

УДК 621.396.969

А. Н. Загорулько<sup>1</sup>, О. А. Моргун<sup>2</sup>, В. І. Богом'я<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Національний центр управління та випробувань космічних засобів, Євпаторія

<sup>2</sup>Рада Національної безпеки та оборони, Київ

<sup>3</sup>Київський оперативний центр Національного центру управління та випробувань космічних засобів, Київ

## Аналіз можливості використання ефекту розсіювання для визначення космічного сміття

Надійшла до редакції 26.06.06

Проведено аналіз можливості використання ефекту релєвського розсіювання для пошуку космічного сміття. Показано, що є реальна можливість визначення геометричних розмірів малих об'єктів космічного сміття.

Одним із факторів освоєння космічного простору є проблема засмічення навколоземного космічного простору продуктами техногенного характеру (космічне сміття). Основними причинами й джерелами засмічення космічного простору є: фрагментація об'єктів космічної техніки в результаті несанкціонованих вибухів і руйнувань; викидання у космічний простір операційних елементів (пружин, штовхачів, заглушок та ін.); викидання продуктів роботи двигунів, незгорілого твердого палива; ступені ракет-носіїв, розгінних блоків і КА, що закінчили своє активне функціонування; руйнування космічних об'єктів внаслідок їхніх зіткнень на орбіті один з одним або із частками космічного сміття; ерозія матеріалів з поверхні КА й засобів виведення; тросові системи, що відділяються від КА після використання; викидання в космічний простір засобів забезпечення життєдіяльності пілотованих КА й орбітальних станцій та ін.

Проблема засмічення навколоземного космічного простору гостро порушує питання про ризик завдання пошкоджень функціонуючим космічним апаратам та засобам їхнього виведення. Частки, щільність яких відповідає щільності кам'яних або залізних метеоритів, при швидкостях 50—70 км/с здатні пробивати металеву оболон-

ку товщиною 8—20 діаметрів частки. Так, частинка діаметром 0.1 мм здатна пробити металеву оболонку товщиною 0.8—2 мм. Небезпечними прийнято вважати частки з розмірами більше 1 мм, здатними виводити з ладу життєво важливі системи космічних апаратів та ракет-носіїв. Частки меншого розміру можуть наносити ушкодження, що призводять до погіршення характеристик окремих систем і вузлів космічних апаратів [2, 3].

За даними російських експертів зараз спостерігається значна динаміка збільшення кількості космічних об'єктів на навколоземній орбіті (табл. 1) [1].

Космічні об'єкти штучного походження, менші ніж 20 см, не враховуються в каталогах, однак їхня кількість перевищує кілька десятків тисяч [2].

Таблиця 1. Кількість космічних об'єктів на навколоземній орбіті

Роки	Об'єктів	КА	З них діючих КА
1992	6758	1948	497
1999	8089	2370	668
2004	8944	2830	937

Керування польотами космічних апаратів різного типу й призначення, планування роботи всіх служб і засобів наземного автоматизованого комплексу управління здійснюється на основі врахування космічної обстановки, що безупинно змінюється. Під терміном «космічна обстановка» прийнято розуміти сукупність всіх космічних об'єктів, факторів і умов космічного простору, які можуть вплинути на підготовку, хід і результат функціонування космічних апаратів (КА) [1—3].

Можливості сучасних засобів контролю космічної обстановки (як оптичних, так і радіотехнічних) обмежені значеннями розмірів фрагментів від 10 см на низьких висотах до 1 м на геостаціонарних орбітах. Крім того, застосування оптичних засобів, незважаючи на вищі показники, обмежене як часом доби, так і погодними умовами.

Радіотехнічні методи вільні від недоліків оптичних методів. Використовуючи когерентне випромінювання, вони додатково дозволяють вимірювати радіальну швидкість і похилу дальність.

Успішне функціонування радіотехнічного комплексу пов'язане з наявністю деякої апріорної інформації про космічний об'єкт. Оскільки антенні системи радіотехнічного комплексу внаслідок необхідності прийому слабких сигналів мають вузьку діаграму спрямованості, потрібно забезпечити розрахунок і одержання достатньо точних цілевказівок космічного об'єкта за кутами і доплерівськими частотами. Отже, початок застосування радіотехнічного комплексу для контролю космічної обстановки обмежується часом, що пройшов до грубої «прив'язки» орбіти космічного об'єкта. Тільки після цього можна застосувати радіотехнічний комплекс у завданнях супроводу.

Друге обмеження застосування радіотехнічного комплексу для контролю космічної обстановки визначається високими кутовими швидкостями низькоорбітальних об'єктів. Радіотехнічні комплекси, призначені для керування низькоорбітальними космічними апаратами, мають порівняно невеликі (2–4 м) малоінерційні антенні системи, однак коефіцієнти підсилення таких антен невеликі, й РТК ближнього космосу не можуть приймати слабкі сигнали [5].

Навпаки, радіотехнічні комплекси, призначені для управління космічними апаратами далекого

космосу, мають дзеркальні антени значних розмірів (до 70 м). Коефіцієнт підсилення таких антен досягає 70 дБ. Антенна система в сукупності з малошумними вхідними підсилювачами прийомного пристрою дає можливість приймати слабкі сигнали від досить віддалених космічних об'єктів. Однак більша інерційність антенних систем радіотехнічних комплексів далекого космосу дозволяє застосовувати їх для контролю низькоорбітальних об'єктів тільки на витках з невеликим (до 35°) кутом місця щодо пункту установки антени.

Незважаючи на зазначені обмеження, потенційні можливості радіотехнічних комплексів дають всі підстави для їхнього застосування у комплексах контролю космічної обстановки для визначення космічного сміття.

Виміри дальності, радіальної швидкості та радіального прискорення, одержані радіотехнічними методами, достатні для визначення параметрів руху космічних об'єктів та їхньої каталогізації.

Характеристики радіотехнічних комплексів, що використовуються як радіолокатори, визначаються ефективною відбивною поверхнею. Під «ефективною відбивною поверхнею» розуміють поверхню, розміщену на тій же відстані, що й об'єкт, перпендикулярно до напрямку випромінювання, яка створює в радіолокаційній системі ту ж щільність потоку відбитої енергії, що й реальний об'єкт [6].

Ефективну відбивну поверхню можна розрахувати лише для об'єктів найпростішої форми, де вона дорівнює площі поперечного перерізу. Для металевої сфери радіусом  $r \gg \lambda$  ефективна відбивна поверхня дорівнює

$$\sigma = \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2, \quad (1)$$

і не залежить від довжини хвилі. У цьому випадку всі розрахунки проводяться за рівняннями радіолокації [5, 6].

Для космічних об'єктів, поперечний переріз яких багато менший за довжину хвилі, та при досить високому енергетичному потенціалі в радіолокаційних системах спостерігаються ефекти релєвського розсіювання.

Релєвське розсіювання характерне для часток, малих порівняно з довжиною хвилі випромінювання. При цьому ефективна відбивна

поверхня прямо пропорційна поперечнику у шостому степені [7]:

$$\sigma = 9 \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right)^4 \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2. \quad (2)$$

Застосування ефекту розсіювання Релея для завдань дослідження космічного сміття радіолокаційними методами дозволяє значно розширити діапазон космічних об'єктів, що досліджуються і супроводжуються. Для цієї мети найвідповіднішим за технічними характеристиками (випромінюваній потужності, ефективній площі й коефіцієнтами підсилення антен) є радіотехнічний комплекс, призначений для керування космічними апаратами далекого космосу.

Велика інерційність антенних систем радіотехнічного комплексу далекого космосу не дозволяє здійснювати супровід низькоорбітальних космічних об'єктів через їхні порівняно високі кутові швидкості, тому для них використовуються вимірювання проходження часток через нерухомий антенний промінь із вузькою діаграмою спрямованості.

За даними радіолокаційного спостереження космічних часток (м. Голдстоун, США) за 21.4 год виявлено 875 об'єктів з еквівалентними розмірами від 2 до 18 мм у діапазоні висот від 177 до 1662 км [7, 8]. Національні антенні системи (табл. 2) мають аналогічні технічні характеристики, тому можна очікувати аналогічних результатів при їхньому практичному застосуванні (від декількох міліметрів на низькій орбіті до декількох сантиметрів на геосинхронній) [7].

Таблиця 2. Технічні характеристики національних антенних засобів

Антенні засоби	Діапазон	Ефективна площа, м <sup>2</sup>
АДУ-1000	ДМ сполучений	900
	ДМ	650
	СМ	450
РТ-32	ДМ	422
	СМ	407
РТ-70	18 см	2450
	6 см	2800
	5 см	2750
	3.55 см	2450
	1.35 см	1700
	0.82 см	850

Одержання координатної інформації не дає відповіді на питання про реальні розміри об'єкта та яку реальну небезпеку він несе — для цього необхідно враховувати інформацію про геометричні характеристики космічного об'єкта.

Ефективна відбивна поверхня є важливою характеристикою космічного об'єкта, що залежить від геометричних розмірів  $d$  та довжини хвилі  $\lambda$ , але не залежить від потужності випромінювання [9]:

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{\Pi_2}{\Pi_1} = 4\pi R^2 \frac{E_2^2}{E_1^2}, \quad (3)$$

де  $\Pi_1$ ,  $E_1$  — щільність потоку потужності у точці об'єкта та напруженість поля падаючої хвилі,  $\Pi_2$ ,  $E_2$  — щільність потоку потужності у точці прийому та напруженість поля відбитої хвилі,  $R$  — відстань між радіотехнічною системою та об'єктом.

Вимоги до необхідної потужності випромінювання визначаються відношенням сигнал/шум на вході прийомного пристрою радіотехнічного комплексу, чутливістю приймальних пристроїв радіотехнічного комплексу [4]

$$P_{\text{прм-мін}} = \left( \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right)_{\text{мін}},$$

де  $P_{\text{ш}} = kT_{\text{еф}}\Delta F$ ,  $k$  — постійна Больцмана,  $T_{\text{еф}}$  — шумова температура приймальної системи,  $\Delta F$  — ширина смуги пропускання приймача на високих частотах (до детектора). Із залежності ефективної відбивної поверхні від довжини хвилі (при фіксованих геометричних розмірах) можна визначити геометричні розміри малих об'єктів космічного сміття.

Для цього космічний об'єкт опромінюється хвилями кількох фіксованих частот, і за зміною ефективної відбивної поверхні з довжиною хвилі визначаються геометричні розміри об'єкта.

Наприклад, позначимо у формулі (2) коефіцієнт збільшення ефективної відбивної поверхні за рахунок релеївського розсіювання як

$$k_r = 9 \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right)^4 = 9\pi^4 \left( \frac{d}{\lambda} \right)^4. \quad (4)$$

Очевидно, що він починає впливати в діапазоні розмірів космічних об'єктів  $d = (0.2...0.9)\lambda$ . При зміні довжини хвилі у два рази коефіцієнт збільшення ефективної відбивної поверхні  $k_r$  зміниться у  $2^4 = 16$  разів.

У випадку, коли при різних довжинах хвиль значення ефективної відбивної поверхні приблизно однакові, ця ефективна поверхня приблизно дорівнює площі поперечного перерізу космічного об'єкта.

Запропоновані вище підходи до одержання інформації про геометричні характеристики космічних об'єктів дозволять більш вірогідно оцінити небезпеку досліджуваних об'єктів для функціонуючих космічних апаратів й засобів їхнього виведення, більш впевнено визначати й прогнозувати параметри руху, каталогізувати й супроводжувати об'єкти космічного сміття малих розмірів.

1. Агаджанов П. А., Горшков Б. М., Смирнов Г. Д. Основы радиотелеметрии. — М.: Воениздат, 1971.—248 с.
2. Застосування космічних систем для забезпечення дій збройних сил: Навчальний посібник / Під ред. В. І. Ткаченка. — Харків: ХВУ, 2001.—192 с.
3. Машков О. А., Фролов В. М. Проблема космічного тероризму: концептуальні основи захисту // Нерозповсюдження та контроль озброєнь.—2002.—№ 1 (13).—С. 9—14.
4. Мельник Ю. А., Стогов Г. В. Основы радиотехники и радиотехнические устройства. — М.: Сов. радио,

1973.—368 с.

5. Моделирование в радиолокации / Под ред. А. И. Леонова. — М.: Сов. радио, 1979.—264 с.
6. Немец А. А. Федоров В. И. Основы радиолокации и телевидения: Учеб. пособие. — М.: Высш. шк., 1971.—352 с.
7. Справочное пособие по космической тематике / Состав. А. Т. Стрельников. — М.: МО СССР, 1989.—212 с.
8. Goldstein R. M., Goldstein S. J. Jr. Flux of millimetric space debris // *Astron. J.*—1995.—110.—P. 1392—1396.
9. Rjiga J. N., Zaitsev A. I. Possibility to study space debris by the radar-space-complex in Evpatoria. — Moscow: Institute of Radiotechnic and Electronics of the Russian Ac. Sc., 1998.—P. 116—127.

---

#### ANALYSIS OF POSSIBILITY OF THE USE OF THE DISPERSION EFFECT FOR DETERMINATION OF SPACE DEBRIS

*A. Zagorulko, A. Morgun, V. Bogomia*

An analysis of possibility of the use of effect of dispersion is conducted, namely, the Rayleigh dispersion for determination of space debris. It is found that starting from the dependence of effective surface reflecting in the region of the Rayleigh dispersion on a wavelength, there is a real possibility to determine geometrical sizes of small objects of space debris.