

Distr.: General
13 November 2018
Arabic
Original: English/Spanish



لجنة استخدام الفضاء الخارجي
في الأغراض السلمية
اللجنة الفرعية العلمية والتقنية
الدورة السادسة والخمسون
فيينا، ١١-٢٢ شباط/فبراير ٢٠١٩
البند ٧ من جدول الأعمال المؤقت*
الحطام الفضائي

البحوث المتعلقة بالحطام الفضائي وأمان الأجسام الفضائية التي تحمل على متنها مصادر قدرة نووية والمشاكل المتصلة باصطدامها بالحطام الفضائي

مذكّرة من الأمانة

أولاً - مقدمة

١- اتفقت اللجنة الفرعية العلمية والتقنية، التابعة للجنة استخدام الفضاء الخارجي في الأغراض السلمية، في دورتها الخامسة والخمسين، على أنه ينبغي الاستمرار في دعوة الدول الأعضاء والمنظمات الدولية التي لها صفة مراقب دائم لدى اللجنة إلى تقديم تقارير عن البحوث المتعلقة بالحطام الفضائي، وأمان الأجسام الفضائية التي تحمل على متنها مصادر قدرة نووية، والمشاكل المتصلة باصطدام تلك الأجسام بالحطام الفضائي، وطرائق تنفيذ المبادئ التوجيهية لتخفيف الحطام (انظر الوثيقة A/AC.105/1167، الفقرة ١٤٦). وبناء على ذلك، أرسلت إلى الدول الأعضاء والمنظمات الدولية التي لها صفة مراقب دائم رسالة مؤرخة ٢٩ آب/أغسطس ٢٠١٨ تدعوها إلى تقديم تقاريرها بحلول ٥ تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٨، لكي يتسنى إتاحة المعلومات الواردة فيها للجنة الفرعية في دورتها السادسة والخمسين.

٢- وقد أعدت الأمانة هذه الوثيقة بالاستناد إلى المعلومات الواردة من دولتين عضوين هما اليابان والمكسيك ومن الاتحاد الدولي للملاحة الفضائية. وثمة معلومات أخرى مقدمة من اليابان

* A/AC.105/C.1/L.373.



الرجاء إعادة استعمال الورق

051218 051218 V.18-07681 (A)



والاتحاد الدولي تتضمن أرقاماً تتعلق بالحطام الفضائي، وستتاح في شكل ورقة غرفة اجتماعات في الدورة السادسة والخمسين للجنة الفرعية.

ثانياً - الردود الواردة من الدول الأعضاء

اليابان

[الأصل: بالإنكليزية]

[٢ تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٨]

لمحة عامة

استجابةً للطلب الوارد من مكتب شؤون الفضاء الخارجي التابع للأمانة العامة، تفيد اليابان بأن أنشطتها المتعلقة بالحطام الفضائي تضطلع بها أساساً الوكالة اليابانية لاستكشاف الفضاء الجوي (جاكسا).

وقد اختيرت الأنشطة التالية المتعلقة بالحطام الفضائي والتي اضطلعت بها جاكسا خلال عام ٢٠١٨ كأمثلة على التقدم الكبير المحرز، لتقدمها في الدورة المقبلة:

(أ) الاجتماع السنوي السادس والثلاثون للجنة التنسيق المشتركة بين الوكالات والمعنية بالحطام الفضائي (لجنة التنسيق المشتركة)؛

(ب) نتائج تقييم التقارب والبحوث بشأن التكنولوجيا الأساسية من أجل معرفة أحوال الفضاء؛

(ج) البحوث بشأن تكنولوجيا رصد الأجسام في المدار الأرضي المنخفض والمدار المتزامن مع الأرض وتحديد مدارات هذه الأجسام؛

(د) نظام قياس الحطام المتناهي الصغر في الموقع؛

(هـ) الحماية من الاصطدام بالحطام المتناهي الصغر؛

(و) خزان وقود داسر يتلاشى بسهولة عند العودة إلى الغلاف الجوي؛

(ز) الإزالة النشيطة للحطام.

الحالة

الاجتماع السنوي السادس والثلاثون للجنة التنسيق المشتركة

عُقد الاجتماع السنوي السادس والثلاثون للجنة التنسيق المشتركة في حزيران/يونيه في تسوكوبا، اليابان، وشارك فيه أكثر من ١٠٠ خبير تقني من ١١ وكالة. ونظمت جاكسا هذا الاجتماع واستضافته. وفيما يلي المواضيع الرئيسية التي تناوّلها ذلك الاجتماع:

- بيان لجنة التنسيق المشتركة بشأن التشكيلات الكبيرة من السوائل الموجودة في مدار أرضي منخفض

كانت لجنة التنسيق المشتركة قد أصدرت بالفعل هذا البيان الذي لا يتضمن سوى اعتبارات نوعية عن التشكيلات الكبيرة، لأنه لم يكن يوجد في ذلك الوقت سوى نتائج محدودة مستمدة من البحوث المتعلقة بأثر التشكيلات الكبيرة على بيئة الحطام الفضائي. وعُرضت في ذلك الاجتماع نتائج ما أجراه أعضاء لجنة التنسيق المشتركة من تجارب لمحاكاة التشكيلات الكبيرة، وتوصل أعضاء اللجنة إلى توافق آراء بأن التشكيلات الكبيرة لها أثر سلبي على بيئة الحطام الفضائي. ومن ثم، فإن أعضاء لجنة التنسيق المشتركة يعدون حالياً تحديثاً للبيان، يتضمن استخدام شروط أكثر تقييداً وأعداداً رقمية.

- المبادئ التوجيهية بشأن تخفيف الحطام الفضائي الصادرة عن لجنة التنسيق المشتركة

صدرت هذه المبادئ التوجيهية في عام ٢٠٠٢ ونُقحت في عام ٢٠٠٧. وحالياً، شرع العديد من البلدان والهيئات الدولية في تحديد شروط كمية بشأن تخفيف الحطام الفضائي لإدراجها في معاييرها، في حين تعين اعتماد عدد كبير من التعابير النوعية من أجل المبادئ التوجيهية. ومن ثم، فقد استهلكت لجنة التنسيق المشتركة مناقشات ترمي إلى تحديث المبادئ التوجيهية بـقيم رقمية من أجل بناء فهم مشترك أكثر تحديداً بين الأعضاء.

نتائج تقييم التقارب والتكنولوجيا الأساسية للتوعية بأحوال الفضاء

تلقت جاكسا من مركز العمليات الفضائية المشتركة إشعارات بشأن التقارب. وحتى آب/أغسطس ٢٠١٨، عُقد ١٣١ اجتماعاً للنظر في إجراء مناورات لتفادي الاصطدامات بالاستناد إلى الإشعارات، وبلغ عدد المناورات التي نفذتها جاكسا منذ عام ٢٠٠٩ لتفادي اصطدامات المركبات الفضائية في مدار أرضي منخفض ٢٦ مناورة.

التكنولوجيا الأساسية لمعرفة أحوال الفضاء

تحدد جاكسا مدار الأجسام الفضائية باستخدام رادار الاستشعار الموجود في مركز كاميسايارا للحراسة الفضائية وجهاز الاستشعار البصري الموجود في مركز بيساي للحراسة الفضائية، وتنبأ بحالات التقارب الشديد باستخدام آخر جداول المواقع المدارية لسواتلها، وتحسب احتمالات الاصطدام بينها. وتقيم جاكسا أيضاً بالاستناد إلى خبراتها، معايير تقدير التقارب ومناورات تفادي الاصطدام. وفي إطار هذه التقييمات، يتم تحليل اتجاهات كل حالة تقارب وأخطاء التنبؤ الناجمة عن الاضطرابات (على سبيل المثال، عدم التيقن بشأن مقاومة الهواء).

البحوث بشأن تكنولوجيا رصد الأجسام في المدار الأرضي المنخفض والمدار المتزامن مع الأرض وتحديد مدارات هذه الأجسام

بصفة عامة، تُرصد الأجسام في المدار الأرضي المنخفض بواسطة أجهزة الرادار في المقام الأول، ولكن تسعى جاكسا إلى تطبيق النظام البصري من أجل خفض تكلفة البناء والتشغيل على السواء. وقد استُحدث جهاز استشعار كبير مكمل يستخدم أشباه الموصلات المصنوعة من أكسيد فلزي لرصد الأجسام في المدار الأرضي المنخفض. وتحليل البيانات المحصلة من هذا الجهاز،

علاوة على تكنولوجيات معالجة الصور بالاستناد إلى صفائف بوابات قابلة للبرمجة ميدانياً، تتمكن من اكتشاف أجسام في المدار الأرضي المنخفض يبلغ حجمها ١٠ سنتيمترات أو أقل. وقد جرى النظر في استخدام شبكة للمراقبة البصرية من أجل تقليص عبء تفادي الاصطدام، باستخدام بيانات الطقس الآنية التي تصدرها الإدارة الوطنية لدراسة المحيطات والغلاف الجوي التابعة للولايات المتحدة الأمريكية. ومن أجل زيادة فرص رصد الأجسام في المدار الأرضي المنخفض والمدارات المتزامنة مع الأرض، أنشئ في أستراليا موقع للرصد عن بعد، علاوة على مرصد جبل نيوكاسا في اليابان. ويتوافر مقرابان من عيار ٢٥ سنتيمتراً ومقراب واحد من عيار ١٨ سنتيمتراً للاستخدام في مختلف الأغراض.

الحماية من الاصطدام بالحطام المتناهي الصغر

تزايدت كمية الحطام المتناهي الصغر (الذي يقل قطره عن ملليمتر واحد) في المدار الأرضي المنخفض. ويمكن أن يسبب الاصطدام بهذا الحطام ضرراً بالغاً للسواتل لأن متوسط سرعة الاصطدام به يبلغ ١٠ كيلومترات في الثانية.

وبغية تقدير أثر الاصطدام على الساتل، استحدثت جاكسا أداة باسم "تورانودوت" لتقدير أثر الاصطدام. وتحلل هذه الأداة مخاطر الاصطدام بالحطام باستخدام نموذج ثلاثي الأبعاد لمركبة فضائية.

خزان وقود داسر يتلاشى بسهولة عند عودته إلى الغلاف الجوي

يُصنع خزان الوقود الداسر عادة من سبائك التيتانيوم، التي لها نوعية فائقة بسبب خفة وزنها وتوافقها الكيميائي الجيد مع الوقود الداسر. ولكن درجة انصهار هذه السبائك عالية إلى حدٍ يمنع تلاشيها أثناء عودتها إلى الغلاف الجوي، وتشكل خطر إحداث إصابات على الأرض.

وتُجري جاكسا، منذ عام ٢٠١٠، بحثاً لتطوير خزان مبطّن بالألومنيوم ومغلف بمركبات كربونية ينصهر في درجات حرارية أدنى. وعلى سبيل دراسة للجدوى، أجرت الوكالة اختبارات أساسية شملت اختباراً لمعرفة ما إذا كانت بطانة الألومنيوم متوافقة مع وقود الهيدرازين الداسر، فضلاً عن اختبار تسخين بالقوس الكهربائي.

وبعد صنع واختبار نموذج الخزان الهندسي الأقصر EM-1، صنع الخزان EM-2 الكامل الحجم. وشكل الخزان EM-2 هو نفس شكل الخزان العادي، الذي يتضمن جهازاً لإدارة الوقود الداسر. وأجري اختبار للضغط، واختبار للاهتزاز (في ظروف الرطوبة والجفاف)، واختبار للتسرب الخارجي، واختبار لدورة الضغط، واختبار لضغط الانفجار، وأظهرت جميعها نتائج جيدة. ويُعتمد بعد صنع الخزان EM-2 صنع نموذج أولي واختباره.

ويتسم هذا الخزان المصنوع من تركيبة من المواد والخاص بالوقود الداسر بقصر المدة اللازمة لصنعه وانخفاض تكلفته مقارنة بخزان الوقود الداسر المصنوع من التيتانيوم. غير أن دراسات واختبارات إضافية تجرى حالياً من أجل تحديد القابلية للتلاشي أثناء العودة إلى الغلاف الجوي.

الإزالة النشيطة للحطام

نظمت جاكسا وهيكلت برنامجاً بحثياً يرمي إلى إيفاد بعثة منخفضة التكلفة للإزالة النشيطة للحطام. وتتناول أنشطة البحث والتطوير الخاصة بالتكنولوجيا الرئيسية للإزالة النشيطة للحطام المواضيع الرئيسية الثلاثة التالية: الالتقاء بالأجسام غير المتعاونة، وتكنولوجيا اصطبار الأهداف غير المتعاونة، وتكنولوجيا الإنزال من المدار لإزالة أجزاء الحطام الفضائي الكبيرة السليمة. وتتعاون جاكسا حالياً مع شركات خاصة في اليابان تمارس عمليات الإزالة النشيطة للحطام الفضائي بتكلفة منخفضة كعمل تجاري، وتعمل على توفير هذه التكنولوجيات الرئيسية الضرورية لهذا الغرض.

والحبل الكهرودينامي مرشح متوقع لعمليات الدسر للإنزال من المدار في سياق أنشطة الإزالة النشيطة للحطام الفضائي، لأنه يمكن أن يسهم في تقليص حجم المنظومة الكاملة ومن ثم تخفيض التكلفة. ومن أجل التجربة الإيضاحية لبعض التكنولوجيات الأساسية للحبل الكهرودينامي، خططت جاكسا ونفذت بعثة "كايت" (KITE)، وهي تجربة في المدار لحبل كهرودينامي على متن مركبة النقل "H-II Transfer Vehicle 6" أُجريت في عام ٢٠١٧. وعلى الرغم من أن نشر الحبل الكهرودينامي لم ينجح، فقد تم تشغيل كاثود الانبعاث المجالي، الذي هو قسم أساسي من نظام الحبل الكهرودينامي، بصورة جيدة، وتم الحصول على بيانات مدارية فعلية من أجل مواصلة تطوير الحبل الكهرودينامي.

المكسيك

[الأصل: بالإسبانية]

[٧ تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٨]

تتعاون المكسيك، عن طريق وكالة الفضاء المكسيكية، مع الفريق العامل المعني باستخدام أنشطة الفضاء الخارجي في الأمد البعيد، في إطار أفرقة الخبراء الأربعة: (فريق الخبراء ألف) المعني بالاستخدام المستدام للفضاء في دعم التنمية المستدامة على الأرض؛ و(فريق الخبراء باء) المعني بالحطام الفضائي؛ و(فريق الخبراء جيم) المعني بطقس الفضاء؛ و(فريق الخبراء دال) المعني بالأنظمة الرقابية والإرشادات للأطراف الفاعلة في مجال الفضاء.

وفي هذا الشأن، وفيما يتعلق بالبحوث الوطنية في مجال الحطام الفضائي، ووفقاً للممارسة المتصلة بإزالة هذا الحطام، نفذت المكسيك عن طريق جامعاتها العامة بحثاً حول هذا الموضوع. فعلى سبيل المثال، تظطلع جامعة المكسيك الوطنية المستقلة، من خلال كلية الهندسة ومركز التكنولوجيا المتقدمة التابع لها والكائن في خوريكييا، كيريتارو، بأعمال تهدف إلى التخطيط للبعثات التي ستنفذ في المستقبل مع التركيز على الاستخدام.

ويتناول هذا العمل الكشف عن الجسيمات الفضائية، ووضع نماذج رياضية لتولّد الحطام، وقياس ذلك الحطام وإعداد خطط للحماية منه. كما تعمل الجامعة المذكورة على إنشاء حجرة فراغية وحجرة إشعاع كهرومغناطيسي وذلك لاختبار السواتل ومدى قدرتها على تحييد تلك التدخلات، بما يقلل من احتمال حدوث أعطال فيها أثناء العمليات الفضائية وتحويلها إلى حطام

فضائي. ويجري العمل أيضاً على استحداث وحدات دسر تعمل بالطاقة الكهربائية بغية ضمان مغادرة السواتل مدارها عند انتهاء عمرها التشغيلي وعودتها إلى الغلاف الجوي للأرض وانحلالها، ومن ثم تفادي تولّد حطام فضائي إضافي.

وفيما يتعلق برصد الحطام الفضائي ضماناً لأمان المرافق الفضائية، انضمت جامعة سينالوا المستقلة، من خلال استعمال مقرّها، إلى الجهود الدولية التي تقودها الشبكة الدولية للأرصاد البصرية العلمية. ويجري رصد الحطام الفضائي منذ عام ٢٠١٢، ويكتشف كل سنة زهاء اثني عشر جسماً جديداً، من بينها شظايا وسواتل مفقودة وراء المدار الثابت بالنسبة للأرض. وفي كل ليلة، يسجل المرصد الفلكي الذي تشترك في تشغيله الجامعة والشبكة المذكورتان ما يصل إلى ٨٦٤ صورة، ويكتشف ما بين ٣٠ و ٧٠ جسماً فضائياً. وتنفذ في إطار البرنامج عمليات المعالجة الأوتوماتية وتسجيل الإحداثيات. ويمكن إجراء التسجيل يدوياً أيضاً.

وانضم إلى تلك الجهود أيضاً مركز البحوث المتعلقة بالعلوم الفيزيائية والرياضية، التابع لجامعة نويفو ليون المستقلة، والذي يشكل جزءاً من المشروع الدولي لرصد الحطام الفضائي، المؤلف من شبكة تضم ٢٥ مرصداً في أكثر من ١٥ بلداً ويتولى تنسيقه معهد كيلديش التابع لأكاديمية العلوم الروسية. ويشارك في هذه الجهود أيضاً مرصد الحطام الفضائي في الجامعة، الذي تتولى تشغيله كلية العلوم الفيزيائية والرياضية. ويقوم هذا المرصد برصد الحطام الفضائي بهدف تحديد الحطام الذي يمكن أن يلحق أضراراً بالسواتل، فيؤدي، نتيجة لذلك، إلى تعطيل خدمات مثل إشارات الهواتف المحمولة أو الرحلات الجوية، أو يسبب أخطاء في النظام العالمي لتحديد المواقع.

وفضلاً عن ذلك، أسس معهد الفنون التطبيقية الوطني وكلية تيكومان للهندسة الميكانيكية والكهربائية (إيسيمي) رابطة إيسيمي تيكومان للفضاء الجوي، التي تنفذ أنشطة من بينها إجراء بحوث حول مواضيع مثل الحطام الفضائي. وكثيراً ما تنشر هذه الهيئات مقالات عن هذا الموضوع، وتعمم المعلومات داخل المعهد وعلى عامة الجمهور.

وثمة منظمة أخرى تعمل منذ عام ٢٠١١، وهي شبكة العلم والتكنولوجيا، التي تضم مجموعة من الباحثين المهتمين بتكنولوجيا وعلوم الفضاء في المكسيك الذين يسعون إلى حشد الأموال لعقد حلقات دراسية وحلقات عمل ومشاريع متعددة التخصصات تنطوي على التنسيق بين الجهات الفاعلة الوطنية والدولية من الأوساط الأكاديمية والمؤسسات الحكومية ودوائر الأعمال التجارية والمجتمع المدني، بهدف تعزيز تطوير تكنولوجيا وعلوم الفضاء في المكسيك. ومن بين الأهداف المحددة للشبكة دعم البحوث التي تتناول مواضيع علمية مثل الحطام الفضائي، وتنفيذ مشاريع سنوية، وتشجيع الخبراء والباحثين المكسيكيين على المشاركة في تلك البحوث.

وتنفذ كل الأنشطة المذكورة أعلاه وفقاً للوائح التنظيمية الدولية، مثل المبادئ التوجيهية لتخفيف الحطام الفضائي الصادرة عن لجنة التنسيق المشتركة، وتوصية الاتحاد الدولي للاتصالات ITU-R S.1003 بشأن حماية بيئة المدار الثابت بالنسبة للأرض، ومعايير المدونة الأوروبية لقواعد السلوك الخاصة بتخفيف الحطام الفضائي، والمعيار أيزو ٢٤١١٣ بشأن النظم الفضائية: متطلبات تخفيف الحطام الفضائي، الصادر عن المنظمة الدولية لتوحيد المقاييس.

وشاركت المكسيك أيضاً، إلى جانب ألمانيا وتشيكيا وكندا، في المبادرة الرامية إلى إعداد خلاصة لمعايير تخفيف الحطام الفضائي، عُرضت في الدورة الثالثة والخمسين للجنة الفرعية القانونية التابعة للجنة استخدام الفضاء الخارجي في الأغراض السلمية، وهي أول وثيقة تحتوي على معلومات موجهة إلى الدول الأعضاء، ومن بينها المكسيك، بشأن التدابير التنظيمية للحد من الحطام الفضائي وإزالته.

أمان الأجسام الفضائية التي تحمل على متنها مصادر قدرة نووية، والمشاكل المتعلقة باستخدامها بالحطام الفضائي

يُعالج هذا الموضوع في إطار المبادئ التوجيهية بشأن استدامة أنشطة الفضاء الخارجي في الأمد البعيد. ووفقاً لمعاهدة المبادئ المنظمة لأنشطة الدول في ميدان استكشاف واستخدام الفضاء الخارجي، بما في ذلك القمر والأجرام السماوية الأخرى (معاهدة الفضاء الخارجي)، تمسكت المكسيك بموقفها المؤيد لعدم عسكرة الفضاء الخارجي واستخدام الفضاء الخارجي في الأغراض السلمية. ولا يشكّل استخدام مصادر القدرة النووية جزءاً من أي من برامج البلد المتعلقة بالفضاء. ويخضع استخدام هذه المصادر للمعايير الصادرة عن الوكالة الدولية للطاقة الذرية. وفي هذا الصدد، وفي جميع الشؤون المتعلقة باستخدام مصادر القدرة النووية، تمثل سلامة البشر في الفضاء الخارجي وسلامة بيئة الفضاء الخارجي عنصرتين رئيسيتين.

وفي هذا الخصوص، تمثل المبادئ التوجيهية المذكورة أعلاه أساساً لا غنى عنه لإطار الأمان.

وليس للمبادئ المتصلة باستخدام مصادر الطاقة النووية في الفضاء الخارجي ولا للمبادئ التوجيهية صفة الإلزام. وتوفر المادة الرابعة من معاهدة الفضاء الخارجي حماية، وإن كان بقدر محدود.

ثالثاً - الردود الواردة من المنظمات الدولية

الاتحاد الدولي للملاحة الفضائية

[الأصل: بالإنكليزية]

[٥ تشرين الثاني/نوفمبر ٢٠١٨]

ضمان استدامة العمليات الفضائية في المستقبل: مسألة الحطام المداري

تزايد مستمر في أعداد الأجسام المدارية

فتح إطلاق أول ساتل إلى المدار، وهو الساتل سبوتنيك ١، في ٤ تشرين الأول/أكتوبر ١٩٥٧، هذا المجال أمام جميع التطبيقات الفضائية التي تتمتع بها اليوم. وتعتمد حياتنا اليومية بقدر متزايد على تطبيقات تصبح لا غنى عنها وذات أهمية استراتيجية للمناخ وللاتصالات السلكية واللاسلكية وتحديد المواقع والأمن والدفاع والعلم والاستكشاف. ولتلك التطبيقات أهمية اقتصادية

كبيرة أيضاً، حيث توفر الملايين من الوظائف في جميع أنحاء العالم وتربليونات من اليوروهات في الأنشطة المناظرة.

بيد أنه يجدر بالمرء أن يدرك أن رحلة سبوتنيك ١ شكلت أيضاً أول خطوة في التلوث المداري؛ ففي المدار نفسه الذي كان يوجد فيه ذلك الساتل البالغ وزنه ٨٢ كيلوغراماً كانت توجد أيضاً المرحلة الرئيسية للمركبة التي أخذته إلى المدار، وهي مركبة الإطلاق "Semioroka Block A" التي يبلغ وزنها ٦,٥ أطنان، وهيكل انسيابي وزنه ١٠٠ كيلوغرام كان يحمي سبوتنيك أثناء الصعود في الغلاف الجوي. ومن ثم، فإن قرابة ٩٩ في المائة من الكتلة التي ضخت في المدار لم تكن لها وظيفة مفيدة هناك. وقد أرسل سبوتنيك إشارات المتقطعة خلال مدة ٢١ يوماً، ولكنه قضى ما مجموعه ٩٢ يوماً في المدار قبل أن يعود إلى الغلاف الجوي. وهذا يعني أن الساتل لم تكن له أي وظيفة مفيدة خلال ثلاثة أرباع عمره المداري. وكان هذا الساتل "الميت"، والمرحلة الرئيسية لصاروخ إطلاقه، وغطاؤه الواقعي، كلها أجساماً اصطناعية مدارية متوقفة عن العمل، وهذا هو تعريف الحطام الفضائي.

ومنذ عام ١٩٥٧، ازداد عدد وكتلة الأجسام الموجودة في المدار ازدياداً هائلاً.

ومن الواضح أن ذلك يدل دلالة واضحة على صحة قطاع الفضاء الجيدة وعلى الزيادة التي تكاد أن تكون انفجارية في عدد التطبيقات المرتبطة به، ولكنه يثير أيضاً تساؤلات بشأن استدامة عملياتنا المدارية في الأمد البعيد. فكتلة الأجسام المدارية تزداد زيادة خطية منذ عام ١٩٥٧، وقد وصلت حالياً إلى ما يقرب من ٨ ٠٠٠ طن، ووصل عدد الأجسام المفهرسة (التي يبلغ حجمها درجة تكفي لتابعها من الأرض، وذلك في العادة في ١٠ سنتيمترات في المدارات الأرضية المنخفضة أو متر واحد بالقرب من المدار الثابت بالنسبة إلى الأرض) إلى ٢٠ ٠٠٠ جسم حالياً. وقد تبدو هذه الزيادة الكبيرة مستغربة، بالنظر إلى انخفاض عدد حالات الإطلاق الناجحة انخفاضاً كبيراً مقارنة بفترة الحرب الباردة (١٤٠ عملية إطلاق ناجحة في عام ١٩٦٧، و٥٢ عملية في عام ٢٠٠٥)، وأن لوائح تنظيمية دولية للتحكم في ازدياد عدد الأجسام المدارية صدرت لأول مرة قبل ٢٠ عاماً، في سنة ١٩٩٥.

ومن بين الأجسام المفهرسة حالياً البالغ عددها ٢٠ ٠٠٠ جسم، هناك نحو ١ ٧٠٠ ساتل نشط؛ والبقية حطام فضائي، يمثل ٩٢ في المائة من عدد الأجسام المدارية. ومعظم هذا الحطام موجود في مدارات أرضية منخفضة، على ارتفاعات تتراوح بين ٦٠٠ كيلومتر و١ ٢٠٠ كيلومتر، وكذلك بالقرب من المدار الثابت بالنسبة إلى الأرض، على ارتفاع ٣٥ ٨٠٠ كيلومتر. ويتألف نصف الحطام المفهرس من عناصر كاملة وسواتل ميتة ومراحل عليا تركت في المدار، أو مخلفات من العمليات الفضائية؛ ويتألف النصف الآخر من شظايا من أي حجم وبقايا من اصطدامات أو انفجارات في المدار.

وفضلاً عن هذه الأجسام الكبيرة المفهرسة، يدور حول الأرض أيضاً زهاء ٧٥٠ ٠٠٠ جسم يزيد حجمه على سنتيمتر واحد، وأكثر من ١٧٠ مليون جسم يزيد حجمه على مليمتر واحد.

وقد تبدو هذه الأرقام مدهشة، ولكن ينبغي أن يؤخذ في الاعتبار أن الفضاء فوقنا واسع إلى ما لا نهاية. ويوجد في الفضاء المحيط بالأرض ٨٠٠٠ طن من الأجسام الاصطناعية المدارية، أي ما يعادل كتلة برج إيفل، منتشرة في جميع أنحاء الفضاء المحيط بالأرض. والكثافة المناظرة لهذه الأجسام صغيرة للغاية، حيث يبلغ حدها الأقصى ٠,١ جسم في كل مليون كيلومتر مكعب في أشد منطقة اكتظاظاً بها.

ومع ذلك، فهذه الأجسام تتسم بثلاث خصائص متميزة جداً. فأولها هو أن الجسم، بعد أن يدخل في المدار، يبقى فيه عموماً لفترة طويلة. فمثلاً، الساتل الذي يوضع على ارتفاع ١٠٠٠ كيلومتر يبقى هناك لمدة ١٠٠٠ أو ٢٠٠٠ سنة. وثانيها هو أن الجسم ينتقل بسرعة مدارية تقارب ٨ كيلومترات في الثانية، أو ٣٠٠٠٠ كيلومتر في الساعة. وتشكل هذه السرعة عند حسابها تكاملياً عبر آلاف السنين، احتمال اصطدام كبيراً. وثالثها هو إن أي جسم يوضع في مدار أرضي منخفض سوف يسقط حتماً على الأرض، ويشكل في ذلك مخاطر إحداث إصابات.

الحطام المداري يثير مشكلتين رئيسيتين

عودة الأجسام الفضائية الكبيرة إلى الغلاف الجوي غير الخاضعة للتحكم تشكل خطراً على السكان

خلال عودة الأجسام إلى الغلاف الجوي، تتشظى بفعل الضغط الدينامي البالغ الارتفاع، المتناسب مع مربع السرعة. وبعد ذلك، تتعرض الشظايا الناتجة إلى تدفقات حرارية عالية للغاية، تتناسب مع مكعب السرعة، نتيجة للاحتكاك بجزيئات الهواء، وتعمل هذه التدفقات على صهر المواد وتبخرها. ومن المؤسف أن هذه العملية لا تكتمل عموماً، ويمكن أن يبقى نحو ١٠ إلى ٢٠ في المائة من كتلة الحطام الإجمالية بعد عملية العودة، رهنأ بتصميم الحطام. أما المواد المقاومة للانصهار، مثل التيتانيوم والكربون وبعض أنواع الفولاذ، فلا تنصهر أثناء عودتها، وترتطم بسطح الأرض.

ولحسن الحظ، فإن ٧١ في المائة من سطح الأرض مغطى بالمياه، في حين تتألف معظم النسبة المتبقية من مساحات صحراوية واسعة. ولا تشكل المناطق المكتظة بالسكان سوى ٣ في المائة من سطح كوكب الأرض، ولذلك يبقى الخطر على السكان قليلاً.

ويتضح مدى ضخامة المشكلة من أن كل أسبوع يشهد عودة عشوائية لساتل كبير واحد أو مرحلة إطلاق واحدة إلى الغلاف الجوي، بما يشكل احتمالاً قدره ١: ١٠٠٠٠ بإيذاء شخص ما. ولم يتسبب ذلك قط في أي إصابات معروفة حتى اليوم، رغم العثور على قطع كبيرة عديدة من الحطام قرب مناطق مأهولة، مع حالات نادرة من وقوع أضرار صغيرة بالمباني. وتبقى هذه المشكلة عالقة فوق رؤوسنا كسيف دموقليس: فنحن نواصل إطلاق المراحل الكبيرة أو السواتل مع علمنا بأن الأمر سينتهي بها إلى العودة عشوائياً إلى الغلاف الجوي، بما يولد خطراً كبيراً على السكان.

مخاطر الاصطدام في المدار

للاصطدامات في المدار عواقب متباينة. وهي لا تعود مشكلة أمان، بل تصبح خطراً تجارياً مرتبطاً بالضرر الذي يصيب السواتل العاملة المفيدة لحياتنا اليومية، أو الأساسية لها في كثير من الأحيان.

وهناك عدة مخاطر محتملة.

فالاصطدام بين قطعة صغيرة من الحطام غير المفهرس وساتل نشط يمكن أن يسبب خسارة المركبة الفضائية وظيفياً. فالطاقة الحركية التي تنطلق في الاصطدام عالية للغاية (الاصطدام بقطعة حطام قطرها ملليمتر واحد يُطلق طاقة قدرها كيلو جول واحد، يعادل إطلاق كرة لعبة البولينغ بسرعة ١٠٠ كيلومتر في الساعة). وفي هذه الظروف، يمكن أن يتسبب حتى اصطدام صغير في خسارة ساتل، وذلك مثلاً إذا ضرب الاصطدام الحاسوب الموجود على متن الساتل. وقد بينت عدة دراسات أن درجة مقدار احتمال خسارة الساتل بسبب الاصطدام تبلغ ٥ في المائة. والحطام الفضائي هو حالياً السبب الأول في حالات خسارة السواتل في المدار. وبما أن الحطام الصغير بحكم تعريفه غير مفهرس، ولذلك يخفى عن الرؤية، فلا سبيل لمنع وقوع هذه الاصطدامات.

ولا تحدث الاصطدامات بين الأجسام الكبيرة إلا نادراً جداً، أي مرة كل خمس سنوات أو ثماني، رهناً بالنموذج المستخدم. غير أن كل اصطدام يولّد كمية كبيرة من الحطام، ولذلك يمكن أن يسبب زيادة كبيرة في الخطر الإجمالي في المدار. ويزيد هذا التأثير التجددي الذي يحدث عقب الاصطدامات من احتمال حدوث زيادة لا يمكن السيطرة عليها في كمية الحطام. ويُعرف ذلك باسم متلازمة كيسلر، وهي نظرية وضعت منذ عام ١٩٧٨. ويمكن أن تفضي هذه المتلازمة إلى وضع لا يمكن التحكم فيه، حتى إذا أوقفنا الاضطلاع بأي نشاط فضائي في المستقبل. فعلى سبيل المثال، ولّد الاصطدام بين الساتل إيريديوم-٣٣ والساتل كوسموس-٢٢٥١ في شباط/فبراير ٢٠٠٩ أكثر من ٢ ٢٠٠ قطعة من الحطام الكبير المفهرس وعدداً لا يحصى من قطع الحطام الأصغر حجماً.

وتبين عمليات المحاكاة التي قادتها الإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء (ناسا) التابعة للولايات المتحدة الأمريكية، ثم قادتها سبع وكالات منضوية إلى لجنة التنسيق المشتركة، أنه حتى ولو أوقفنا جميع الأنشطة الفضائية تماماً، فإن كمية الحطام الفضائي ستزداد تزايداً أسياً في السنوات القادمة. وعلى سبيل المثال، فإن نتائج تجارب المحاكاة التي قادتها ناسا على افتراض عدم إجراء أي إطلاق بعد عام ٢٠٠٦ تشير إلى حدوث زيادة واضحة في الأمد البعيد بسبب الاصطدامات بين الأجسام الكبيرة.

التدابير الرامية إلى الحد من عدد أجسام الحطام المداري في المستقبل وضمان استدامة العمليات في الفضاء

مجموعة دولية من الشروط تتسم بالكفاءة وتقبل على نطاق واسع

يتمثل أهم تدبير، بل التدبير الأساسي، في وضع قواعد على الصعيد الدولي لمنع تولد حطام جديد نتيجة للعمليات الفضائية المستقبلية. ويعرف ذلك باسم تخفيف الحطام الفضائي، ويمكن تلخيصه في خمسة إجراءات رفيعة المستوى.

أولاً، الالتزام بالحد من توليد الحطام أثناء عمليات الإطلاق العادية، وتفادي أي تدمير اختياري للسواتل في المدار.

وثانياً، يجب تفادي الانفجارات العرضية في المدار، بواسطة تخميد جميع الأجسام الفضائية المتروكة في المدار، أي بإزالة أي مصادر للطاقة المخزونة من قبيل بقايا الوقود الداسر وتكليف ضغط الخزانات وطاقة البطاريات، أو بوقف عجلات القصور الذاتي.

وثالثاً، من الضروري الحد من العمر المداري للأجسام الفضائية. ويشترط أن تكون مدة بقاء السواتل والمراحل العليا لمركبات الإطلاق في منطقتين محميتين أقل من ٢٥ عاماً بعد انتهاء عمرها التشغيلي، وهاتان المنطقتان هما المدارات الأرضية المنخفضة والمناطق القريبة من المدار الثابت بالنسبة إلى الأرض.

والتدبير الرابع هو التوصية بأن يبذل مشغلو السواتل قصارى جهدهم لمنع الاصطدامات بين السواتل في المدار عندما تكون المعلومات متاحة بدقة كافية ويكون الساتل قابلاً للمناورة.

وأخيراً، يوصى بالتقليل إلى أدنى حد ممكن من المخاطر التي يتعرض لها السكان نتيجة لعودة الأجسام بطريقة لا يمكن التحكم فيها إلى الغلاف الجوي. ولبلوغ هذه الغاية، ينبغي أن يقوم المشغلون بعملية عودة إلى الغلاف الجوي خاضعة للتحكم في حالة أي بعثة تشكل احتمال وقوع إصابات يزيد على واحد في كل ١٠ ٠٠٠.

ويمكن الاطلاع على هذه القواعد في نصوص عديدة، على الصعيدين الوطني والدولي كليهما. ويقتصر الهدف من القائمة التالية على بيان أن هذه التوصيات مقدّمة منذ أكثر من ٢٠ عاماً.

فيبدو أن أول منشور أعرب فيه عن القلق بشأن استدامة العمليات الفضائية في الأمد البعيد كان صحيفة يابانية صادرة في عام ١٩٧١. وبعد هذه الأفكار الأولية، وردت إشارات عديدة أخرى في أعمال نشرتها ناسا ابتداء من عام ١٩٧٤، وفي أعمال نشرت في أوروبا في عام ١٩٨٧، بما أدى إلى وضع أول معايير وطنية، وأبرزها المعايير التي أصدرتها ناسا في عام ١٩٩٥، والوكالة الوطنية للتنمية الفضائية في اليابان، التي أصبحت الآن الوكالة اليابانية لاستكشاف الفضاء، في عام ١٩٩٦، والمركز الوطني للدراسات الفضائية في باريس، في عام ١٩٩٩.

وكان أول نص اعتمد على الصعيد الدولي هو المبادئ التوجيهية لتخفيف الحطام الفضائي التي أصدرتها لجنة التنسيق المشتركة، وهي مجموعة توصيات أعدتها تلك اللجنة التي تضم حالياً وكالات الفضاء الرئيسية البالغ عددها ١٣ وكالة. وقد اعتمدت تلك المبادئ التوجيهية بالإجماع في عام ٢٠٠٢ ونُقحت في عام ٢٠٠٧. وعلى الصعيد الأوروبي، وضعت الصيغة النهائية لمعايير مماثلة في عام ٢٠٠٠ وأقرت في حزيران/يونيه ٢٠٠٤.

وقد عدلت المبادئ التوجيهية الصادرة عن لجنة التنسيق المشتركة من جانب لجنة الفضاء التابعة للأمم المتحدة، أي لجنة استخدام الفضاء الخارجي في الأغراض السلمية، ومن جانب الجمعية العامة للأمم المتحدة في قرار اعتمد في جلسة عامة في عام ٢٠٠٧.

وكانت فرنسا أول بلد يشرع قانوناً يتناول هذا الموضوع، وهو قانون العمليات الفضائية (*Loi relative aux opérations spatiales*)، الذي دخل حيز النفاذ في عام ٢٠١٠ وعُدل في عام ٢٠١٧.

وأصدرت المنظمة الدولية لتوحيد المقاييس، منذ عام ٢٠١١، عدداً من المعايير المخصصة للحطام الفضائي، ولا سيما المعيار أيزو ٢٤١١٣، الذي هو أعلى المعايير مستوى. وإذا أمكن تطبيق هذا المعيار تطبيقاً فعالاً على جميع المشغلين والمشيدين، فسيُتيح إبطاء ازدياد التلوث الفضائي بكفاءة.

وبالتوازي مع ذلك، أنشأت لجنة استخدام الفضاء الخارجي في الأغراض السلمية الفريق العامل المعني باستدامة أنشطة الفضاء الخارجي في الأمد البعيد في عام ٢٠١٠، وكلفته بمهمة إعداد تقرير بتوافق الآراء يتضمن مبادئ توجيهية طوعية بشأن أفضل الممارسات ويكون موجهاً لجميع الجهات الفاعلة في مجال الفضاء، للمساعدة على ضمان استدامة استخدام الفضاء الخارجي في الأمد البعيد. وقد أثارت عملية إقرار المبادئ التوجيهية، البالغ عددها ٣٧ مبدئاً بتوافق آراء جميع الأعضاء، بعض النقاط الصعبة، ولم تتم الموافقة حتى الآن إلا على ١٢ مبدئاً. بيد أن الفريق العامل لا يزال ناشطاً، وحالما يتم إقرار المجموعة الكاملة من مبادئ الأمم المتحدة التوجيهية، فستصبح أداة بالغة الفعالية.

وأخيراً، فقد أعد عدد كبير من المشغلين منذ وقت قريب ميثاقاً مكرساً لهذا الغرض، تُقترح فيه مبادئ توجيهية أشد صرامة من المبادئ المقترحة في الوثائق الأخرى. وما زالت هذه المجموعة من الممارسات الفضلى في وضعية مسودة، وليس واضحاً بعد كيف يمكن أن تصير صكاً تنظيمياً.

الحماية من الاصطدامات

التدبير الثاني الذي يرمي إلى الحد من الآثار الناجمة عن الأجسام المدارية هو تزويد جميع السواتل العاملة بدروع واقية. ومن شأن وضع صفائح معدنية أو قطع من نسيج "كيفلار"، أو حتى رغوة كثيفة، خارج الجدار الهيكلي، أن يؤدي إلى تهشيم الحطام الداخل وتحويله إلى سحابة من جزيئات بالغة الصغر غير قادرة على اختراق الهيكل الأساسي أو الإضرار به على نحو آخر.

وتتنوع التركيبات الممكنة تنوعاً شديداً، وتتوقف على نوع الحطام المراد وقفه، وكذلك يتنوع مدار الساتل المدرع وتوجهه ومدى حرجية المناطق التي تلزم وقايتها. ويجري الآن عدد

كبير جداً من الاختبارات في جميع مناطق العالم بهدف التوصل إلى التوليفات المثلى. وتؤدي اختبارات أرضية باستخدام مدافع الغاز الخفيف، التي كثيراً ما تتألف من مرحلتين وتدفع كريات معدنية صغيرة بقطر ملليمتر واحد بسرعات تصل إلى ١٢ كيلومتراً في الثانية.

ومن المؤسف أن الدروع من الأنواع المبينة أعلاه محدودة الفعالية، إذ يمكنها حماية جدار من جسم مصطدم يصل قطره إلى سنتيمتر واحد، لا أكثر. ومن ثم فمن أجل تفادي الضرر الناتج من اصطدام الحطام الأكبر حجماً، يتعين إجراء مناورات للسواتل لإبعادها عن طريق الأذى، وهذا لا يمكن إلا إذا كان مدار هذا الحطام وموقعه معروفين. والحطام الذي يزيد قطره عن ١٠ سنتيمترات مفهرس، ولذلك يمكن حماية السواتل منه بإجراء مناورة لتفادي الاصطدام. غير أنه لا يمكن حماية السواتل من الحطام الذي يقل حجمه عن ١٠ سنتيمترات (لأنه لا يمكن فهرسته) ولكنه أكبر من سنتيمتر واحد (لأن الدروع الواقية لا يمكنها مقاومته).

كما تسبب الدروع مشاكل عديدة تتعلق بالحجم والكتلة والتكلفة، أو حتى مشاكل في النظام، مثل التوازن الحراري للسواتل. وفي الممارسة العملية، يقتصر استخدام الدروع الآن على السواتل المأهولة، مثل محطة الفضاء الدولية، ومركبات النقل المؤتمتة الأوروبية، ومركبة النقل H-II اليابانية، أو بعض السواتل العسكرية الكبيرة التابعة للولايات المتحدة.

تفادي الاصطدام

من التدابير المتسمة بالكفاءة لوقاية السواتل العاملة المجهزة بنظام داسر على متنها تفادي اصطدامها بالأجسام المفهرسة.

ويمثل هذا التدبير نشاطاً معقداً للغاية، لأنه يلزم "تمديد" مدارات جميع الأجسام المحتملة الخطورة على مدى عدة أيام من أجل تحديد الاصطدامات المحتملة. وتستند الحسابات الإحصائية إلى احتمالات الاصطدام التي تحدّد بواسطة مصفوفات التغير الخاصة بكل جسم على حدة. ويؤدي كل تحذير إلى إجراء تحليل للمسار المحتمل للجسم المصطدم، بالعودة إلى الماضي، وقد يستلزم ذلك إجراء قياسات مخصصة من وسائل مخصصة للمراقبة الفضائية، كالرادارات والمقاريب. ويوفر مركز العمليات الفضائية المشتركة أيضاً بطريقة مباشرة بعض رسائل بيانات التقارب.

وتستفيد هذه العملية من شبكات المراقبة والتتبع الفضائيين القائمة، وأساساً الشبكات التابعة للولايات المتحدة، ولكن أيضاً الشبكة الدولية للأرصاد البصرية العلمية، وشبكات وطنية مثل النظام الفرنسي المستند إلى الشبكة الكبرى المهيأة لمراقبة الفضاء (GRAVES)، ومبادرات تجارية مثل مركز العمليات التجارية الفضائية التابع لشركة AGI ومثل مختبرات ليو (LeoLabs).

وتتيح هذه التحليلات معرفة متى يتعين إجراء مناورة للسواتل من أجل خفض احتمال الاصطدام. وعلى وجه التقريب، يحتاج كل ساتل إلى مناورة واحدة في السنة لتفادي الاصطدامات.

والمشكلة الرئيسية هي عدم دقة البارامترات المدارية للحطام، حيث تقع هذه الدقة عادة في نطاق ما بين ١٠٠ متر و١٠٠٠ متر. ويؤدي ذلك إلى ارتفاع شديد في معدل الإنذارات الخاطئة، الذي يبلغ ٩٩,٩٩ في المائة. ومن أولويات التحسين اللازمة في السنوات المقبلة رفع

درجات دقة البارامترات المدارية. ويمكن تحقيق ذلك باستخدام تقنيات تحديد المدى بالليزر، إما من الأرض أو من المدار.

تفادي الاصطدام في الوقت المناسب بين القطع الكبيرة من الحطام غير القابل للمناورة

لا تتناول عملية تفادي الاصطدام المبينة في الفقرة السابقة إلا السواتل العاملة، التي تمثل أقل من ٢٠ في المائة من الأجسام الكبيرة جداً الموجودة في مدار قريب من الأرض (السواتل أو مراحل مركبات الإطلاق). وهذا يعني أنها تتسم بالكفاءة في وقاية السواتل العاملة ولكن لا أثر لها في إبطاء تزايد عدد الأجسام المدارية الناتجة عن الاصطدامات بين الأجسام الكبيرة غير القابلة للمناورة، وهي السائدة إحصائياً، ومن ثم فإن دور هذه العملية محدود في ضمان استدامة العمليات الفضائية في الأمد البعيد.

ولذلك تجري في السنوات الأخيرة دراسة تدبير إضافي، وهو تفادي الاصطدامات التي يمكن التنبؤ بوقوعها بين الأجسام الكبيرة المهملّة. والفكرة الأساسية هي أنه عند وجود احتمال بوقوع اصطدام في غضون الأيام القليلة التالية، أي عندما يتجاوز احتمال الاصطدام الحد الأعلى المسموح به، تُنفَّذ بعثة لتعديل مسار إحدى قطعتي الحطام تعديلاً قليلاً جداً من أجل تفادي الاصطدام أو استعادة الهوامش المقبولة.

وتُدرس الآن تقنيات مختلفة لتفادي الاصطدام في الوقت المناسب، وذلك في المقام الأول في الولايات المتحدة وفرنسا، تتمثل على سبيل المثال في نشر سحابة من الغاز أو الغبار أو الجسيمات أمام الحطام باستخدام صاروخ سير من أجل زيادة مقاومة الهواء لفترة وجيزة وإبطاء الحطام. وهذه الطرائق واعدة جداً، إذ يبدو أن تحقيقها أبسط بكثير من عملية الإزالة النشيطة للحطام، ومن شأن استخدامها أن يقتصر على حالات الاحتمال العالي للاصطدام، أي كل خمس سنوات أو ست في العادة. وثمة تقنيات أخرى، تشارك في دراستها الولايات المتحدة وفرنسا أيضاً، تستخدم أجهزة ليزر في المدار لتعديل مسار الحطام بواسطة نبضات قصيرة للغاية ولكن بالغة الشدة، تؤدي إلى تبخر سطح الحطام محلياً وتعديل سرعته قليلاً. وقد طُرحت اقتراحات بشأن التحكم المستمر في مواقع جميع قطع الحطام الكبيرة باستخدام أجهزة ليزر صغيرة نسبياً في المدار من أجل تقليل احتمالات الاصطدام إلى أدنى حد ممكن (إدارة مرور الحطام الكبير).

الإزالة النشيطة للحطام

ثمة تدبير هام تجري دراسته منذ أكثر من ١٥ عاماً وهو استعادة الحطام ذي الحجم الكبير جداً الذي يحتمل أن يشكل خطراً، أي الحطام الذي يرجح أن يولد أكبر كمية من الحطام الثانوي بعد حدوث اصطدام. وتُعرف هذه التقنية والتقنيات الأخرى المماثلة باسم الإزالة النشيطة للحطام.

وتأتي هذه الاستراتيجية عقب نتائج الدراسات التي أجرتها أولاً "ناسا" ونشرت في عام ٢٠١٠ ثم أجراها معظم وفود لجنة التنسيق المشتركة. وعلى افتراض الامتثال الجيد جداً لتدابير التخفيف (عدم حدوث تشظّي في المدار، وقاعدة ٢٥ عاماً في المدار الأرضي المنخفض)،

فحينئذ ستكون استعادة ٥ قطع إلى ١٠ من الحطام مختارة جيداً من أشد المدارات اكتظاظاً كافية لتحقيق استقرار الحطام المداري.

وقد طُرح عدد كبير جداً من الحلول الممكنة، وجرت دراستها وتجربتها على الأرض، وفي ظروف الطيران في حالة انعدام الجاذبية، ومؤخراً في المدار، بهدف "تنظيف" الفضاء الخارجي. وتندرج هذه الحلول في عدد من الفئات (وفيما يلي ملخص غير شامل لها).

أولاً، توجد حلول قليلة لا تنطوي على تلامس، مثل استخدام الرسن الإلكترونيات الافتراضي، أو جهاز ليزر، لرفع السواتل القديمة المتروكة في مدار ثابت بالنسبة للأرض إلى مدارات أعلى.

ثم هناك حلول عديدة مستمدة من تقنيات الصيد، تستعمل الخطاطيف والحرايب والشباك لالتقاط الحطام وسحبه باستخدام حبل طويل إلى أن يعود إلى الغلاف الجوي بطريقة خاضعة للتحكم.

وبالإضافة إلى ذلك، هناك عدة أفكار تستند إلى زيادة مقاومة الهواء للحطام من أجل تعجيل فقدانه للارتفاع، وذلك مثلاً باستخدام مركبة مطاردة مخصصة لتزويد الحطام بوسادة هوائية كبيرة أو شراع كبير، بما يوسع سطح التركيبة إلى حد بعيد. ويمكن أيضاً أن يركب على الحطام حبل إلكترودينامي، أي سلك ناقل يتفاعل مع المجال المغنطيسي المحيط بكوكب الأرض، لغرض توليد قوى لورنتز التي تبطئ الحطام، بما يقلص عمره المداري. ومع ذلك، فإن لهذه الحلول مثالب هامة، لأنها تسبب العودة غير المتحكم فيها ومن ثم يَحتمل أن تشكل خطراً على السكان.

وأخيراً، فإن الحلول الأكثر تقليدية تتمثل في التقاط الحطام بواسطة ذراع روبوتية، مع وجود بدائل متعددة قائمة على وجود مجسّات أو مشابك تمسك الحطام، ثم إنزاله من المدار بطريقة خاضعة للتحكم وإعادةه إلى الغلاف الجوي.

ومستوى النضج التقني العام لهذه الحلول مرتفع، وقد أحرقت بالفعل تجارب توضيحية عديدة لها، بما في ذلك في المدار. ومن ثم، فإن طبيعة المشاكل الرئيسية ليست تقنية بل مالية، لأن تنفيذ هذه العمليات سيكون مكلفاً جداً في حال عدم وجود خطة تجارية واضحة تفسح المجال أمام الأنشطة التجارية. وهناك أيضاً عقبات قانونية عديدة مرتبطة بالمسؤولية عن العمليات، أو حتى شواغل عسكرية، حيث يمكن لبعض هذه العمليات أن تفسح المجال أمام عسكرة الفضاء.

وهناك عدة أفرقة عاملة على الصعيد الدولي تنظر في هذه المسائل بنشاط، لا سيما في لجنة استخدام الفضاء الخارجي في الأغراض السلمية في إطار المبادرة المتعلقة باستدامة أنشطة الفضاء الخارجي في الأمد البعيد. وقد تتخذ الجهود الأولية للإزالة النشيطة للحطام في غضون وقت أقرب مما كان مأمولاً، وذلك بفضل ظهور القاطرات الفضائية. ويجري الآن استحداث العديد من هذه المركبات المدارية المتعددة الأغراض، لا سيما في الولايات المتحدة وفرنسا، ويمكن أيضاً أن يكون إنزال أجسام الحطام الكبيرة من المدار آخر نشاط تقوم به القاطرة الفضائية أو آخر مناورة تقوم بها عند انتهاء عمرها التشغيلي بعد إكمال عملياتها المدارية. كما يجري الآن أيضاً استحداث مركبات

مدارية مخصصة لإنزال سواتل التشكيلات الجانحة من المدار، بما يشير إلى إمكانية وضع خطة تجارية إيجابية في مجال الإزالة النشيطة للحطام.

الاستنتاج: وضع مثير للقلق

المستوى الراهن للامتثال لقواعد التخفيف شديد الانخفاض

يبلغ مستوى الامتثال نحو ٥٥ في المائة عموماً، لكن هذا الرقم قد يكون متسماً بالتفاوت بعض الشيء، لأنه يشمل جميع السواتل الصغيرة المطلقة في ارتفاعات منخفضة، التي تعود إلى الغلاف الجوي سريعاً. أما إذا لم نضع في اعتبارنا سوى المركبات الفضائية الموجودة على ارتفاع يتجاوز ٦٠٠ كيلومتر، فإن مستوى الامتثال يكون أقل من ٢٠ في المائة. وإذا لم نضع في اعتبارنا سوى السواتل التي تزن أكثر من ١٠٠ كيلوغرام، فإن معدل الامتثال ينخفض إلى ٦ في المائة.

وما زال نمو كتلة وعدد قطع الحطام المنفردة الموجودة في المدار مستمراً دون أي دلالة على أنه سينخفض. ولا يزال عدد كبير من حالات الاصطدام والتشظي يحدث في المدار كل سنة، ولا تزال تنبعث العشرات من الأجسام الكبيرة أثناء عمليات الإطلاق الفضائي، علاوة على السواتل والمراحل العليا من مركبات الإطلاق.

وقد بينت دراسات كثيرة أن مستوى الامتثال لقواعد تخفيف الحطام ينبغي أن يتجاوز ٩٠ في المائة لكي يتسنى الحد من تزايد الحطام في المدارات الأرضية.

ظهور السواتل النانوية يطرح تساؤلات عديدة

نشهد في الوقت الحاضر تزايداً انفجارياً في عدد السواتل البالغة الصغر التي تُضخ في المدار. وتحدث سواتل كيوبسات هذه تغييراً كبيراً في الوضع الحالي للسواتل، وهي سواتل ذكية تستفيد استفادة كاملة من النممة وتتيح عدداً كبيراً من التطبيقات الفضائية بتكلفة استحداث وإنتاج وإطلاق شديدة الانخفاض. ونتيجة لذلك، تُطلق عدة مئات منها سنوياً، ولكنها في معظم الحالات لا يوجد بها جهاز داسر، ومن ثم فهي غير قادرة على تفادي الاصطدامات أو تقليص عمرها المداري. وكثيراً ما تطلق هذه السواتل إلى مدارات عالية الارتفاع ولا تمتثل لقاعدة ٢٥ عاماً. وقد أُطلق في عام ٢٠١٧ نحو ٤٣٠ من سواتل كيوبسات، ويتوقع أن يزيد عدد هذه السواتل المطلقة على ٥٠٠ ساتل في السنة اعتباراً من عام ٢٠١٨.

وتقوم الآن لجنة التنسيق المشتركة والمنظمة الدولية لتوحيد المقاييس بوضع قواعد إضافية للسواتل غير القادرة على تفادي الاصطدامات، تضع حداً أقصى لعمرها المداري يبلغ ٢٥ عاماً بعد إطلاقها وحداً أقصى لارتفاعها يبلغ نحو ٦٠٠ كيلومتر.

التشكيلات الكبيرة

تثير التشكيلات الكبيرة مشكلة مختلفة. فهناك خطط لإطلاق تشكيلات تتألف كل واحدة منها من آلاف السواتل التي يبلغ وزنها ٢٠٠ إلى ٥٠٠ كيلوغرام، وذلك عموماً في مدارات بالغة الاستقرار. فعلى سبيل المثال، سينشر في إطار مبادرة "الشبكة الواحدة" ما يقرب

من ١٠٠٠ ساتل إنترنت اعتباراً من منتصف عام ٢٠١٨ في مدار دائري شديد الميلان ارتفاعه ١٢٠٠ كيلومتر ومستقر لآلاف السنين. وقد لا يشكل ذلك سوى البداية. فقد أعلنت شركة "بوينغ" عن تشكيلتها الخاصة المؤلفة من ٢٩٠٠ ساتل. كما أعلنت شركة SpaceX عن تشكيلتها الأولى المؤلفة من ٢٨٠٠ ساتل، وعن تشكيلتها ثانية مؤلفة من ٧٥٠٠ ساتل. وتلقت لجنة الاتصالات الاتحادية التابعة للولايات المتحدة طلبات لإطلاق أكثر من ١٧٠٠٠ ساتل جديد في غضون السنوات العشر المقبلة (على سبيل التنويه، لا يوجد حالياً سوى ١٧٠٠ ساتل عامل).

وكثيراً ما يكون المشغلون وافدين جدداً، أي جهات فاعلة من "سيلكون فالي" ليست لديها أي خبرة في العمليات الفضائية. غير أنه يبدو أن هؤلاء المشغلين يدركون جيداً جميع قواعد تخفيف الحطام الفضائي، ومن ثم لا يزال هناك أمل كبير في أن تؤدي هذه العمليات الضخمة التي تجري في مدارات شديدة الاستقرار إلى وضع يمكن السيطرة عليه في الأمد البعيد، بشرط الامتثال الصارم للقواعد الدولية.

السياج الفضائي الراداري الجديد

يقوم السلاح الجوي للولايات المتحدة حالياً ببناء نظام راداري جديد يعمل في نطاق الترددات "S" ويعرف باسم سياج الفضاء، سيصبح جاهزاً للتشغيل في عام ٢٠١٩. وسيكون هذا السياج قادراً على تتبع أجسام يقل حجمها بكثير عن حجم الأجسام المفهرسة حالياً، يمكن أن تتراوح أقطارها بين ٣ و ٥ سنتيمترات. وهذه الميزة الإضافية في مجال المراقبة والتتبع الفضائيين نبأ ممتاز، لكنها تعني أن عدد الأجسام المفهرسة سيرتفع بمقدار يمكن أن يبلغ ٢٠٠٠٠٠ جسم. وسيؤدي ذلك إلى زيادة هائلة في عدد إنذارات الاصطدام، ما لم يتزامن مع تحسن كبير في الدقة المدارية.

إدارة حركة المرور في الفضاء

يبدو أن هناك وعياً متزايداً بضرورة اتخاذ إجراء عاجل للمحافظة على الأنشطة المدارية من أجل المستقبل. ويجري الآن قدر كبير من العمل على الصعيد الدولي بشأن إدارة حركة المرور في الفضاء بهدف ضمان الأمن في الفضاء الخارجي، علماً بأن المعهد الأوروبي لسياسات الفضاء عرف هذا الأمن بأنه حماية البنية الأساسية للفضاء من التهديدات والمخاطر الطبيعية والناجمة عن الأنشطة البشرية، من أجل كفاءة استدامة الأنشطة الفضائية. ويقترح بعض الباحثين إنشاء منظمة فضائية مدنية دولية جديدة وتكليفها بمجموعة طموحة جداً من المهام تمتد من إدارة قواعد تخفيف الحطام إلى فرض رسوم على الوصول إلى الفضاء، مع منحها السلطات اللازمة لإنفاذها.

ومثل هذه المبادرات جيدة، لكنها مع ذلك تهدف أساساً إلى توفير الحماية في الأمد القريب للسواتل العاملة. ولم تقدم حتى الآن أي اقتراحات تقريباً لتفادي توليد آلاف القطع الجديدة من الحطام الفضائي الناتج عن الاصطدامات بين أجسام الحطام الكبيرة غير القابلة للمناورة. وما دام لا يوجد حل، فستبقى العمليات الفضائية التي تنفذ في المستقبل مهددة بمخاطر كبيرة.