
Spazzatura spaziale: origine, pericoli, che fare

Nel momento in cui svuoto la pattumiera piccola nella grande e trasporto questa sollevandola per i due manici fuori dal nostro ingresso di casa, pur ancora agendo come umile rotella del meccanismo domestico, già m'investo d'un ruolo sociale, mi costituisco primo ingranaggio di una catena d'operazioni decisive per la convivenza collettiva, sancisco la mia dipendenza dalle istituzioni senza le quali morrei sepolto dai miei stessi rifiuti nel mio guscio d'individuo singolo.

Italo Calvino, *La poubelle agrée*

Giulio Avanzini

Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Università del Salento

L'accumulo dei residui delle attività spaziali, particolarmente densi nelle orbite più utili dal punto di vista operativo, costituisce una seria minaccia al futuro sviluppo delle missioni spaziali. Il rischio che un effetto domino porti alla successiva frammentazione di un numero crescente di satelliti, molti dei quali inoperativi da anni, è concreto e comporterebbe un ostacolo di fatto insormontabile a qualunque futura missione spaziale, abitata o meno.

Come si è arrivati a questo punto? Quali sono le prospettive realistiche per il futuro? Possiamo solo limitare i danni o è possibile ripulire lo spazio? Sono queste alcune delle (difficili) domande cui si tenterà di dare una risposta tecnicamente motivata nella pagine che seguono.

Introduzione, ovvero chi ha sporcato lo spazio?

Le parole di Italo Calvino riportate in esergo avrebbero dovuto suonare da monito per chi ha progettato, condotto e gestito le missioni spaziali che, a partire dal 1957, con il lancio del primo satellite artificiale, lo Sputnik 1, effettuato dall'Unione Sovietica, si sono succedute con frequenza crescente nei 75 anni successivi. La gestione dei residui di ogni attività umana è sempre (o diviene presto) un problema e - come suggerito da Calvino - ciascun individuo dovrebbe agire nell'ambito di prassi istituzionalizzate, per evitare di finire sepolti dai propri stessi rifiuti.

Purtroppo, per quanto riguarda le attività spaziali, tale sensibilità si è sviluppata solo in tempi relativamente recenti. Complici le distanze in gioco, per lungo tempo si è (erroneamente) assunto che fosse statisticamente improbabile che due oggetti potessero scontrarsi nello spazio. Ma l'aumento costante delle attività, soprattutto in

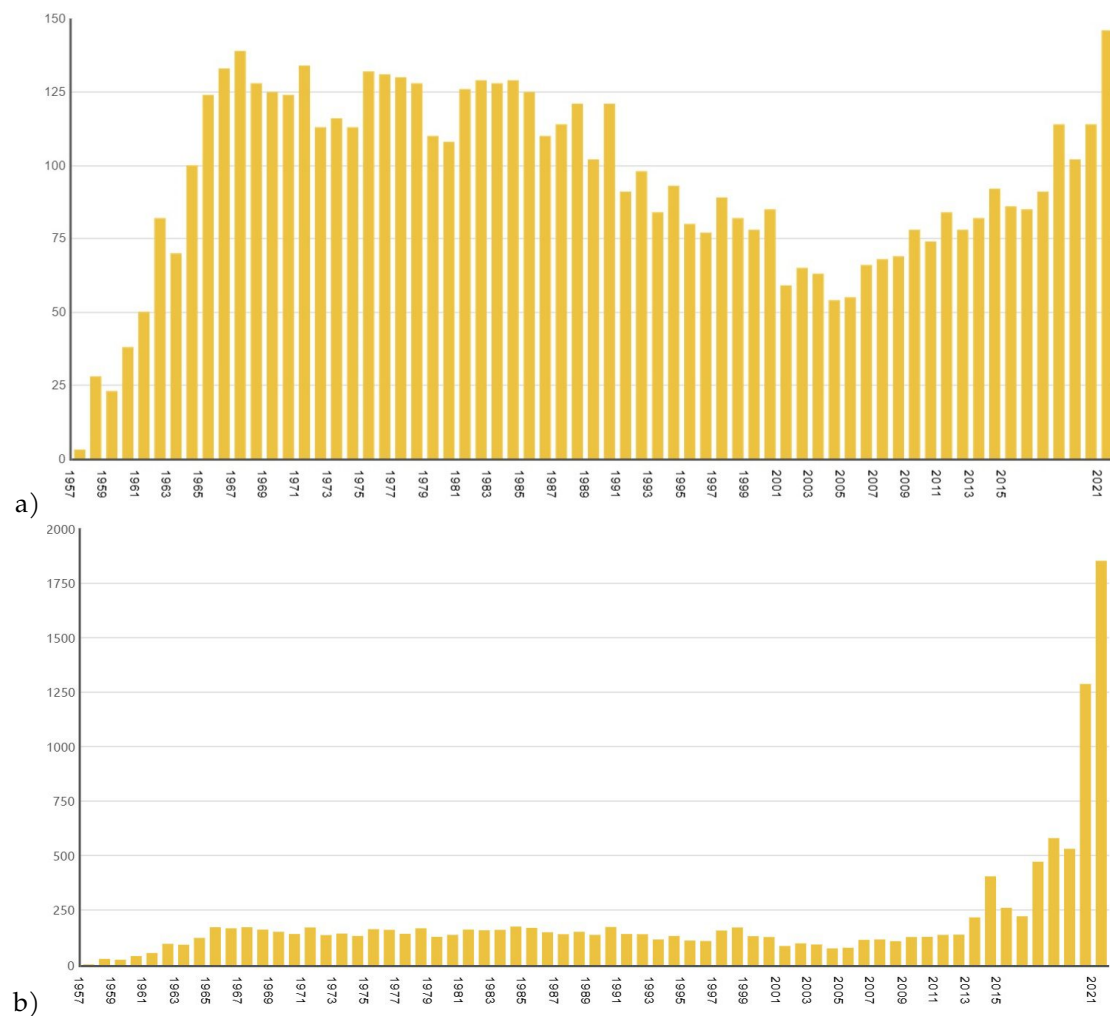


Figura 1: Numero annuale di lanci (a) e di satelliti messi in orbita (b) [2].

orbita bassa (*Low Earth Orbit* o LEO), ha portato a un accumulo di oggetti passivi, che orbitano senza controllo e rappresentano un rischio per i satelliti operativi.

Il 24 luglio del 1996 fu registrata la prima collisione accidentale fra due oggetti orbitanti catalogati [1]: un frammento del terzo stadio di un lanciatore Ariane urtò, rompendola, la trave di stabilizzazione a gradiente di gravità del microsatellite militare francese *Cerise*, di massa pari a 50 kg, dimezzandone la lunghezza da circa 6 a meno di 3 m. Il satellite rimase operativo, anche se con capacità di controllo dell'assetto degradate, e la collisione generò un solo frammento, per cui le conseguenze dell'evento furono relativamente modeste. Tuttavia, da quel momento in avanti, ci si rese conto che lo spazio, per quanto grande, era divenuto decisamente affollato.

Il 10 febbraio 2009 si verificò invece la prima collisione fra due veicoli spaziali operativi, un sa-

tellite per telecomunicazioni americano Iridium e un satellite militare russo Kosmos, che vennero distrutti dall'impatto a una velocità relativa di 11,7 km/s, producendo una nuvola di detriti formata da più di 2 300 frammenti rilevabili da terra. Il naturale decadimento orbitale ha portato molti di questi frammenti a rientrare in atmosfera, dove le temperature raggiunte durante il rientro li hanno bruciati, ma data la quota a cui si verificò la collisione, alcuni di essi sono ancora in orbita.

Il numero annuo di lanci, dopo una rapidissima crescita nel primo decennio della corsa allo spazio, che portò al picco di 139 lanci nel 1967, ha subito fluttuazioni, con un trend medio in calo, fino a un minimo di soli 55 lanci nel 2004, per poi riprendere a crescere in modo quasi costante, fino al nuovo record di 149 lanci nel 2021 (Fig. 1.a). Fino ai primi anni del nuovo millennio, il numero di oggetti messi in orbita all'anno si discostava poco dal numero di lanci effettuati, ma

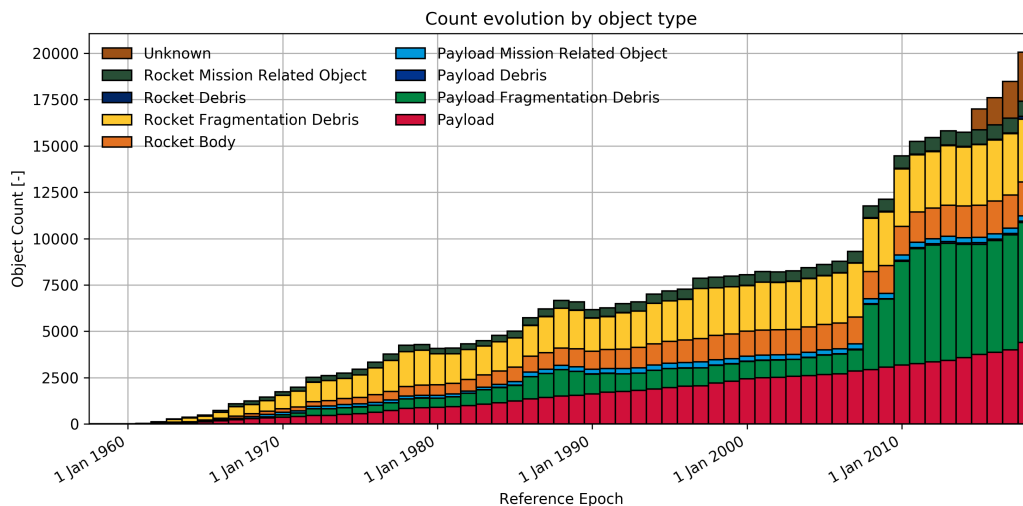


Figura 2: Numero di debris catalogati [3].

negli ultimi 15 anni il loro numero è cresciuto in modo esponenziale, fino a toccare l'incredibile record, raggiunto sempre nel 2021, di ben 1851 satelliti, che segna un incremento del 44% rispetto all'anno precedente (Fig. 1.b).

Viceversa, il numero di oggetti in orbita intorno alla Terra catalogati come spazzatura spaziale è cresciuto inizialmente a un tasso quasi costante, per presentare poi vere e proprie discontinuità (Fig. 2). Nel corso del 2021 è stato superato il numero di 20 000 oggetti catalogati. A questi frammenti tracciati vanno aggiunti tutti quegli oggetti troppo piccoli per essere visibili da Terra anche con gli strumenti più sofisticati, e che quindi rappresentano, stanti le velocità in gioco, un ulteriore (e imprevedibile) pericolo per le missioni spaziali presenti e future. Le fonti che hanno portato a questo numero così elevato sono diverse, alcune legate alle operazioni spaziali, alcune accidentali, altre collegate ad attività deliberate.

Fra le fonti operative di *debris* ci sono i satelliti a fine vita (*decommissioned*) e gli ultimi stadi dei lanciatori che collocano i satelliti in orbita, per poi rimanere loro stessi in orbita anche per molti anni. Questi oggetti sono noti e facilmente rilevabili. Altre fonti operative di *debris* sono gli oggetti rilasciati durante le missioni (alcuni dei quali sotto la soglia di tracciabilità a Terra). Viceversa, episodi di frammentazione accidentale o deliberata creano un gran numero di pezzi. Le discontinuità nell'andamento della curva dei pezzi di *debris* catalogati visibili in Fig. 2 sono tutte dovute a episodi di frammentazione.

La frammentazione accidentale può avvenire a causa di una collisione, come nel caso dei due satelliti Iridium e Kosmos, o quando, a causa del deterioramento delle strutture, residui di carburante non bruciato nei serbatoi di un satellite decommissionato o dell'ultimo stadio di un lanciatore vengono in contatto con un ossidante e provocano un'esplosione.

Alle frammentazioni accidentali, vanno aggiunte quelle provocate deliberatamente per testare sistemi d'arma anti-satellite (ASAT). Fra gli episodi più eclatanti vi è quello del test cinese di un missile anti-satellite che nel gennaio del 2007 ha distrutto un satellite meteorologico cinese da 750 kg, della famiglia FengYun, in orbita polare, a una quota di circa 865 km, provocando un aumento dei pezzi di detriti orbitanti di ben il 25%. L'ultimo test noto di un sistema ASAT è stato condotto dall'India nel Marzo del 2019. Il test ha utilizzato come bersaglio un satellite in orbita bassa, a circa 300 km di quota, cosa che ha permesso un decadimento orbitale relativamente rapido di quasi tutti i frammenti generati. L'ultimo frammento è rientrato in atmosfera nel Giugno 2022.

Pericoli

Le velocità relative di due corpi orbitanti che dovessero scontrarsi in orbita sono, come visto sopra, nell'ordine dei 10 km/s. Questo fa sì che anche un frammento relativamente piccolo, colpendo un satellite operativo, lo può danneggiare.

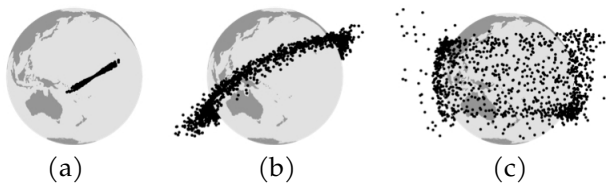


Figura 3: Evoluzione del debris formato a seguito di frammentazione: ellissoide (a); anello (b); banda (c). [4].

re in modo estremamente serio e, nei casi più sfortunati, può provocarne la distruzione. In caso di frammentazione si crea una nuova nuvola di frammenti che va ad arricchire la già troppo numerosa popolazione di *debris* catalogati.

Sia l'esplosione che la frammentazione da impatto distribuiscono i frammenti in orbite diverse da quella di partenza. La nuvola tende ad allargarsi, dapprima intorno al punto nominale dell'orbita originaria, sotto forma di un ellissoide di frammenti (Fig. 3.a). A causa delle lievi differenze nei periodi orbitali dei diversi frammenti, l'ellissoide si allunga fino a creare un anello di frammenti (Fig. 3.b). Su una scala temporale più lunga, la perturbazione dovuta allo schiacciamento ai poli dell'ellissoide terrestre (il cosiddetto effetto J_2) provoca la lenta rotazione del piano orbitale dell'orbita di ciascun frammento. Piccole discrepanze iniziali nella posizione del piano orbitale tenderanno così ad aumentare fino a quando i frammenti occupano tutta la fascia di orbite caratterizzate approssimativamente dalla stessa inclinazione.

Questa situazione evidenzia i pericoli legati alla formazione di un numero crescente di frammenti in orbita. Il potenziale distruttivo della nube di frammenti sparpagliati su orbite diverse è infatti enorme. Nell'ambito della letteratura divulgativa riguardante la spazzatura spaziale, ha avuto molto successo (soprattutto al di fuori della ristretta comunità di specialisti interessati al problema del *debris*) la definizione della sindrome di Kessler [5]. Lo scenario è quello di un effetto domino in cui un primo episodio di frammentazione ne induce a cascata una successione, fino al punto da danneggiare seriamente un numero sempre crescente di satelliti già in orbita. Lo spazio circumterrestre, popolato di un numero sterminato di frammenti, diventerebbe di fatto non più accessibile e le attività spaziali verrebbero inevitabilmente interrotte per lunghissimo

tempo.

Se da un lato questo scenario apocalittico appare al momento improbabile, il lancio di costellazioni di satelliti in numero sempre crescente potrebbe presto portare a una densità di oggetti orbitanti tale da rendere la sindrome di Kessler una minaccia potenziale ben più concreta. La sola costellazione Starlink di prima generazione, dell'americana SpaceX, dovrebbe contare fra i 1 600 e i 2 200 satelliti in orbita bassa (500 km circa). L'aumento repentino nel numero di lanci e di oggetti immessi in orbita è legato infatti, oltre che all'intensificarsi delle attività spaziali cinesi, proprio al dispiegamento in orbita della costellazione di SpaceX, che ha l'ambizione di garantire una copertura internet globale all'intero pianeta senza bisogno di infrastrutture terrestri.

Contromisure e buone pratiche

Molti frammenti di spazzatura spaziale (soprattutto quelli in orbita bassa) prima o poi rientrano in atmosfera a causa del decadimento orbitale e si fondono durante il rientro. Si osservi però che tale fenomeno non è privo di conseguenze e seri rischi, anche solo potenziali. Innanzi tutto alcuni satelliti contengono materiali fortemente inquinanti e/o tossici, che vengono dispersi nell'aria durante la fase di rientro. Inoltre, soprattutto per i frammenti di *debris* di dimensioni maggiori, la nebulizzazione dei componenti non sempre è completa e frammenti più o meno grandi possono raggiungere il suolo, con conseguenze facilmente immaginabili, qualora tali frammenti colpissero un centro abitato.

La curva crescente del numero di frammenti in orbita testimonia chiaramente che lo smaltimento dei rifiuti spaziali legato al decadimento orbitale non compensa in alcun modo il rateo con cui nuovo *debris* viene creato. Con poche eccezioni, la curva del numero di frammenti catalogati cresce costantemente da un anno all'altro.

Le contromisure che consentono, al momento, di garantire la sicurezza operativa dei mezzi orbitanti sono legate alla conoscenza esatta della posizione dei frammenti e al calcolo della probabilità di collisione. Quando la previsione della posizione relativa di un frammento rispetto al satellite considerato, basato su accurate tecniche di propagazione orbitale, porta a una stima di una

probabilità di impatto maggiore di una soglia giudicata di rischio accettabile, il satellite effettua una manovra orbitale per correggere la sua traiettoria e riportare la probabilità di impatto al di sotto della soglia di rischio prescelta.

Stante l'accuratezza con cui la posizione relativa dei diversi oggetti orbitanti catalogati, operativi e non, può essere prevista su orizzonti temporali piuttosto lunghi, le manovre correttive, effettuate quando la distanza fra i due corpi in potenziale rotta di collisione è ancora sufficientemente grande, sono di piccola entità. La Stazione Spaziale Internazionale, che al momento è il veicolo in orbita più grande mai realizzato, deve effettuare tali manovre di *collision avoidance* in media una volta l'anno. Tuttavia, nel 2020, tali manovre sono state ben tre. L'ultima, quella effettuata il 22 settembre 2020, è stata la più impegnativa, in quanto in questo caso il frammento in rotta di collisione con la ISS non era catalogato, e la situazione di pericolo era stata identificata solo nel corso della giornata precedente. Per ragioni di sicurezza gli astronauti si erano trasferiti nella capsula di rientro Soyuz, mentre gli operatori di terra russi e statunitensi lavoravano congiuntamente per spostare la ISS su un'orbita di 5 km più elevata.

Chiaramente gli oggetti non catalogati costituiscono un pericolo maggiore, ma è chiaro che per tutti i satelliti queste manovre rappresentano un costo aggiuntivo non indifferente, in termini di consumo di carburante. Questo riduce inevitabilmente la loro vita operativa. In molti casi, inoltre, se il mantenimento esatto dell'orbita prevista è un aspetto rilevante della missione, è chiaro che durante la fase in cui il satellite considerato si allontana da tale orbita, le sue capacità operative possono risultare ridotte o addirittura temporaneamente compromesse.

Per evitare, o quanto meno limitare, la crescita del numero di oggetti passivi orbitanti, occorre risolvere il problema di cosa fare dopo il *decommissioning* dei satelliti (ovvero dopo la fine della loro vita operativa). Le procedure che tentano di risolvere questo problema sono dette *post mission disposal* (PMD), ovvero smaltimento dopo la missione. L'efficacia delle procedure di PMD è chiaramente di cruciale importanza per garantire la sostenibilità presente e futura delle missioni spaziali. Purtroppo, ogni soluzione individuata

fino a oggi presenta controindicazioni. Alcune buone prassi di PMD prevedono che parte del carburante a bordo venga risparmiato per effettuare un'ultima manovra di trasferimento orbitale che porti il satellite su un'orbita che deve garantire il rientro in atmosfera (e la conseguente distruzione del satellite) in un lasso temporale ragionevolmente breve. In alternativa è possibile trasferire il satellite su un'orbita di parcheggio, detta *graveyard orbit* (ovvero orbita cimitero) che non interferisca con le orbite su cui si trovano satelliti operativi.

Quando si opera in orbite basse, è possibile ridurre la quantità di carburante necessario a decommissionare il satellite equipaggiandolo con appositi sistemi di *de-orbiting* passivo, basati sull'aumento della resistenza attraverso l'apertura di una vela o il *deployment* di un *tether* elettrodinamico [4]. Nel primo caso, l'apertura della vela aumenta la sezione resistente del satellite nella direzione della velocità orbitale, incrementando la resistenza e accelerando così il decadimento orbitale (Fig. 4). Nel secondo caso il *tether* elettrodinamico, costituito da un nastro conduttore che viene rilasciato nello spazio e messo in debolissima tensione dal gradiente di gravità, genera una forza di Lorenz in verso opposto al moto orbitale, tramite l'interazione del materiale conduttore di cui è fatto il *tether* con il campo magnetico terrestre. In tutti i casi, il peso, la complessità e l'affidabilità di tali sistemi sono da confrontare con il costo del carburante aggiuntivo necessario per una manovra di *deorbiting* effettuata con l'apparato propulsivo.



Figura 4: La vela per il satellite Techdemosat-1. [7].

Purtroppo molte orbite operative non consentono l'uso di sistemi di *deorbiting* passivo, in quanto al di sopra dei 1000 km la densità del-

l'atmosfera ha ormai effetti totalmente trascurabili sul moto orbitale. Per orbite ancora più alte, e in particolare per quelle geostazionarie (*Geostationary Earth Orbit*, o GEO), la quantità di carburante necessaria a effettuare una manovra di *deorbiting* che si concluda con un rientro in atmosfera è troppo grande. In tali casi la strategia di rimozione dall'orbita operativa prevede di spostare il satellite su un'orbita inutile, dal punto di vista operativo, e sufficientemente lontana da tutte le orbite operative, riducendo la probabilità di impatto con altri corpi orbitanti al di sotto di un valore giudicato accettabile.

Tuttavia, se da un lato la *graveyard orbit* non comporta rischi connessi alla dispersione di inquinanti in atmosfera o a impatti a terra, le perturbazioni orbitali non garantiscono che, in lassi di tempo pluridecennali, i satelliti ivi collocati non si ritrovino prima o poi su orbite che incrociano quelle di veicolo spaziali ancora operativi. In seconda istanza, la stessa *graveyard orbit* che accogliesse un numero crescente di satelliti ormai passivizzati potrebbe diventare a sua volta sorgente di frammenti di *debris* a seguito di collisione, se la densità dei satelliti decommissionati diventasse troppo alta. Quindi, al momento, nessuna buona prassi appare come risolutiva per garantire la sostenibilità di lungo e lunghissimo periodo delle attività spaziali.

Spazzini nello spazio

Appare chiaro dalle considerazioni precedenti che, come per molte altre attività umane, il problema della sostenibilità è divenuto fondamentale anche per quelle spaziali. Dato che nonostante il ricorso a buone prassi per il *post mission disposal* il numero di frammenti, già elevato, risulta comunque crescente nel tempo, da diversi anni si stanno studiando possibili soluzioni per il cosiddetto *active debris removal* (ADR), ovvero la rimozione attiva dei frammenti e dei satelliti decommissionati.

Tuttavia, se da un lato appare indispensabile identificare strategie efficaci per ridurre il numero di frammenti orbitanti, dall'altro le tecnologie per l'ADR soffrono delle stesse limitazioni e problematiche che affliggono le tecniche di PMD, legate allo smaltimento in atmosfera o in un'orbita cimitero degli eventuali pezzi di *debris* cat-

turati dal satellite spazzino (chiamato più nobilmente *chaser*, in inglese, ovvero cacciatore). A tali limitazioni e problematiche si sommano poi specifiche difficoltà tecniche per le missioni di ADR, per cui si è ancora lontani dall'identificare una strategia adeguata e sostenibile, sia dal punto di vista dell'ambiente spaziale che da quello economico.

Gli aspetti da tenere in considerazione sono diversi. Uno dei più rilevanti riguarda la necessità di evitare tassativamente qualunque rischio di creare nuovi frammenti di *debris* nel tentativo di rimuoverne uno. Questo porta a escludere qualunque tecnica di *deorbiting* basata su impatto. La maggior parte dei metodi di ADR attualmente presi in considerazione sono quindi basati su procedure di cattura del frammento, in cui il *chaser* deve agganciare in qualche modo il suo bersaglio (*target*). Tuttavia le difficoltà, già notevoli quando la navigazione di prossimità, l'approccio e l'aggancio (*docking*) avvengono fra veicoli spaziali cooperanti (ovvero in grado di manovrare in modo coordinato), diventano enormi, quando si tratta di agganciare un *target* non cooperativo, spesso dotato di un moto di *spin* incontrollato.

Per la cattura, uno dei metodi più promettenti sembra essere quello della rete (*net*), in cui il *chaser* lancia una rete che avvolge il frammento e lo aggancia, in modo indipendente dal suo stato di moto di assetto. Fra gli aspetti più critici vi è il fatto che il sistema di aggancio deve gestire lo scambio di momento angolare fra il *target* catturato e il *chaser* che, almeno durante la prima fase dopo la cattura, saranno collegati. La gestione dell'assetto dei due corpi non è banale, soprattutto quando il frammento catturato è di grandi dimensioni e/o la sua velocità angolare elevata.

Una volta agganciato, occorre procedere con lo smaltimento del frammento, secondo una delle due procedure identificate nel paragrafo precedente, ovvero il suo *deorbiting* (che può essere attivo, con l'intervento di un propulsore, o passivo, attraverso l'apertura di un sistema di aumento della dissipazione, che lo inserisca su una traiettoria che comporti il rientro e, quindi, la sua distruzione in atmosfera), oppure il suo trasferimento verso un'orbita cimitero (con tutte le difficoltà e i costi energetici di questa seconda opzione). A complicare ulteriormente lo scenario c'è però l'aspetto economico.

L'accesso allo spazio è estremamente costoso e chiaramente non si può pensare a missioni di ADR che rimuovano un unico pezzo di *debris*. Stante il numero di frammenti da rimuovere i costi di una campagna di rimozione di frammenti diventano sostenibili solo se ogni *chaser* è in grado di rimuovere un numero elevato di frammenti di *debris*. Questo comporta la necessità di progettare missioni di ADR che consentano al *chaser* di raggiungere uno dopo l'altro diversi frammenti. Il numero di frammenti che il satellite spazzino potrà rimuovere sarà inevitabilmente limitato dalla quantità di carburante disponibile per effettuare le manovre orbitali necessarie a passare da un pezzo di *debris* al successivo, cui va sommato quello necessario per le manovre di avvicinamento e cattura.

Per questa ragione sono in corso, anche presso l'Università del Salento [8], studi che ottimizzano la missione dei satelliti spazzini, studiando la sequenza di manovre orbitali che consentono di raggiungere la massima efficacia della missione per una data quantità di carburante imbarcato. A ogni elemento di *debris* può essere assegnato un punteggio, che ne misura la pericolosità, e un costo per raggiungerlo, associato alla quantità di carburante necessaria per manovrare verso l'orbita del frammento stesso a partire da quella del frammento catturato precedentemente. Il punteggio è legato non solo alla massa del frammento (chiaramente oggetti più massivi possono infliggere danni maggiori, date le velocità relative in gioco), ma anche alla sua dimensione e, soprattutto, alla probabilità di entrare in collisione con altri corpi, aspetto che dipende da quanto le orbite prossime a quelle del frammento considerato siano più o meno densamente popolate. L'algoritmo di ottimizzazione deve fornire la sequenza di frammenti da catturare, massimizzando il punteggio complessivo della missione, nel rispetto del vincolo sul carburante totale disponibile per effettuare tutte le manovre necessarie.

Il problema può essere affrontato come una variante del problema del commesso viaggiatore (*Traveling Salesman Problem*, o TSP). Nella sua versione base, il problema del TSP è quello di identificare il percorso di lunghezza minima che consentirebbe a un commesso viaggiatore di visitare N città diverse, attraversandole tutte una

sola volta. Già in questa sua formulazione elementare il problema presenta notevoli difficoltà per la sua soluzione numerica. Nel caso della missione di un satellite spazzino si aggiungono diverse difficoltà. La prima è che, mentre la distanza fra ogni coppia di città (che per un dato percorso determina il valore finale dell'indice da minimizzare, ovvero la distanza totale percorsa) è costante, nel caso in esame il costo del trasferimento da un frammento di *debris* al successivo varia nel tempo. Stante quindi una data quantità di carburante disponibile, ogni trasferimento orbitale necessario per avvicinare uno dei frammenti dipenderà non solo dall'orbita su cui si trova il cacciatore di *debris*, ma anche dal momento in cui parte.

Inoltre, stante l'oggettiva impossibilità di raggiungere tutti i frammenti dispersi in orbita con un singolo satellite spazzino, occorre scegliere quali siano i frammenti da catturare fra tutti quelli che si trovano in quella regione dello spazio. Da questo punto di vista la situazione risulta particolarmente critica per le orbite geostazionarie e per quelle eliosincrone, dove il numero di frammenti e satelliti non più operativi presenti è particolarmente elevato. Le orbite eliosincrone, in particolare, sono orbite quasi polari in cui la perturbazione dovuta allo schiacciamento ai poli dell'ellissoide terrestre induce una rotazione del piano orbitale con un periodo pari a un anno solare. Questo fa sì che il piano orbitale mantenga una giacitura con angolo costante rispetto alla direzione di provenienza dei raggi solari. Tale caratteristica è particolarmente importante per i satelliti per l'osservazione della Terra, in quanto le condizioni di illuminazione della superficie terrestre sono costanti nel tempo. La conseguenza è che molti satelliti per telerilevamento vengono collocati su queste orbite, e quindi la densità di corpi orbitanti risulta più elevata che per altre famiglie di orbite. Eliminare in tali regioni dello spazio gli elementi più pericolosi della popolazione di *debris* è dunque cruciale per consentire la prosecuzione delle attività spaziali.

Qualche conclusione

Il quadro sopra presentato appare poco promettente per il futuro delle missioni spaziali. La situazione, già seria, appare in peggioramento,

stante il numero crescente di frammenti in orbita. Tuttavia il primo - e fondamentale - passo per risolvere il problema è stato compiuto: l'intera comunità di chi opera nell'ambito delle attività spaziali è consapevole del problema e, quindi, progetta missioni che minimizzino il rischio di peggiorarlo. Inoltre, tutte le principali agenzie spaziali del mondo soprattutto occidentale (la NASA negli USA, l'ESA in Europa, la JAXA in Giappone) hanno lanciato o stanno per lanciare missioni sperimentali per testare tecniche di *Active Debris Removal*. Accanto a questi soggetti istituzionali, anche molte compagnie private, nell'ambito delle iniziative legate alla cosiddetta *Space Economy*, stanno valutando la possibilità di investire importanti capitali per supportare lo sviluppo di flotte di mezzi per ADR, da usare come servizio da vendere a coloro che intendono utilizzare lo spazio per iniziative di tipo commerciale (e.g. le telecomunicazioni), scientifico o tecnologico. Quindi, ci sono fondate speranze che la sindrome di Kessler rimanga confinata ai film di fantascienza. O almeno questo è l'auspicio.



- [1] N. Johnson: *First Natural Collision of Catalogued Earth Satellites*, *Orbital Debris Quarterly News* Vol. 1 (2 Settembre 1996) NASA Johnson Space Centre. Consultato il 4 ottobre 2022.
- [2] D. Todd: *2021 Launch Year: A new record for both orbital rocket and satellite launch totals*, *Seradata News*(6 gennaio 2022). Consultato il 5 ottobre 2022.
- [3] https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/About_space_debris (Consultato il 5 ottobre 2022)
- [4] R. Jehn: *Dispersion of debris clouds from In-orbit fragmentation events*, *ESA Journal*, 15 (1991) 63.
- [5] D. J. Kessler, B. G. Cour-Palais: *Collision Frequency of Artificial Satellites: The Creation of a Debris Belt*, *Journal of Geophysical Research*, 83 (1978) 2637.
- [6] G. Sánchez-Arriaga, J.R. Sanmartín, E.C. Lorenzini: *Comparison of technologies for deorbiting spacecraft from low-earth-orbit at end of mission*, *Acta Astronautica*, 138 (2017) 536.
- [7] S. Hobbes et al. : *De-Orbit Sail Design for Techdemosat-1* Sixth European Conference on Space Debris. Darmstadt (Germany), 22-25 April 2013.
- [8] D. Zona, G. Avanzini, L. Federici, A. Zavoli: *Optimization of chaser trajectory for active debris removal missions*. 73th International Astronautical Congress (IAC) Paris (France), 18-22 September 2022.

Giulio Avanzini: è professore di Meccanica del Volo presso l'Università del Salento. Ha lavorato all'Istituto Nazionale per Studi ed Esperienze di Architettura Navale (ora INSEAN-CNR) e al Politecnico di Torino come ricercatore. È stato *visiting professor* alla University of Glasgow (UK) e alla University of Illinois at Urbana-Champaign (USA). I suoi interessi di ricerca più recenti includono problemi fondamentali di meccanica orbitale, la dinamica e il controllo di assetto di satelliti, soprattutto in condizioni di attuazione incompleta, il volo autonomo, i velivoli elettrici e ibrido-elettrici e il loro progetto, i mezzi autonomi sottomarini.