

VIGILANCIA Y SEGUIMIENTO DE OBJETOS ESPACIALES

VIGILANCIA Y SEGUIMIENTO DE OBJETOS ESPACIALES

**Análisis del marco institucional y de
las principales líneas de desarrollo e
investigación actuales**

Red Horizontes. Espacio

CONTRIBUTORS

M. SANJURJO Universidad Carlos III de Madrid
P. FAJARDO Universidad Carlos III de Madrid

Índice general

Sumario Ejecutivo	IX
Acrónimos	XIII
1 Introducción	1
2 Situación internacional del SST	5
3 Actual desarrollo y marco institucional de SST en Europa	7
4 Requisitos y retos tecnológicos	11
4.1. Sensores	13
4.2. Procesamiento de datos y operación	15
5 Posibles escenarios futuros	17
6 Conclusiones	21
Agradecimientos	23
Bibliografía	25

SUMARIO EJECUTIVO

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 ¹. La protección de infraestructuras críticas ² se enmarca dentro de las competencias de seguridad de los Estados, y forma parte de los planes de defensa tanto en guerras convencionales como en planes antiterroristas. En el documento “Estrategia de seguridad nacional 2017” se menciona “el incremento en basura espacial” como un potencial riesgo para la seguridad del “espacio ultraterrestre”. La protección de los activos espaciales incluye 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 (el análisis del riesgo de este tipo de actividades, como el ataque de un misil balístico anti-satélite, tuvieron relevancia en los últimos años de la Guerra Fría). 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 sensores globalmente distribuidos, y 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 del intercambio de datos sensibles o clasificados entre distintas naciones. En la ONU

¹ Así como un alto impacto económico. De acuerdo a un comunicado de la Comisión Europea [43] que en 2011 estimaba que entre el 6 y el 7 % del producto interior bruto europeo se basaba en las aplicaciones de la navegación por satélite

² Si bien las plataformas espaciales no merecen actualmente esta consideración en la Unión Europea [28], que conlleva la necesidad de elaborar planes de seguridad específicos para su protección.

existen iniciativas encaminadas en esta dirección, pero hasta el momento los sistemas de SST son nacionales.

Actualmente, el sistema de SST más completo y con mayor cobertura es el estadounidense U.S. Strategic Command (USSTRATCOM). USSTRATCOM proporciona servicios a operadores de satélites en todo el mundo. No obstante, el sistema adolece de determinadas carencias y está siendo 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 M\$ 500 en el periodo 2015-2020. Por su parte, los costes asociados a la operación de los sensores, la catalogación de objetos y los servicios asociados es de alrededor de la misma cantidad en el mismo periodo (esto es, M\$ 500 para el periodo 2015-2020). Desde el año 2015, la Federal Aviation Authority es responsable de los servicios front desk para operadores y estados. Existen también sistemas nacionales de vigilancia y seguimiento espaciales en Rusia, China o Europa, pero con menores capacidades, o que no prestan este tipo de servicio.

En Europa, las tareas de SST han estado ligadas a la ESA, en particular desde la oficina de Space Debris, que nació a finales de los 90. Durante los años 2000 ha llevado a cabo una actividad recogida en los sucesivos programas preparatorios, conducentes a desarrollar un sistema europeo que cuente con un cierto grado de autonomía. No obstante, durante ese mismo periodo, dentro de la Comisión 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, la Decisión de la Comisión No. 541/2014/EU [86] establece que las competencias para dar servicios de SST en la EU corresponderá a un Consorcio de países miembros, encargados de proveer al European Union Satellite Centre (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 de funcionamiento operativo del mismo.

España adecuó sus infraestructuras con el objetivo de cumplir los requisitos necesarios para formar parte del Consorcio. El programa Spanish Space Surveillance and Tracking (S3T) está diseñado para ese fin basándose en la experiencia previa de los programas de la ESA, la industria e instituciones españolas [47]. Es difícil predecir la situación del SST en el ámbito internacional en el futuro próximo pues existen 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 establecer escenarios que describan la posible situación y evolución del SST en los próximos años.

En este contexto, España puede tener un papel relevante en SST porque dispone de infraestructuras y empresas con capacidad tecnológica para su desarrollo. La acción coordinada de la administración española se puede analizar en cuatro niveles: internacional, política espacial europea, agencia espacial europea y ámbito nacional. Internacionalmente, de la mano de la UE, la administración puede apoyar el establecimiento y ampliación de los acuerdos de intercambio de información para la creación de un marco global de SST, ya sea a través de acuerdos bilaterales o articulados por organismos internacionales. En el ámbito de la política espacial europea, se puede promover activamente el desarrollo de tecnologías asociadas al SST, para que el sistema de SST europeo pueda prestar mejores servicios, y se alcancen los requisitos y especificaciones del sistema que se establezcan. En la ESA, fortalecer el papel de la agencia como asesor tecnológico de la Comisión para

el sistema de SST. La asamblea del Consejo Ministerial de la ESA en 2019, que preside España, puede ser un buen momento para fijar un plan a medio plazo de mejora del sistema SST europeo, que ya está en funcionamiento. En el ámbito nacional, se puede promover y financiar las investigaciones y los desarrollos en tecnologías relacionadas con SST, dentro de los programas estatales existentes. Para lograr alcanzar unos objetivos es conveniente establecer, con los agentes implicados, una hoja de ruta tecnológica con las necesidades que el sistema debe cubrir.

ACRÓNIMOS

AFSSS	Air Force Space Surveillance System
ASI	Agenzia Spaziale Italiana
CCD	Charge-coupled device
CDTI	Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial
CE	Comisión Europea
CMOS	Complementary metal-oxide semiconductor
CNES	Centre national d'études spatiales
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EASA	Agencia de Seguridad Aérea Europea
ESA	European Space Agency
ESP	European Space Policy
ESSAS	European Space Situational Awareness System
FAA	Federal Aviation Administration
GEO	Geostationary Earth Orbit
GEODSS	Ground Based-Electro-Optical Deep Space Surveillance
GESTRA	German Experimental Surveillance and Tracking Radar
IADC	Inter-Agency Space Debris Coordination Committee
ISAR	Inverse synthetic aperture radar

ISON	International Space Optical Network
JFCC Space	Joint Functional Component Command for Space
JICSpOC	Joint Interagency Combined Space Operations Center
JSpOC	Joint Space Operations Center
KIAM	Instituto Keldysh de Matemática Aplicada de la Academia de Ciencias Rusa
LEO	Low Earth Orbit
MEO	Medium Earth Orbit
NEO	Near Earth Object
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
ROSAT	ROentgen SATellite
S3T	Spanish Space Surveillance Tracking
SatCen	European Union Satellite Centre
SDA	Space Data Association
SSA	Space Situational Awareness
SST	Space Surveillance and Tracking
STM	Space Traffic Management
UARS	Upper Atmosphere Research Satellite
VSE	Vigilancia y seguimiento espaciales

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Históricamente, la vigilancia y seguimiento espaciales (SST, en sus siglas en inglés) han estado relacionados con la defensa frente a posibles amenazas procedentes de satélites artificiales o misiles en el contexto de la Guerra Fría [80]. El crecimiento de la población de desechos espaciales (“space debris”) ha ampliado el espectro de las actividades SST a este sector. Actualmente, el objetivo de estas actividades se centra en evitar colisiones órbita de satélites controlados que puedan resultar en una limitación o conclusión precipitada de su misión, así como limitar los riesgos asociados a la re-entrada de objetos espaciales en la atmósfera terrestre. Sucesos recientes han demostrado que los riesgos de colisión en órbita con desechos espaciales son ciertos ¹. Entre los incidentes cabe destacar el caso del satélite operacional Iridium 33, propiedad de Iridium Communications, que fue destruido debido a una colisión catastrófica con el satélite Kosmos 2251 de las Fuerzas Espaciales Rusas, y que no estaba controlado desde 1995. El suceso tuvo lugar el 10 de febrero de 2009 [13]. Más recientemente, el 23 de agosto de 2016, hubo una súbita pérdida de potencia en el Sentinel-1A (satélite de observación de la Tierra del programa Copernicus de ESA-CE) y un cambio súbito de la orientación del satélite. Análisis posteriores (como muestra la figura 1.1) indican que el impacto de un deshecho espacial de sólo unos milímetros de tamaño con un panel solar es la explicación más plausible [40].

Por otra parte, los riesgos asociados a la re-entrada de objetos espaciales ha despertado gran interés debido a recientes acontecimientos. En el verano de 2011, la re-entrada del

¹Para una enumeración de todas los incidentes en los que se ha producido la fragmentación de un satélite en la historia de la astronáutica con el consiguiente aumento exponencial del número de objeto véase [53]

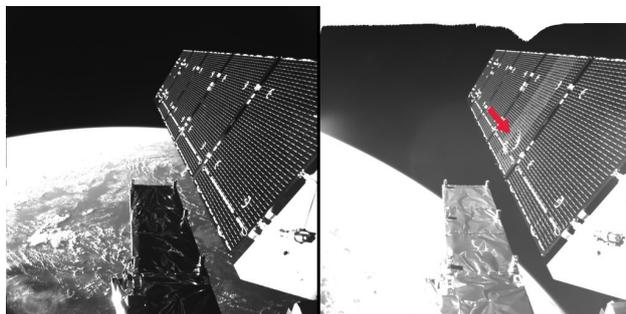


Figura 1.1 Panel solar de Sentinel-1A antes y después del posible impacto

satélite de la NASA UARS (Upper Atmosphere Research Satellite) atrajo la atención de los medios, al creerse que podría poner en peligro regiones habitadas. Este satélite de 5 toneladas de masa finalmente se fragmentó en pedazos durante la re-entrada, llegando a impactar contra el océano Pacífico. Un análisis detallado publicado en 2004 [96], estimaba que a la re-entrada sobrevivirían 26 componentes, con un peso total aproximado de unos 500 kg. El 23 de octubre de 2011, el observatorio astronómico de rayos X del DLR alemán, ROSAT, re-entró en la atmósfera sobre el golfo de Bengala. Los últimos estudios realizados, haciendo uso de herramientas de simulación de fragmentación durante la re-entrada [68], estiman que la masa total que podría alcanzar la superficie es de unos 1700 kg, concentrada en 18 objetos, con un área de impacto de unos 20 m² [14]. En la Nochebuena de ese mismo año, se pudo observar en los cielos europeos una bola de fuego producida por la re-entrada de una etapa del lanzador ruso Soyuz [109]. Un mes antes, en noviembre de 2011, el error en inyección de la misión rusa Phobos-Grunt hizo que las 11 toneladas de combustible tóxico y las 2 toneladas de masa seca (con una pequeña cantidad, 10 μ g de isótopo radiactivo Cobalto-57) re-entrasen en la atmósfera el 15 de enero de 2012. El último análisis estimaba que sobreviviría a la re-entrada una masa total de 200 kg, toda ella seca, distribuida en unos 20 a 30 fragmentos. En Calasparra, Murcia, el 3 de noviembre de 2015, se encontró un objeto de posible procedencia espacial [38]. Algún trabajo ha tratado de identificar el origen de estos objetos, situándolo en una última etapa de un lanzador Centaur con designación 2008-010B [76].

En función de cuál sea el foco, el SST se puede entender como una actividad dedicada a la seguridad (e incluida en los programas de defensa), a la sostenibilidad del uso del espacio cercano (e incluida en los programas de mitigación de desechos espaciales), o de apoyo a la regulación de la operación de satélites (e incluida dentro de los diseños de futuros sistemas de gestión del tráfico espacial), tal y como indica la figura 1.2.

Desde el punto de vista de la seguridad, el objetivo del SST es garantizar la operación segura en el espacio para los satélites en órbita terrestre. 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. En este ámbito, las actividades de SST se enmarcan dentro de un contexto más amplio denominado SSA (Space Situational

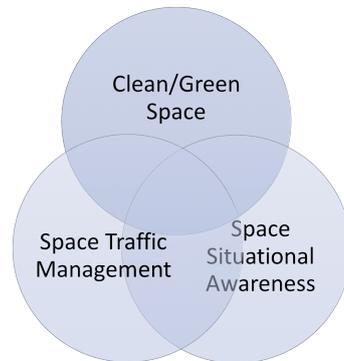


Figura 1.2 Elementos de los que participa la VSE.

Awareness), cuyo objetivo es identificar y prevenir riesgos de origen espacial 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 [19]. El conocimiento preciso del entorno es el primer paso para una evaluación correcta de los riesgos asociados a estos fenómenos.

Las actividades de SST 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 sí 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 [57].

Los problemas asociados al aumento de desechos espaciales requiere de una acción integral para asegurar la sostenibilidad en el uso del espacio cercano. Además de las actividades de SST, es decir, la vigilancia y seguimiento de los objetos; 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 (o deorbitado) 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 [107].

Tanto la gestión en órbitas relevantes como el desarrollo del turismo espacial o la consolidación de las misiones tripuladas como una actividad cotidiana, han desencadena-

²Una discusión más en profundidad del concepto SSA se puede encontrar en [56]

4 INTRODUCCIÓN

do la necesidad de desarrollar posibles sistemas de gestión integral del tráfico espacial. 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 [29]. Este y otros trabajos [102, 103, 21, 101] proporcionan una primera aproximación al problema de la coordinación entre tráficos aéreo y espacial.

El análisis presentado en este documento se enmarca en una serie de trabajos de prospectiva tecnológica en el área espacial dentro del programa Red Horizontes ISDEFE. El objetivo de este trabajo es presentar el contexto internacional y nacional del SST, es decir, desde su marco institucional en Europa y en España, al desarrollo tecnológico existente y los retos futuros.

CAPÍTULO 2

SITUACIÓN INTERNACIONAL DEL SST

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 [115] 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 SST 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 [77]. 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) [5].

Las capacidades de SST en EEUU dependen del US Strategic Command (USSTRATCOM), como se mencionó anteriormente. La misión de control espacial es llevada a cabo por el Joint Functional Component Command for Space (JFCC Space) [7]. 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 estadouni-

denses [17]. Recientemente, se ha establecido el National Space Defense Center (NSDC)¹ para facilitar la distribución de datos entre las distintas agencias que participan en SST. La colisión en 2009 de el satélite Iridium 33 y el Cosmos 2251 [67] puso de manifiesto las limitaciones de los sistemas actuales. De hecho, los 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 [114]. 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 del las fuerzas de defensa aéreas desde 2011. El centro mantiene un catálogo de objetos espaciales [2]. 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 debido a la falta de una distribución geográfica adecuada [124]. 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 [34]. En los próximos años, la mejora del sistema SST no aparece como línea prioritaria de desarrollo en la política espacial de la Federación Rusa [36]. Sí aparece en cambio una mención genérica a la mejora de infraestructuras terrestres [36] 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 SST unificado [106, 105]. 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 otros organismos internacionales relacionados con SST, como ejemplo el Inter-Agency Space Debris Coordination Committee (IADC), formado por las principales agencias espaciales, que realiza actividades relacionadas con mitigación [4]. De hecho, el IADC publica un guía de buena prácticas para tratar de reducir la población de basura espacial en el futuro próximo [27]. Existen a su vez, otras iniciativas de menor calado como la Global Space Situational Awareness Sensor Database de la Secure World Foundation [123].

¹Formerly known as Joint Interagency Combined Space Operations Center (JICSpOC)

CAPÍTULO 3

ACTUAL DESARROLLO Y MARCO INSTITUCIONAL DE SST EN EUROPA

Las actividades de seguimiento y vigilancia espaciales en Europa comenzaron con los programas de “Space Debris” de la ESA. La ESA ha estado activa en estas actividades desde mitad de los años 80 [6]. 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 lanzó un programa preparatorio de SSA para dotar a Europa de un sistema autónomo que proporcionase información acerca de los riesgos espaciales y que permitiese la operación segura de satélites en el espacio cercano [19]. 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€[41]. 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 SST y disponer de la capacidad autónoma para detectar e identificar objetos espaciales [24]. 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 [89]. 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 [86] que establece el marco actual del sistema europeo SST. En esta decisión establece que la operación de las instalaciones está a cargo de un consorcio de entidades nacionales de los países miembros [25], 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 SST una serie de sensores, y en 2018 ha de demostrar la capacidad para el procesamiento de la información procedente de estos sensores. Alemania y Francia disponían de redes de SST y mantenían una colaboración bilateral desde 2006. En esta red se encuentran el radar bi-estático GRAVES [75], desarrollado en los 90 por ONERA, antenas de seguimiento SATAM [111], los telescopios TAROT (CNES) [64] y el alemán TIRA [125], más potente y preciso pero adecuado únicamente para labores de seguimiento, no de vigilancia. En Francia, el *Système de commandement et de conduite des opérations aérospatiales* (SCCOA) del ejército del aire es el encargado del procesado de la información. Este se realiza en el centro de seguimiento , [66], 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 [125]. 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 [48]. Algún ejemplo de los trabajos llevados a cabo en el Reino Unido se puede encontrar en [35]. 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 SST [1]. 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).

Por su parte, en los últimos años, España ha realizado un esfuerzo significativo dentro del marco del programa SSA de la ESA, con el apoyo del Ejército del Aire en las fases iniciales del programa preparatorio. Esto ha generado una notable capacidad tecnológica e industrial, posibilitando la entrada del CDTI como entidad nacional en el sistema europeo de SST, en estrecha colaboración con MINISDEF/DGAM. La entrada en el consorcio ha llevado al desarrollo del sistema español de seguimiento y vigilancia espaciales (S3T en sus siglas en inglés). Una descripción detallada de la arquitectura y los elementos que lo componen se puede encontrar en [47]. Un hecho relevante, a nivel institucional en España, es la acción coordinada que existe entre CDTI, el MINETUR y el MINISDEF, mediante la firma de un convenio de Colaboración para la gestión de la capacidad SST en España. El carácter dual civil-militar de la información generada por los sistemas de SST (mencionada con anterioridad), hace necesaria la participación del MINISDEF y Ejército del Aire en aspectos de operación, procesado y gestión de datos. El MINISDEF, dentro de su ETID (Estrategia Tecnológica de Investigación y Desarrollo), impulsa actividades de investigación en estos tres campos (seguridad, sensores y procesado), lo que permite a la industria de la Defensa colaborar en el desarrollo de la capacidad tecnológica e industrial de SST en

España. Este sector, de acuerdo a TEDAE en 2013, esperaba un crecimiento de un 140 % en esta década, siendo el sector espacial con más crecimiento dentro de un marco general de amplias dificultades para la industria española. Por último, 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.

CAPÍTULO 4

REQUISITOS Y RETOS TECNOLÓGICOS

Los sistemas de SST que nacieron en los años 50 del pasado siglo tenían como objetivo conocer los recursos espaciales de las potencias enemigas. No se diseñaron con el fin de realizar el seguimiento de los desechos espaciales, si bien se han ido adaptando para cubrir nuevas necesidades. En Europa, durante el programa preparatorio de la ESA, se planteó el diseño del futuro sistema europeo de vigilancia y seguimiento (ESSAS) [18] comenzando por establecer los requisitos que debería cumplir dicho sistema. Los elementos de diseño que se consideraron como críticos para la evaluación del coste del sistema y la calidad del servicio proporcionado fueron el tamaño mínimo de objeto a seguir, la precisión de la información orbital y la complejidad tecnológica del sistema [60]. Uno de los requisitos de alto nivel del sistema, definido en el Consejo de la ESA de 2008 [31], hacía referencia a la capacidad de dar soporte 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 [61] 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 [8]. Un análisis pormenorizado de las implicaciones tecnológicas de los mismos (en términos de la precisión necesaria) se recoge en [98]. La arquitectura del sistema propuesta responde a las necesidades establecidas por el Consejo de la ESA en [31] y están basadas en la existencia y mantenimiento de un catálogo. Los servicios asociados al mantenimiento de dicho catálogo, así

como los productos que se podrían proporcionar a los agentes interesados se esquematizan en la figura 4.1. Asimismo, también se llevaron a cabo estudios acerca de la gobernanza del sistema y de la política de gestión de datos [90]. En este estudio se proponía un estructura intergubernamental para la gobernanza del sistema de SSA, compuesta por una Autoridad Supervisora, una organización gestora, y un grupo de trabajo civil-militar basado en el modelo de Eurocontrol. En relación a la política de gestión de datos, el estudio propugna basarse en la experiencia la Organización Marítima Internacional (IMO, en sus siglas en inglés) en el campo de la seguridad marítima. También distingue dos categorías de datos en un sistema SSA: los relacionados con el seguimiento de vehículos espaciales y los relacionados con la monitorización del ambiente espacial (space weather y seguimiento de NEOs).

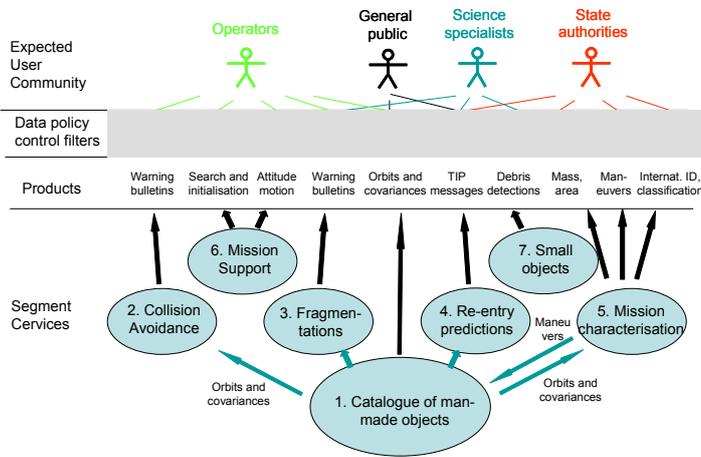


Figura 4.1 Esquema de los servicios ESSAS [61]

Por su parte, los informes que asesoraron la toma de Decisión del Parlamento Europeo y el Consejo definen el riesgo en términos económicos [10] en lugar de tecnológicos. 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 [87]. 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 SST y generar un catálogo [11]. En este sentido, el principal reto pendiente se cifra en demostrar la capacidad para el mantenimiento de las actividades de SST y la provisión de los servicios de manera eficiente [42]. 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 [123] se habla

de las necesidades de los sensores, mientras que en [22] se discuten las necesidades de mejora en el procesamiento de datos. En la figura 4.2, se recoge una descripción funcional de un sistema SSA, en la que la columna de la izquierda relacionada de adquisición de datos se asociaría a los sensores, mientras que la columna del medio describe las distintas funciones dentro del procesado y análisis de datos. En los apartados siguientes se tratan las tecnologías de sensores y procesado de datos de manera independiente.

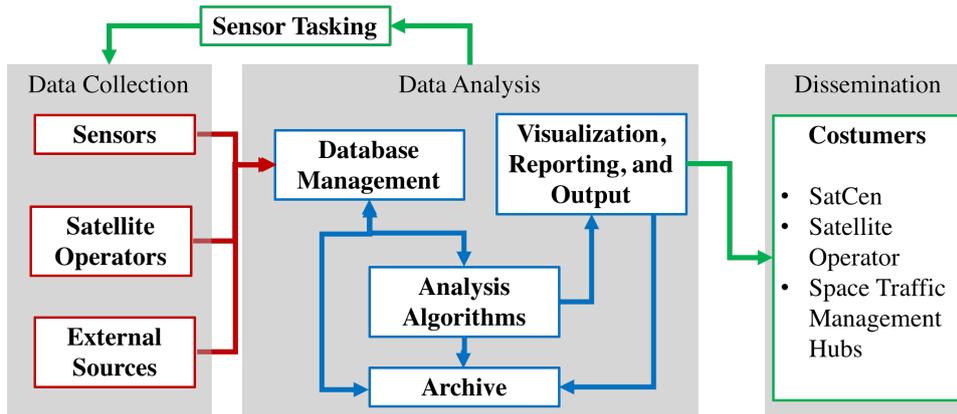


Figura 4.2 Descripción funcional de una sistema de SSA (adaptado de [65])

4.1. Sensores

Un aspecto crítico en el diseño de una red de sensores SST 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 SST en LEO [104]. 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 SST se puede encontrar en [39]. En este trabajo se describe la combinación clásica de *phase array radar* para proporcionar una vigilancia hemisférica completa de objetos conocidos y desconocidos (radar de vigilancia)¹, junto con un radar de antena parabólica a cargo de estimar la posición de objetos específicos con la precisión necesaria para predecir colisión de probabilidad fiables (radar de seguimiento). Ambos sistemas se complementan con

¹Con requisitos tan elevados como tener en el radar de 15000 a 20000 objetos al día, durante al menos 10 segundos, como en el caso del ESSAS radar demonstrator

radars de apertura sintética inversa (ISAR), que proporcionan información visual de los objetos seguidos. Esta información es útil en el procesado de datos, a la hora de determinar la órbita del objeto con mayor precisión. En [39], se discuten las ventajas y desventajas de los diferentes sistemas de radar, y de la combinación más efectiva y eficiente de ellos. Con el estado del arte de 2010, el autor propone mantener la configuración habitual descrita más arriba, con un segmento de seguimiento y otro de vigilancia, junto con el apoyo de otras tecnologías como ISAR para la obtención de información adicional. De la literatura publicada podemos inferir que la investigación está dirigida a conseguir sistemas escalables y eficientes tanto para radares de vigilancia como de seguimiento. En particular, en el caso del phased array radar, transmisor en banda L o S, y receptor digital (beamforming). 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 M\$ 914.7 [69] y permitirá mejorar la capacidad del sistema en varios ordenes de magnitud [50].

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) [51, 20] proporciona cobertura global de la órbita geoestacionaria ([123]), si bien la utilización de sensores ópticos terrestres para SST 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 [58]. 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 [104]. 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 [126]. 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 [23]. En España, el CDTI ha publicado un documento que recoge las capacidades de la industria en observación astronómica [9]. En cuanto a investigación y desarrollo, se han producido avances en la operación autónoma de telescopios dedicados a VSE [44]. 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 [92].

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 [128]. El diseño y planificación de las observaciones en estas redes estaría sujeta a optimización [70]. En los últimos años, por ejemplo, se han definido criterios de diseño basados en la efectividad para la determinación de órbita [121].

En la misma línea de reducción de coste, la tecnología CMOS [16, 37] 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 [3], ESO-MIDAS [122] o IDL [84]. No obstante, las tareas de SST presentan unas necesidades específicas [59]. Existe actualmente software desarrollado específicamente para estas tareas. Por ejemplo, Apex II 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 [91]. Existe una iniciativa de la ESA para estandarizar y mejorar las técnicas de reducción astrométrica [117, 116].

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 [46]. Han realizado diferentes campañas de observación usando el ESA's Space Debris Telescope situado en Tenerife [99, 100]. En la misma línea, en Francia, en la década pasada, se han llevado a cabo mejoras para la red de telescopios TAROT [63]. En los últimos años, académicos chinos se han mostrado muy activos en este campo presentando nuevos algoritmos para la observación de desechos espaciales [110]. También existe investigación en España relacionada con este tema [85].

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 SST se puede encontrar en [52]. Por otra parte, el uso de tecnología de imagen infrarroja se ha propuesto para la caracterización de desechos espaciales [32]. La integración de la información proveniente de diferentes sensores se ha explorado en el campo de la identificación y caracterización de los objetos espaciales [74].

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 [81]. En trabajos subsiguientes se explora el uso de filtros estadísticos multi-Bernoulli para la detección directa de objetos basándose únicamente en la información gráfica [82, 83]. 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 [78].

El mantenimiento del catálogo, una vez generado, es también una tarea compleja. Con el crecimiento en el número de objetos a seguir puede convertirse en el elemento crítico en la cadena de provisión de servicio SST. El problema a que da lugar puede enmarcarse dentro de la categoría de asociación de datos. Este es un problema conocido y tratado desde

los años 70. Métodos de solución tradicionales a este problema son, por ejemplo, el Multiple Hypothesis Tracking (MHT) [94] o el Joint Probabilistic Data Association (JPDA) [45]. En los últimos años se ha propuesto, asimismo, un filtro de Bayes multi-objetivo, que introduce el concepto de Random Finite Sets (RFS) [72]. Este concepto permite diferentes formulaciones del filtro estadístico de Bayes multi-objetivo. Por ejemplo, Probability Hypothesis Density [71], Cardinalized Probability Hypothesis Density [119], Generalized Labeled Multi-Bernoulli [118], y filtros Labeled Multi-Bernoulli [95]. Varios de estos filtros basados en RFS se han utilizado en el seguimiento de objetos espaciales [33, 54]. Una revisión detallada de su uso se puede encontrar en este trabajo [93].

Los retos tecnológicos que se mencionan en [22] tienen que ver con la determinación de órbita precisa y con la propagación de la incertidumbre en el contexto de la SST. 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 [62]. Las cuatro categorías en las que se identifican las necesidades son las ya mencionadas en relación al mantenimiento de catálogo: asociación de datos o tracks / correlación, y detección de maniobras; así como probabilidad de colisión y riesgo de conjunción, y asignación eficiente de tareas al sensor (Sensor Tasking). En Europa, existen iniciativas en la comunidad de astrodinámica para tratar dichos retos. Por ejemplo, se han llevado a cabo trabajos encaminados a mejorar la propagación de las trayectorias de los objetos espaciales [97, 79], así como la incertidumbre asociada a su estado [15]. Los trabajos de la comunidad académica e industrial dedicada a estos problemas se presentan en conferencias tales como European Conference on Space Debris, ESA NEO and Debris Detection Conference o Key Topics in Orbit Propagation Applied to Space Situational Awareness (KEPASSA).

CAPÍTULO 5

POSIBLES ESCENARIOS FUTUROS

Tal y como se ha indicado en la introducción, la relevancia del seguimiento de los desechos espaciales se ha puesto de manifiesto fundamentalmente en las dos últimas décadas. En los últimos años, el interés por disponer de capacidades propias para realizar esta actividad de seguimiento espacial ha llevado a distintos países y actores internacionales a invertir en infraestructuras que lo permitan. No es sencillo predecir la evolución de SST en los próximos años. Los factores a tener en cuenta son, entre otros: la evolución en el uso de las órbitas LEO (aparición de mega-constelaciones e incremento de misiones de smallsats), el suceso de nuevos eventos catastróficos de colisión (incidentes suceden a menudo [49]), la evolución de los vuelos tripulados y el turismo espacial (orbital y suborbital) o el impacto mediático de nuevas re-entradas controladas o no controladas de objetos residentes en el espacio.

Los escenarios futuros de la VSE con los que se especula cubren un amplio rango de opciones. No obstante, creemos que los tres marcos que se detallan a continuación abarcan el espectro completo de escenarios a considerar.

- Marco actual. En el marco actual, los servicios son proporcionados por el JSpoC en EEUU o el SatCen en la UE bajo demanda o ante un riesgo de colisión. En el escenario actual, cada actor del sistema mantiene catálogos independientes, intercambiando datos bajo el amparo de Memorandums of Understanding. No obstante, este sistema se encuentra ya en evolución en los EEUU al considerar SST como una actividad civil

y pasar la responsabilidad del servicio a la FAA (Federal Aviation Administration) ¹. El Institute for Defense Analyses (IDA) publicó en enero de 2017 un informe [65] resumiendo las distintas opciones de las que dispone la FAA para realizar la transición en la responsabilidad de los servicios de VSE, incluyendo las opciones de involucrar a empresas privadas parcial o totalmente en el servicio, o incluso a una organización internacional ². Esta última opción va en la dirección que se detalla en los siguientes puntos.



Figura 5.1 Opciones barajadas para la provisión de servicios de SSA civiles por la FAA [65]

- Marco de cooperación internacional reforzada. Es este caso, se postula la existencia de un organismo supranacional que proporcione un servicio único al que contribuyen distintos actores de manera autónoma. Los datos son compartidos gracias a acuerdos específicos que permiten una mejor gestión de la información. En cualquier caso, los sistemas actuales de carácter militar mantendrían su autonomía y capacidad.
- Marco único con Sistema de Gestión Tráfico Espacial (Space Traffic Management - STM- System). Sistema integrado de tráfico espacial, similar al correspondiente de tráfico aéreo. Un estudio de 2006 [30] realiza un análisis muy detallado de las características que podría tener un sistema de este tipo, incidiendo en los aspectos legislativos, en las distintas fases que se deberían de considerar y cubrir, etc. Esta aproximación holística, presenta, no obstante, numerosos retos tecnológicos y regulatorios. Una muestra de los mismos se detalla a continuación, con el análisis del marco regulatorio de los vuelos suborbitales.

La gestión de los vuelos suborbitales es un aspecto a tener en cuenta a la hora de prever la evolución de un futuro sistema de gestión de tráfico espacial. El STM está llamado a regular la actividad espacial y suborbital de manera completa y conjuntamente. No obstante, la integración regulatoria de estas actividades no es inmediata. De hecho, el marco regulatorio del vuelo suborbital es, actualmente, un campo de debate abierto. El aspecto fundamental que dificulta la generación de la legislación en este ámbito es la falta de definición del vuelo suborbital como actividad espacial. En caso de que así fuese, la actividad se podría regir, en términos de la legislación internacional, por el Tratado General del Espacio Exterior. La aproximación del legislador estadounidense, de esta manera, va en la línea de

¹ Si bien, el borrador de la ley sobre gestión del tráfico espacial de la Administración Trump señalaría al Departamento de Comercio como la organización a cargo de su gestión [108]

² Para más información sobre las distintas opciones que actualmente maneja la FAA, se pueden consultar las presentaciones del Space Traffic Management Industrial Day organizado el 25 de octubre de 2016 (https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ast/meetings_events/)

considerar a los los vuelos suborbitales como actividades espaciales [26]. De hecho, el Departamento de Transporte delega en la FAA, a través de la Oficina de Transporte Espacial Comercial, el otorgar licencias para las actividades de lanzamiento y reentrada. De esta manera, la FAA sería la encargada del desarrollo del STM en los EEUU, dado que tiene competencias tanto para lanzamiento, como para el vuelo suborbital o SST (aunque no para la certificación de satélites). La posición europea no está cerrada, pero la Agencia de Seguridad Aérea Europea (EASA) aboga por aplicar a los vehículos suborbitales la definición de OACI (Organización de Aviación Civil Internacional, ICAO en sus siglas en inglés) de aeronave. De esta forma, los vehículos suborbitales se vería sometidos al régimen legal de las aeronaves. Esta diferencia en la definición, tiene repercusiones relevantes. Es por ello que existen iniciativas de Oficina de Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Exterior (UNOOSA en inglés, en la que se encuentra la Comisión para Usos Pacíficos del Espacio Ultraterrestre, COPUOS) y OACI para buscar una solución de compromiso que satisfaga a todas las partes. Por ejemplo, acaba de tener lugar en Viena, el Simposio UNOOSA/ICAO [113], donde se ha tratado del estado actual de la legislación internacional en este tema, así como las posibles opciones futuras para la gestión del tráfico espacial y suborbital. En este campo, existen también numerosas publicaciones científicas, véanse por ejemplo [88, 120, 55, 112].

Existe también legislación nacional a este respecto. En EEUU, tal como se indicó en el párrafo anterior, la “Commercial Space Launch Act” de 2004, establece que la FAA a través de la Oficina de Transporte Espacial Comercial es la encargada de la supervisión de los vuelos suborbitales. En la Union Europea, existen países con legislación espacial propia [73]. Tanto en el Reino Unido como en Holanda, el vuelo suborbital entraría en el ámbito de su legislación de las actividades espaciales. En el caso de Suecia [127], la visión del vuelo espacial de la legislación nacional como actividad espacial podría entrar en conflicto con la visión de la EASA.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Este documento describe la situación actual de los sistemas de vigilancia y seguimiento espaciales, las actividades de los distintos actores internacionales, haciendo hincapié en las tecnologías necesarias para proporcionar los servicios SST. Estos servicios son cada vez más necesarios, debido a la evolución de la población de desechos espaciales¹ y a la relevancia de los servicios prestados por las plataformas espaciales (navegación, observación de la Tierra, referencia de tiempos, etc.). Las actividades e infraestructuras de SST han sido herederas de los sistemas de vigilancia en sistemas de defensa. No obstante, la operación segura de los satélites y su seguimiento durante la re-entrada presenta unos requisitos específicos. En los últimos años, los sistemas SST existentes se han renovado para hacer frente a los nuevos retos. Como caso paradigmático, los EEUU han adecuado las tecnologías utilizadas con un presupuesto para la mejora del sistema SST de unos M\$ 500 en el periodo 2015-2020. En Europa, la Comisión Europea ha establecido en 2014 el marco actual del sistema europeo de SST. En la década anterior, los programas preparatorios de la ESA habían estudiado la arquitectura y gobernanza de un posible sistema de este tipo. La Decisión de la CE establece que la operación de las instalaciones de SST está a cargo de un consorcio de entidades nacionales, siendo el SatCen el encargado de proveer de servicios a los actores interesados. El sistema actual se fundamenta en las capacidades existentes en ese momento en cada uno de los países del consorcio, si bien, el establecimiento del

¹Los aspectos relacionados con el modelado del ambiente de desechos espaciales, y su evolución no se trata en este documento, aunque se puede encontrar información a este respecto en las obras citadas en el Capítulo 4, en relación al establecimiento de requisitos.

sistema europeo ha incentivado la inversión en la mejora de operaciones e infraestructuras. Esto se ha traducido, también, en un interés en la investigación básica y aplicada, para la mejora de la tecnología actualmente a disposición de los sistemas de SST. Los objetivos de alto nivel son la mejora de las prestaciones del sistema con reducción de costes, siempre que sea posible. Ello implica retos para todas las tecnologías implicadas: tanto sensores como procesamiento de datos.

España forma parte del consorcio con un sistema propio, el S3T. Este sistema se ha diseñado basándose en la experiencia previa de la ESA, la industria e instituciones españolas. No es sencillo predecir la situación del SST en el ámbito internacional en el futuro próximo. Hay distintos agentes que activamente están desarrollando programas de seguimiento y vigilancia espaciales 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, como se ha hecho en el capítulo anterior.

AGRADECIMIENTOS

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

Una especial mención merece Javier Montojo (ROA), que nos guió y apoyó durante la realización de este trabajo. *In memoriam*.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Agenzia spaziale italiana web site. <http://www.asi.it/it/news/sst-firmato-laccordo-nasce-il-consorzio>. accessed 25th March 2018.
- [2] Global security web site. <http://www.globalsecurity.org/space/world/russia/space-surveillance.htm>. accessed 26th July 2016.
- [3] Image reduction and analysis facility web site. <http://iraf.noao.edu/>. accessed 26th July 2016.
- [4] Inter-Agency Space Debris Coordination Committee web site. <http://www.iadc-online.org/>. accessed 26th July 2016.
- [5] Space data association web site. <http://www.space-data.org/sda/>. accessed 26th July 2016.
- [6] Sst esa web site. <http://sst.ssa.esa.int/>. accessed 26th July 2016.
- [7] U.s. strategic command web site. <http://www.stratcom.mil/Portals/8/Documents/JSPOC%20Factsheet%20FINAL%20CAO.pdf?ver=2018-04-12-134128-903>. accessed 5th May 2018.
- [8] Mission requirements document. SSA-GEN-RS-MRD-1000, Issue 1, Revision 2, 01/09/2010.
- [9] *Spanish Capacities in Technologies for Astronomy*. Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial, 2015.
- [10] 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.
- [11] 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.

- [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] Luciano Anselmo and Carmen Pardini. Analysis of the consequences in low earth orbit of the collision between cosmos 2251 and iridium 33. In *Proceedings of the 21st International Symposium on Space Flight Dynamics*, pages 1–15. Centre nationale d'études spatiales Paris, France, 2009.
- [14] Luciano Anselmo and Carmen Pardini. Satellite reentry predictions for the italian civil protection authorities. *Acta Astronautica*, 87(Supplement C):163 – 181, 2013.
- [15] Roberto Armellin, Alessandro Morselli, Pierluigi Di Lizia, and Michèle Lavagna. Rigorous computation of orbital conjunctions. *Advances in Space Research*, 50(5):527–538, 2012.
- [16] M Bigas, Enric Cabruja, Josep Forest, and Joaquim Salvi. Review of cmos image sensors. *Microelectronics journal*, 37(5):433–451, 2006.
- [17] Duane Bird. Sharing space situational awareness data. Technical report, DTIC Document, 2010.
- [18] N Bobrinsky and L Del Monte. The space situational awareness program of the European Space Agency. *Cosmic Research*, 48(5):392–398, 2010.
- [19] Nicolas Bobrinsky and Luca Del Monte. The space situational awareness program of the european space agency. *Cosmic Research*, 48(5):392–398, 2010.
- [20] Robert F Bruck and Robert H Copley. Geodss present configuration and potential. Technical report, DTIC Document, 2014.
- [21] Johanna Catena. Legal aspects relating to disarmament, space control, space situational awareness and international space traffic management. volume 51, page 221, 2008.
- [22] 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.
- [23] L. Cibin, 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.
- [24] Commission of the European Communities. White Paper. Space: a new frontier for an expanding union. COM(2003) 673. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=URISERV:i23020>, 2003.
- [25] 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.
- [26] IAASS Suborbital Safety Technical Committee. Guidelines for the safe regulation, design and operation of suborbital vehicles. Technical report, December 2013.
- [27] Inter-Agency Space Debris Coordination Committee et al. IADC space debris mitigation guidelines. http://www.iadc-online.org/Documents/Docu/IADC_Mitigation_Guidelines_Rev1_Sep07.pdf, 2007.
- [28] Consejo de la Unión Europea. Directiva 2008/114/ce del consejo de 8 de diciembre de 2008 sobre la identificación y designación de infraestructuras críticas europeas y la evaluación de la necesidad de mejorar su protección, 2008.
- [29] Corinne Contant-Jorgenson, Petr Lála, and Kai-Uwe Schrogl. *Cosmic Study on Space Traffic Management*. International Academy of Astronautics, 2006.
- [30] Corinne Contant-Jorgenson, Petr Lála, and Kai-Uwe Schrogl. The iaa cosmic study on space traffic management. *Space Policy*, 22(4):283–288, 2006.

- [31] ESA Council. Declaration on the space situational awareness (ssa) preparatory programme. *ESA/C*, 192, 2008.
- [32] 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.
- [33] Kyle J DeMars, Islam I Hussein, Carolin Frueh, Moriba K Jah, and R Scott Erwin. Multiple-object space surveillance tracking using finite-set statistics. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 38(9):1741–1756, 2015.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] El País. https://politica.elpais.com/politica/2015/11/05/actualidad/1446714068_969077.html, 5 de Noviembre de 2015.
- [39] 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.
- [40] ESA. <http://blogs.esa.int/rocketscience/2016/09/01/sleuthing-a-space-collision/>, 1 de Septiembre de 2016.
- [41] ESA. www.esa.int/Our_Activities/Operations/Space_Situational_Awareness/SSA_Programme_overview, 31 de Julio de 2016.
- [42] 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.
- [43] European Commission. Galileo will boost economy and make life of citizens easier. MEMO/11/711, 2011.
- [44] Octavi Fors, Jorge Núñez, José Luis Muiños, Francisco Javier Montojo, Roberto Baena-Gallá©, Jaime Boloix, Ricardo Morcillo, MarÁa 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.
- [45] Thomas Fortmann, Yaakov Bar-Shalom, and Molly Scheffe. Sonar tracking of multiple targets using joint probabilistic data association. *IEEE journal of Oceanic Engineering*, 8(3):173–184, 1983.
- [46] Caroline Früh. *Identification of Space Debris*. PhD thesis, Universität Bern, 2011.
- [47] Inés Alonso Gómez, Sara Ansorena Vildarraz, Carlos García, María Antonia Ramos Prada, Juan Ureña Carazo, Gian Maria Pinna, Serge Moulin, Piermario Besso, Holger Krag, Javier Rey Benayas, et al. Description of the architecture of the spanish space surveillance and tracking system. In *Proceedings of the 7th European Conference on Space Debris*, 2017.
- [48] 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.

- [49] Mike Gruss. Digitalglobe says worldview-2 operational after “debris causing event”. <http://spacenews.com/u-s-air-force-digitalglobes-worldview-2-involved-in-debris-causing-event/>, 2016. Accessed: 2018-01-31.
- [50] Linda Haines and Phillip Phu. Space fence pdr concept development phase. In *Proc. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, Maui, HI*, 2011.
- [51] WC Jeas and R Anctil. The ground-based electro-optical deep space surveillance/geodss/system. *Military Electronics Countermeasures*, 7:47–51, 1981.
- [52] 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.
- [53] Nicholas L Johnson, Eugene Stansbery, David O Whitlock, Kira J Abercromby, and Debra Shoots. History of on-orbit satellite fragmentations. Technical Report NASA/TM-2008-214779, NASA. Orbital Debris Program Office, 2008.
- [54] Brandon A Jones and Ba-Ngu Vo. A labeled multi-bernoulli filter for space object tracking. In *Proc. AAS/AIAA Spaceflight Mech. Meeting*, pages 11–15, 2014.
- [55] Sven Kaltenhäuser, Frank Morlang, Tanja Luchkova, Jens Hampe, and Martin Sippel. Facilitating sustainable commercial space transportation through an efficient integration into air traffic management. *New Space*, 2016.
- [56] 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.
- [57] Heiner Klinkrad. *Space debris*. Wiley Online Library, 2010.
- [58] Vladimir Kouprianov. Distinguishing features of ccd astrometry of faint geo objects. *Advances in Space Research*, 41(7):1029 – 1038, 2008.
- [59] Vladimir Kouprianov. Advanced image processing techniques for automatic reduction of geo survey data. In *8th US-Russian Space Surveillance Workshop*, 2010.
- [60] Holger Krag, Heiner Klinkrad, T Flohrer, and E Fletcher. The european surveillance and tracking system—services and design drivers. 2010.
- [61] 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.
- [62] Aubrey Poore Kyle T. Alfriend and Daniel J. Scheeres. Uncertainty use and needs in space situational awareness. 2014 SIAM Conference on Uncertainty Quantification.
- [63] Myrtille Laas-Bourez, Gwendoline Blanchet, Michel Boer, 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.
- [64] 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.
- [65] Bhavya Lal and Sara A Carioscia. Evaluating options for civil space situational awareness (ssa). In *Advanced Maui Optical and Space Surveillance (AMOS) Technologies Conference*, 2017.
- [66] François Laporte and Monique Moury. Cnes role in french space surveillance. 11th Military Space Situational Awareness, London, April 2016.

- [67] JC Liou and D Shoats. Satellite collision leaves significant debris clouds. *Orbital Debris Quarterly News*, 13(2), 2009.
- [68] T Lips, B Fritsche, G Koppenwallner, and H Klinkrad. Spacecraft destruction during re-entry - latest results and development of the scarab software system. *Advances in Space Research*, 34(5):1055 – 1060, 2004. Space Debris.
- [69] Ilima Loomis. Air force turns a keen eye on space junk. *Science*, 347(6218):115–115, 2015.
- [70] 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.
- [71] Ronald PS Mahler. Multitarget bayes filtering via first-order multitarget moments. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems*, 39(4):1152–1178, 2003.
- [72] Ronald PS Mahler. *Statistical multisource-multitarget information fusion*. Artech House, Inc., 2007.
- [73] Tanja Masson-Zwaan and Rafael Moro-Aguilar. Regulating private human suborbital flight at the international and european level: Tendencias and suggestions. *Acta Astronautica*, 92(2):243 – 254, 2013. 2nd IAA Symposium on Private Human Access to Space.
- [74] P. D. McCall. *Modeling, simulation, and characterization of space debris in low-Earth orbit*. PhD thesis, Florida International University, 2013.
- [75] 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.
- [76] Ted Molczan. Re-entry sightings and debris recovery of 2008-010b spain - 2015 november 03 utc. *Journal of Space Safety Engineering*, 2(2):83 – 90, 2015.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] Alessandro Morselli. *High order methods for Space Situational Awareness*. PhD thesis, 2014.
- [80] Maj Michael J Muolo, editor. *Space Handbook: A War Fighter's Guide to Space*. DIANE Publishing Company, 1994.
- [81] 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.
- [82] Timothy S Murphy, Marcus J Holzinger, and Brien Flewelling. Direct image-to-likelihood for track-before-detect multi-bernoulli filter. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Space Domain Awareness Special Issue*, 2016.
- [83] Timothy S Murphy, Marcus J Holzinger, and Brien Flewelling. Visual tracking methods for improved sequential image-based object detection. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, pages 1–14, 2017.
- [84] NASA Goddard Space Flight Center. Idl web site. <http://idlastro.gsfc.nasa.gov/contents.html>.
- [85] 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.
- [86] 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.

- [87] 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.
- [88] Gregory Orndorff, Bradley Boone, Marshall Kaplan, Gary Harmon, and Robert Lindberg. Space Traffic Control: Technology Thoughts to Catalyze a Future Architecture. In *AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition*, SPACE Conferences and Exposition. American Institute of Aeronautics and Astronautics, sep 2009.
- [89] Xavier Pasco. Space and security: Building a european approach. In UNIDIR, editor, *Proceedings of the Space Security Conference*.
- [90] Xavier Pasco. Study on suitable governance and data policy models for a european space situational awareness (ssa) system. Technical report, ESA Contract no. 21443/08/F/MOS, 2008.
- [91] Jacopo Piattoni, Alessandro Ceruti, and Fabrizio Piergentili. Automated image analysis for space debris identification and astrometric measurements. *Acta Astronautica*, 103:176 – 184, 2014.
- [92] 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.
- [93] N. Ravago and B.A. Jones. Space Object Maneuver Detection In A Multi-Target Environment Using A Labeled Multi-Bernoulli Filter. In *1st IAA Conference on Space Situational Awareness (ICSSA)*, 2017.
- [94] Donald Reid. An algorithm for tracking multiple targets. *IEEE transactions on Automatic Control*, 24(6):843–854, 1979.
- [95] Stephan Reuter, Ba-Tuong Vo, Ba-Ngu Vo, and Klaus Dietmayer. The labeled multi-bernoulli filter. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 62(12):3246–3260, 2014.
- [96] W.C Rochelle, J.J Marichalar, and N.L Johnson. Analysis of reentry survivability of uars spacecraft. *Advances in Space Research*, 34(5):1049 – 1054, 2004. Space Debris.
- [97] 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.
- [98] 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.
- [99] 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.
- [100] 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.
- [101] Annelie Schoemaker. Space traffic management for the moon and the development of space law. volume 50, page 570. HeinOnline, 2007.
- [102] 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.
- [103] 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.

- [104] 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.
- [105] 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.
- [106] 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.
- [107] 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.
- [108] Space News. Commerce to take responsibility for space traffic management under new policy, 2018.
- [109] Space.com. <https://www.space.com/14050-christmas-eve-fireball-rocket-debris.html>, 27 de Diciembre de 2011.
- [110] 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.
- [111] Brigadier General Jean-Daniel Teste. Ssa : first priority of french military space policy 2025. <http://www.jsforum.or.jp/stableuse/pdf/15.%20Teste.pdf>. Japan Space Forum.
- [112] Ralph Tüllmann, Christian Arbing, Stuart Baskcomb, Jens Berdermann, Hauke Fiedler, Erich Klock, and Thomas Schildknecht. Air meets space: Shaping the future of commercial space traffic: I. study introduction and initial results. 2016.
- [113] UNOOSA. Third icao/unoosa aerospace symposium. <http://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/spacelaw/icao-unoosa-symposium.html>, 2017. Accessed: 2017-08-30.
- [114] US Government Accountability Office. Space situational awareness: Status of efforts and planned budgets. Technical report, oct 2015.
- [115] 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.
- [116] 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.
- [117] Jenni Virtanen, Jonne Poikonen, Tero Sääntti, 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.
- [118] Ba-Tuong Vo and Ba-Ngu Vo. Labeled random finite sets and multi-object conjugate priors. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 61(13):3460–3475, 2013.
- [119] Ba-Tuong Vo, Ba-Ngu Vo, and Antonio Cantoni. Analytic implementations of the cardinalized probability hypothesis density filter. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55(7):3553–3567, 2007.

- [120] Frans G. von der Dunk. The integrated approach - regulating private human spaceflight as space activity, aircraft operation, and high-risk adventure tourism. *Acta Astronautica*, 92(2):199 – 208, 2013. 2nd IAA Symposium on Private Human Access to Space.
- [121] 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.
- [122] Rein H Warmels. The eso–midas system. In *Astronomical Data Analysis Software and Systems I*, volume 25, page 115, 1992.
- [123] Brian Weeden, Paul Cefola, and Jaganath Sankaran. Global space situational awareness sensors. In *2010 Advanced Maui Optical and Space Surveillance Conference, Maui, Hawaii*, 2010.
- [124] 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*.
- [125] LtCol (GS) Lars Wilhelmy. Ssa challenges and germany’s contribution to an international approach. 11th Military Space Situational Awareness, London, April 2016.
- [126] 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.
- [127] Julie Abou Yehia and Kai-Uwe Schrogl. European regulation for private human spaceflight in the context of space traffic management. *Acta Astronautica*, 66(11):1618 – 1624, 2010. Private Human Access To Space.
- [128] 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.