnologías que también se están utilizando en el campo del seguimiento de objetos espaciales. Por una parte, la utilización de medidas laser para la determinación de órbita de satélites cooperativos se ha convertido en habitual. Una revisión de los trabajos llevados a cabo por la ESA para el uso de laser ranging en actividades de VSE se puede encontrar en [85]. Por otra parte, el uso de tecnología de imagen infrarroja se ha propuesto para la caracterización de desechos espaciales [86]. La integración de la información proveniente de diferentes sensores se ha explorado en el campo de la identificación y caracterización de los objetos espaciales [87].

#### *4.2. Procesamiento de datos y operación*

Los datos en bruto proporcionados por los sensores han de ser procesados para generar información orbital relevante de los objetos identificados. Parte de ese procesado está ligado al tipo de sensor, y por ello se ha tratado en el sub-apartado anterior. No obstante, existen trabajos que exploran procesados de datos que hace uso de filtros de imagen como el Matched Filter (MF) y embeben la dinámica del objeto de manera que permitiría realizar la determinación de órbita en un único paso [88]. En todo caso, en un sistema en red, este procesado podría estar centralizado. La parte del procesado que es común a todos los sensores es la determinación de órbita a partir de las observaciones. Un ejemplo de la cadena completa de procesado se puede encontrar en este trabajo [89].

Los retos tecnológicos que se mencionan en [54] tienen que ver con la determinación de órbita precisa y con la propagación de la incertidumbre en el contexto de la VSE. La tesis de este trabajo es que es necesario mejorar las teorías analíticas en las que se basa el sistema Two Line Elements, para que la información orbital sea más útil y precisa. Sobre los retos actuales de la astrodinámica asociados al space surveillance and tracking versa el trabajo de Alfriend y Scheeres [90]. En Europa, existen iniciativas en la comunidad de astrodinámica para tratar dichos retos, como por ejemplo la conferencia Key Topics in Orbit Propagation Applied to Space Situational Awareness (KEPASSA). Existen trabajos encaminados a mejorar la propagación de las trayectorias de los objetos espaciales [91,92], así como la incertidumbre asociada a su estado [93].

### **5. Conclusiones**

El uso del espacio para aplicaciones terrestres ha convertido a los satélites artificiales que proporcionan esos servicios en infraestructuras sensibles para cualquier nación desarrollada. La interrupción de estos servicios puede comprometer un número muy alto de actividades tanto civiles como militares. La protección de los activos espaciales se cifra en evitar colisiones de los vehículos espaciales operativos con otros objetos, operativos o no, así como la protección frente a fenómenos solares y a interferencias intencionadas desde Tierra (en tiempos de la Guerra Fría también se consideró la posibilidad de evitar un ataque con misil balístico desde Tierra). En este trabajo, se pone el foco en el primero de los riesgos. Las actividades conducentes a evitarlo se engloban dentro de las actividades de vigilancia y seguimiento espaciales (SST, en sus siglas en inglés). Aunque la competencia reside en los Estados, la protección de los activos espaciales es una tarea que requiere de cobertura global y que,

por lo tanto, es una actividad llamada a ser de cooperación internacional. No obstante, la provisión de un servicio global para evitar colisiones en el espacio requeriría compartir datos sensibles o clasificados entre distintas naciones. En la ONU existen iniciativas encaminadas en esta dirección, pero hasta el momento únicamente existen sistemas nacionales de SST.

Actualmente, el sistema de SST más completo y con mayor cobertura es el USSTRATCOM. USSTRATCOM proporciona servicios relacionados con evitar colisiones. No obstante el sistema adolece de determinadas carencias y puede ser objeto de mejoras. De hecho, de acuerdo a informes de la Administración estadounidense, el presupuesto anual dedicado al mantenimiento y mejora de SST será de \$500 M en el periodo 2015-2020. Por su parte los costes asociados a la operación de sensores, catalogación de objetos y servicios asociados es de alrededor de la misma cantidad en el mismo periodo (esto es, \$500 M en el periodo 2015-2020) Existen otros sistemas nacionales de vigilancia y seguimiento espaciales de la Federación Rusia.

En Europa, las tareas de SST las llevó a cabo la ESA desde la oficina de Space Debris, que nació a finales de los 90. A partir de 2008, ha llevado a cabo una actividad específica en VSE dentro del programa SSA (Space Situational Awareness) conducente a desarrollar un sistema europeo que cuente con determinada autonomía. No obstante, durante ese mismo periodo, dentro de la Unión Europea, se ha ido adquiriendo conciencia de la necesidad de una política europea del espacio, y, en particular, de la importancia de la protección de los activos espaciales europeos. En esa línea, en 2014 una decisión conjunta de la Comisión y el Parlamento estableció un programa para lograr autonomía en materia de servicios SST. La competencia para llevarlo a cabo recae en un Consorcio de entidades de países miembros, encargados de proveer al SatCen con datos para su distribución en forma de servicios. Para poder pertenecer al Consorcio es necesario poseer y demostrar determinadas capacidades en SST. En 2015, se ha formado ese Consorcio al que pertenecen Francia, Alemania, Italia, Reino Unido y España. No obstante, existen incógnitas acerca del futuro funcionamiento del sistema europeo de SST, tanto en términos de requisitos del sistema, como funcionamiento operativo del mismo.

España está trabajando en adecuar sus infraestructuras para cumplir los requisitos necesarios para formar parte del Consorcio. Se ha diseñado un programa específico para ese fin basándose en la experiencia previa de la ESA, la industria e instituciones españolas. Es difícil predecir la situación del SST en el ámbito internacional en el futuro próximo. Hay distintos agentes que activamente están desarrollando programas de SST de manera independiente. Incluso dentro de la UE, la evolución de los programas en los próximos años no está completamente definida. Es por ello necesario estudiar los escenarios que describan la posible situación en la que se encuentre el SST en los próximos años.

## **Agradecimientos**

Los autores quieren agradecer el valioso asesoramiento prestado por Noelia Sánchez Ortiz (Deimos Space), Javier Montojo (ROA), Gian Maria Pinna (ESA), Alberto Águeda Maté y Diego Escobar (GMV), José Gonzalez (Indra), Francisco Ocaña (ASCEN), Juan Luis Valero y Beatriz Gallardo (SatCen).

## **Referencias**

1. Maj Michael J Muolo, editor. *Space Handbook: A War Fighter's Guide to Space*. DIANE Publishing Company, 1994.
2. J. A. Kennewell and B. N. Vo. An overview of space situational awareness. In *Information Fusion (FUSION), 2013 16th International Conference on*, pages 1029–1036, July 2013.
3. Nicolas Bobrinsky and Luca Del Monte. The space situational awareness program of the european space agency. *Cosmic Research*, 48(5):392–398, 2010.
4. Heiner Klinkrad. *Space debris*. Wiley Online Library, 2010.
5. Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos. Sostenibilidad a largo plazo de las actividades en el espacio ultraterrestre: propuesta de adoptar un primer conjunto de directrices y un plan de trabajo renovado para el grupo de trabajo sobre la sostenibilidad a largo plazo de las actividades en el espacio ultraterrestre de la subcomisión de asuntos científicos y técnicos, 2016.
6. Corinne Contant-Jorgenson, Petr Lála, and Kai-Uwe Schrogl. The IAA Cosmic Study on space traffic management. 2006.
7. Corinne Contant-Jorgenson, Petr Lála, and Kai-Uwe Schrogl. *Cosmic Study on Space Traffic Management*. International Academy of Astronautics, 2006.
8. Dr. Kai-Uwe (DLR) Schrogl. Regulatory aspects for launch activities in a future space traffic management regime. In *57th International Astronautical Congress*, International Astronautical Congress (IAF). American Institute of Aeronautics and Astronautics, oct 2006.
9. Kai-Uwe Schrogl. Space traffic management: The new comprehensive approach for regulating the use of outer space - Results from the 2006 IAA cosmic study. *Acta Astronautica*, 62(2):272–276, 2008.
10. Johanna Catena. Legal aspects relating to disarmament, space control, space situational awareness and international space traffic management. volume 51, page 221, 2008.
11. Anneliee Schoemaker. Space traffic management for the moon and the development of space law. volume 50, page 570. HeinOnline, 2007.
12. N.R.F. Al-Rodhan. *Meta-Geopolitics of Outer Space: An Analysis of Space Power, Security and Governance*. St Antony's. Palgrave Macmillan, 2012.
13. David Vallado and Jacob D. Griesbach. Simulating space surveillance networks. In *Paper AAS 11-580 2011/08 AAS/AIAA Astrodynamics Specialists Conference*, Girdwood, AK, USA, 2011.
14. I. Molotov, V. Agapov, R. Zalles, V. Voropaev, V. Zolotov, T. Kokina, F. J. Montojo, and T. Namkhai. Current status of the ISON optical network. In *40th COSPAR Scientific Assembly*, volume 40 of *COSPAR Meeting*, 2014.
15. Space data association web site. <http://www.space-data.org/sda/>. accessed 26th July 2016.
16. U.s. strategic command web site. [https://www.stratcom.mil/factsheets/11/Space\\_Control\\_and\\_Space\\_Surveillance/](https://www.stratcom.mil/factsheets/11/Space_Control_and_Space_Surveillance/). accessed 26th July 2016.
17. Duane Bird. Sharing space situational awareness data. Technical report, DTIC Document, 2010.
18. JC Liou and D Shoots. Satellite collision leaves significant debris clouds. *Orbital Debris Quarterly News*, 13(2), 2009.
19. US Government Accountability Office. Space situational awareness: Status of efforts and planned budgets. Technical report, oct 2015.

20. Global security web site. <http://www.globalsecurity.org/space/world/russia/space-surveillance.htm>. accessed 26th July 2016.
21. Brian C Weeden and TS Kelso. Analysis of the technical feasibility of building an international civil space situational awareness system. In *Proceedings of the International Astronautical Congress 2009. IAC - 09 A6 5.2*.
22. Valery Dicky, Nicholas Johnson, Yuri Tretyakov, Stanislav Veniaminov, Vladimir Zavaliy, and Zakhari Khutorovsky. Comparative analysis of the russian and united states space object catalogs. In *Proceedings of the Fourth US-Russian Space Surveillance Workshop*, pages 23–27, 2000.
23. Anastasia Edelkina, Oleg Karasev, and Natalia Velikanova. Space policy strategies and priorities in russia. *Higher School of Economics Research Paper No. WP BRP*, 37, 2015.
24. Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos. Reflexiones acerca del conjunto de requisitos y factores principales que deberían conformar la política de intercambio de información a nivel internacional al servicio de la seguridad de las operaciones espaciales, 2016.
25. Comisión sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos. Examen de las oportunidades de lograr en viena un consenso sobre la seguridad espacial que comprenda varias esferas de reglamentación, 2016.
26. Inter-agency space debris coordination committee web site. <http://www.iadc-online.org/>. accessed 26th July 2016.
27. Inter-Agency Space Debris Coordination Committee et al. Iadc space debris mitigation guidelines. URL: [http://www.iadc-online.org/Documents/Docu/IADC\\_Mitigation\\_Guidelines\\_Rev1\\_Sep07.pdf](http://www.iadc-online.org/Documents/Docu/IADC_Mitigation_Guidelines_Rev1_Sep07.pdf) [c ited: 20 July 2011], 2007.
28. Brian Weeden, Paul Cefola, and Jaganath Sankaran. Global space situational awareness sensors. In *2010 Advanced Maui Optical and Space Surveillance Conference, Maui, Hawaii*, 2010.
29. Sst esa web site. <http://sst.ssa.esa.int/>. accessed 26th July 2016.
30. ESA. [www.esa.int/Our\\_Activities/Operations/Space\\_Situational\\_Awareness/SSA\\_Programme\\_overview](http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Space_Situational_Awareness/SSA_Programme_overview), 31 de Julio de 2016.
31. Commission of the European Communities. White paper:space: a new frontier for an expanding union. com(2003) 673, 2003.
32. Xavier Pasco. Space and security: Building a european approach. In UNIDIR, editor, *Proceedings of the Space Security Conference*.
33. Decision No 541/2014/EU of the European Parliament, of the Council of 16 April 2014 establishing a Framework for Space Surveillance, and Tracking Support. L 158/227. *Official Journal of the European Communities*, 2014.
34. Commission of the European Communities. Commission implementing decision of 12.9.2014 on the procedure for participation of the member states in the space surveillance and tracking support framework, 2014.
35. Th Michal, JP Eglizeaud, and J Bouchard. Graves: the new french system for space surveillance. In *4th European Conference on Space Debris*, volume 587, page 61, 2005.
36. Brigadier General Jean-Daniel Testé. Ssa : first priority of french military space policy 2025. <http://www.jsforum.or.jp/stableuse/pdf/15.%20Teste.pdf>. Japan Space Forum.

37. Myrtille Laas-Bourez, David Coward, Alain Klotz, and Michel Boer. A robotic telescope network for space debris identification and tracking. *Advances in Space Research*, 47(3):402–410, 2011.
38. LtCol (GS) Lars Wilhelmy. Ssa challenges and germany’s contribution to an international approach. 11th Military Space Situational Awareness, London, April 2016.
39. François Laporte and Monique Moury. Cnes role in french space surveillance. 11th Military Space Situational Awareness, London, April 2016.
40. HM Government. National security strategy and strategic defence and security review 2015. 4.152 [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/478933/52309\\_Cm\\_9161\\_NSS\\_SD\\_Review\\_web\\_only.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/478933/52309_Cm_9161_NSS_SD_Review_web_only.pdf).
41. JD Eastment, DN Ladd, CJ Walden, RP Donnelly, A Ash, NM Harwood, C Smith, JC Bennett, I Ritchie, M Rutten, et al. Technical description of radar and optical sensors contributing to joint uk-australian satellite tracking, data-fusion and cueing experiment. In *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, volume 1, page 12, 2014.
42. Asi web site. <http://www.asi.it/it/news/sst-firmato-laccordo-nasce-il-consorzio>. accessed 26th July 2016.
43. N Bobrinsky and L Del Monte. The space situational awareness program of the European Space Agency. *Cosmic Research*, 48(5):392–398, 2010.
44. Holger Krag, Heiner Klinkrad, T Flohrer, and E Fletcher. The european surveillance and tracking system—services and design drivers. 2010.
45. ESA Council. Declaration on the space situational awareness (ssa) preparatory programme. *ESA/C*, 192, 2008.
46. Holger Krag, Heiner Klinkrad, Tim Flohrer, Emmet Fletcher, and Nicolas Bobrinsky. The european space surveillance system—required performance and design concepts. In *Proceedings of the 8th US/Russian Space Surveillance Workshop, Space Surveillance Detecting and Tracking Innovation, Maui, Hawaii, USA*, 2010.
47. Mission requirements document. SSA-GEN-RS-MRD-1000, Issue 1, Revision 2, 01/09/2010.
48. Noelia Sánchez-Ortiz and Holger Krag. Required accuracy for a reliable space objects collision avoidance assessment within the european space situational awareness system. In *Proceedings of the European Space Surveillance Conference*, 2011.
49. Xavier Pasco. Study on suitable governance and data policy models for a european space situational awareness (ssa) system. Technical report, ESA Contract n° 21443/08/F/MOS, 2008.
50. Commission Staff Working Document SWD(2013) 55. Impact assessment. *Annex to the Proposal for a Decision of the European Parliament and of the Council establishing a space surveillance and tracking support programme*, 2013.
51. E Olmedo and N Sánchez-Ortiz. Space debris cataloguing capabilities of some proposed architectures for the future european space situational awareness system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 403(1):253–268, 2010.
52. Alberto A Águeda Mate, I Juárez Villarés, P Muñoz Muñoz, and FM Martínez Fadrique. Ssasim: An earth-orbiting objects catalogue maintenance simulator. In *Fifth European Conference on Space Debris, ESOC, Darmstadt, Germany*, volume 30, 2010.

53. Diego Escobar, Alberto Águeda, Luis Martín, and Francisco M Martínez. Efficient all vs. all collision risk analyses. In *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, volume 1, page 32, 2011.
54. Paul J Cefola, Brian Weeden, and Creon Levit. Open source software suite for space situational awareness and space object catalog work. In *4th International Conference on Astrodynamics Tools Techniques, Madrid, Spain*, pages 3–6, 2010.
55. M Shoemaker and L Shroyer. Historical trends in ground-based optical space surveillance system design. In *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, volume 1, page 1, 2007.
56. J. Ender, L. Leushacke, A. Brenner, and H. Wilden. Radar techniques for space situational awareness. In *2011 12th International Radar Symposium (IRS)*, pages 21–26, Sept 2011.
57. Ilima Loomis. Air force turns a keen eye on space junk. *Science*, 347(6218):115–115, 2015.
58. Linda Haines and Phillip Phu. Space fence pdr concept development phase. In *Proc. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Maui, HI*, 2011.
59. WC Jeas and R Anctil. The ground-based electro-optical deep space surveillance/geodss/system. *Military Electronics Countermeasures*, 7:47–51, 1981.
60. Robert F Bruck and Robert H Copley. Geodss present configuration and potential. Technical report, DTIC Document, 2014.
61. Vladimir Koupryanov. Distinguishing features of {CCD} astrometry of faint {GEO} objects. *Advances in Space Research*, 41(7):1029 – 1038, 2008.
62. Deborah Freedman Woods, Ronak Y. Shah, Julie A. Johnson, Alexander Szabo, Eric C. Pearce, Richard L. Lambour, and Walter J. Faccenda. Space surveillance telescope: focus and alignment of a three mirror telescope. *Optical Engineering*, 52(5):053604–053604, 2013.
63. L. Cibirin, M. Chiarini, A. Milani Comparetti, F. Bernardi, R. Ragazzoni, G. M. Pinna, I. Zayer, P. M. Besso, A. Rossi, and F. Villa. Wide Eye Debris telescope allows to catalogue objects in any orbital zone . *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*, 20:50, 2012.
64. *Spanish Capacities in Technologies for Astronomy*. Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial, 2015.
65. Octavi Fors, Jorge Núñez, José Luis Muiños, Francisco Javier Montojo, Roberto Baena-Gallé, Jaime Boloix, Ricardo Morcillo, María Teresa Merino, Elwood C. Downey, and Michael J. Mazur. Telescope fabra roa montsec: A new robotic wide field baker-nunn facility. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 125(927):522, 2013.
66. E. Racero, F. Ocaña, D. Ponz, and the TBT Consortium. Towards an autonomous telescope system: the Test-Bed Telescope project. In A. J. Cenarro, F. Figueras, C. Hernández-Monteagudo, J. Trujillo Bueno, and L. Valdivielso, editors, *Highlights of Spanish Astrophysics VIII*, pages 828–833, May 2015.
67. Peter Zimmer, John T McGraw, and Mark R Ackermann. Real-time surveillance of leo and meo with small optical telescopes. In *2015 Advanced Maui Optical and Space Surveillance Conference, Maui, Hawaii*, 2015.
68. MC López-Casado, CJ Pérez del Pulgar, J Cabello-Castillo, VF Muñoz, O Lara, A Castro-Tirado, J Štrobl, E Maureira, FM Sánchez, and E González. A fuzzy logic based decision algorithm for

- a heterogeneous telescope network. In *Industrial Technology (ICIT), 2015 IEEE International Conference on*, pages 1814–1819. IEEE, 2015.
69. Junling Wang, Tuo Fu, Meiguo Gao, and Shuai Ding. Sensor Scheduling Criterion for Space Surveillance Based on Relative Orbit Analysis. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 36(5):1453–1463, jun 2013.
  70. M Bigas, Enric Cabruja, Josep Forest, and Joaquim Salvi. Review of cmos image sensors. *Microelectronics journal*, 37(5):433–451, 2006.
  71. Munir El-Desouki, M Jamal Deen, Qiyin Fang, Louis Liu, Frances Tse, and David Armstrong. Cmos image sensors for high speed applications. *Sensors*, 9(1):430–444, 2009.
  72. Image reduction and analysis facility web site. <http://iraf.noao.edu/>. accessed 26th July 2016.
  73. Rein H Warmels. The eso–midas system. In *Astronomical Data Analysis Software and Systems I*, volume 25, page 115, 1992.
  74. NASA Goddard Space Flight Center. Idl web site. <http://idlastro.gsfc.nasa.gov/contents.html>.
  75. Vladimir Kouprianov. Advanced image processing techniques for automatic reduction of geo survey data. In *8th US-Russian Space Surveillance Workshop*, 2010.
  76. Jacopo Piattoni, Alessandro Ceruti, and Fabrizio Piergentili. Automated image analysis for space debris identification and astrometric measurements. *Acta Astronautica*, 103:176 – 184, 2014.
  77. Jenni Virtanen, Jonne Poikonen, Tero Säntti, Tuomo Komulainen, Johanna Torppa, Mikael Granvik, Karri Muinonen, Hanna Pentikäinen, Julia Martikainen, Jyri Näränen, Jussi Lehti, and Tim Flohrer. Streak detection and analysis pipeline for space-debris optical images. *Advances in Space Research*, 57(8):1607 – 1623, 2016. Advances in Asteroid and Space Debris Science and Technology - Part 2.
  78. J. Virtanen, T. Flohrer, K. Muinonen, M. Granvik, J. Torppa, J. Poikonen, J. Lehti, T. Santti, T. Komulainen, and J. Naranen. StreakDet data processing and analysis pipeline for space debris optical observations. In *40th COSPAR Scientific Assembly*, volume 40 of *COSPAR Meeting*, 2014.
  79. Caroline Früh. *Identification of Space Debris*. PhD thesis, Universität Bern, 2011.
  80. T. Schildknecht, T. Flohrer, A. Hinze, A. Vananti, and J. Silha. An optical survey for space debris on highly eccentric and inclined MEO orbits. In *40th COSPAR Scientific Assembly*, volume 40 of *COSPAR Meeting*, 2014.
  81. T. Schildknecht, R. Musci, M. Ploner, G. Beutler, W. Flury, J. Kuusela, J. de Leon Cruz, and L. de Fatima Dominguez Palmero. Optical observations of space debris in GEO and in highly-eccentric orbits. *Advances in Space Research*, 34:901–911, January 2004.
  82. Myrtille Laas-Bourez, Gwendoline Blanchet, Michel Boër, Etienne Ducrotté, and Alain Klotz. A new algorithm for optical observations of space debris with the {TAROT} telescopes. *Advances in Space Research*, 44(11):1270 – 1278, 2009.
  83. Rong-Yu Sun and Chang-Yin Zhao. A new source extraction algorithm for optical space debris observation. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 13(5):604, 2013.
  84. Jorge Núñez, Anna Núñez, Francisco Javier Montojo, and Marta Condominas. Improving space debris detection in {GEO} ring using image deconvolution. *Advances in Space Research*, 56(2):218 – 228, 2015.
  85. B Jilete, A Mancas, T Flohrer, and H Krag. Laser ranging initiatives at esa in support of operational needs and space surveillance and tracking. *Laser*, 3:001, 2015.

86. J. Dawson and C. Bankston. Space debris characterization using thermal imaging systems. In *Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, page E40, September 2010.
87. P. D. McCall. *Modeling, simulation, and characterization of space debris in low-Earth orbit*. PhD thesis, Florida International University, 2013.
88. Timothy S Murphy, Marcus J Holzinger, and Brien Flewelling. Orbit determination for partially understood object via matched filter bank. In *AAS/AIAA Astrodynamics Specialists Meeting*, 2015.
89. F.J. Montojo, T. López Moratalla, and C. Abad. Astrometric positioning and orbit determination of geostationary satellites. *Advances in Space Research*, 47(6):1043 – 1053, 2011.
90. Aubrey Poore Kyle T. Alfriend and Daniel J. Scheeres. Uncertainty use and needs in space situational awareness. 2014 SIAM Conference on Uncertainty Quantification.
91. Juan Félix San-Juan, Montserrat San-Martín, Iván Pérez, and Rosario López. Hybrid perturbation methods based on statistical time series models. *Advances in Space Research*, 57(8):1641 – 1651, 2016. *Advances in Asteroid and Space Debris Science and Technology - Part 2*.
92. Alessandro Morselli. *High order methods for Space Situational Awareness*. PhD thesis, 2014.
93. Roberto Armellin, Alessandro Morselli, Pierluigi Di Lizia, and Michèle Lavagna. Rigorous computation of orbital conjunctions. *Advances in Space Research*, 50(5):527–538, 2012.