

В. Є. Шатіхін, Л. П. Семенов, В. М. Борисенко

Національне космічне агентство України, Київ

**Вплив вібрацій космічного апарата
дистанційного зондування Землі
на роздільну здатність оптико-електронних
приладів спостереження**

Надійшла до редакції 16.09.02

Розглянуто питання впливу вібрацій на роздільну здатність оптико-електронних приладів спостереження Землі. Наведено фактори, що пояснюють ускладнення отримання та обробки зображень з роздільністю 1 м і краще. Класифікуються джерела вібрацій сучасних КА, зроблено оцінки вібрацій зарубіжних КА.

Сучасні світові тенденції розвитку космічних систем (КС) дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) передбачають подальший розвиток КС з підвищеним розрізненням, тобто на рівні 0.3—1 м в панхроматичному режимі та 3—4 м в багатоспектральному режимі. Дослідження провідних фірм-виробників КС моніторингу Землі вказують на те, що майже 90 % потреб ринку зображень до 2005 р. включно становитимуть КС з роздільною здатністю 1 м і менше. Попит на цю інформацію зростатиме перш за все за рахунок розвідувальних та військових відомств, державних замовників та приватних фірм — власників, співвласників та операторів КС.

Кажучи про наявний прогрес в розвитку оптико-електронних приладів спостереження Землі, які забезпечують отримання зображень високої роздільної здатності, необхідно відзначити численні фактори, що ускладнюють отримання та обробку зображень високого розрізнення.

Це зокрема:

- ускладнення конструкції знімальної камери;
- вузька смуга огляду;
- вплив атмосфери;
- переміщення об'єктива бортової апаратури внаслідок коливань та вібрацій КА;

— термомеханічні деформації елементів конструкції та бортової апаратури КА.

Останній фактор особливо актуальний, оскільки світові тенденції розвитку сучасних КА передбачають активний термін існування КА в 10—15 років і вплив цього чинника зростатиме адекватно збільшенню терміну експлуатації КА.

Необхідно відзначити, що на цей час в оптико-електронних приладах спостереження Землі, встановлених на КА ДЗЗ, вказуються технічні характеристики, що були отримані в наземних умовах без повного урахування факторів, що впливають на технічні характеристики приладів спостереження під час польоту КА. Тому характеристики отриманого зображення під час польоту КА можуть відрізнитися від передбачених на виконання цільового завдання.

Основними факторами, що впливають на якість зйомки, зокрема на роздільну здатність оптико-електронних приладів, є:

- фактори космічного простору (ФКП);
- конструкція оптико-електронної системи (ОЕС);
- динаміка польоту КА.

Вплив ФКП та конструкції оптико-електронних систем спостереження Землі на роздільну здатність

на прикладі КС «Ikonos» та IRS-1C описано в роботі [10].

Метою нашої статті буде розгляд впливу на роздільну здатність приладів спостереження Землі вібрацій КА.

Якщо ФКП та конструктивні особливості апаратури спостереження КА враховуються при проектуванні оптико-електронних приладів спостереження, то питання комплексного впливу динаміки польоту КА, зокрема вібрацій КА на якість зображення також необхідно оцінювати та враховувати при проектуванні КС ДЗЗ.

Розглянемо рух КА ДЗЗ в польоті. Він визначається рівняннями [19]:

$$M \cdot a = F_{\text{вс}} + F_r + F_s ;$$

$$J \cdot \frac{dw}{dt} = M_{\text{вс}} + M_r + M_s ,$$

де M — маса КА, a — прискорення КА, J — момент інерції КА, w — кутова швидкість КА, $F_{\text{вс}}$, $M_{\text{вс}}$ — сили та моменти, що збурюють коливання КА внаслідок процесів внутрішньої взаємодії КА, тобто незрівноваженість ланок механізмів КА, перехідні процеси в приводах механізмів КА, нерівномірність ходу механізмів, коливання палива в паливних баках тощо, F_s , M_s — сили та моменти зовнішньої взаємодії з КА, тобто ті сили та моменти, що враховують вплив аеродинамічних характеристик КА, дію світового тиску і т. д., F_r , M_r — сили та моменти взаємодії КА з гравітаційним полем Землі, Місяця та Сонця.

Визначення параметрів руху КА зводиться до вирішення цього рівняння. Очевидно, що амплітуда коливань та вібрацій КА залежить від його масових та інерційних характеристик.

На цей час спостерігається стабільна тенденція досягнення роздільної здатності в 1 м та менше при виготовленні КА зі зменшеною масою у порівнянні зі своїми попередниками. Хоча виготовлення КА з масою в кілька тонн та більше продовжується, особливо в інтересах військових та розвідувальних відомств, впровадження новітніх технологій космічної техніки, композиційних матеріалів, нових компоновочних схем сприятиме перш за все розвитку КА зі зменшеною масою.

На підтвердження цього наведемо такі приклади: для КА «Ikonos» становить 817 кг, а роздільна здатність становить 1 м (дані приводяться для панхроматичного режиму), для КА GDE — 400 кг та 1 м, для КА «QuickBird-2» — 400 кг та 0.8 м [2]. Така тенденція спостерігається і для нових КА, запуск яких заплановано у 2002—2005 рр.

Наведене вище вказує на необхідність оцінки

впливу коливань та вібрацій КА на якість зображення ДЗЗ на стадії проектування апаратури.

Фактори динаміки польоту КА призводять до коливань та вібрацій КА, які викликають лінійні та кутові переміщення об'єктиву бортової апаратури КА відносно його осей. Внаслідок цього утворюється зсув зображення, що погіршує якість отриманих знімків. Зсув зображення визначається переміщенням точки оптичного зображення на фоточутливому елементі приймального пристрою протягом часу накопичення заряду.

В залежності від джерел виникнення розділяють наступні види зсувів.

1. Лінійний зсув, виникає внаслідок:
 - поступального руху КА;
 - зміщення КА перпендикулярно до лінії руху;
 - зміни висоти польоту КА.
2. Кутовий зсув, зумовлений:
 - обертанням КА навколо повздовжньої осі u ;
 - коливанням КА навколо поперечних осей x та z .
3. Вібраційний зсув, зумовлений вібраціями КА внаслідок зовнішніх та внутрішніх збурень.

Розглянемо детальніше вплив вібрацій КА на параметри ОЕС та причини їхнього виникнення. Актуальність проблеми зумовлена ще й тим, що прогнозування вібрацій КА важливе для проектування супутників лазерного зв'язку. Вібрації КА спричиняють коливання лазерного променя, внаслідок чого приймач отримує ослаблений сигнал, що безпосередньо впливає на якість зв'язку. Зрозуміло, що у випадку мережі супутників лазерного зв'язку втрати сигналу будуть ще більшими, а якість зв'язку — ще гіршою.

Вплив вібрацій на необхідну потужність випромінювання передавача для забезпечення оптичного зв'язку із заданими параметрами для двох супутників LEO наведено в табл. 1 [23].

Вібрації КА мають також негативний вплив на хід наукових експериментів на борту. Так, експерименти на станції «Скайлеб» показали наявність вібрації в інтервалі від одного до кількох тисяч герц. Найбільші амплітуди вібрацій було зафіксовано в інтервалі низьких частот — 100—200 Гц [14].

Таблиця 1. Залежність потужності випромінювання передавача від амплітуди вібрацій

Потужність випромінювання, мВт	Амплітуда вібрацій, мкрад
0.1	30
1.0	50
10.0	60
100.0	70
1000.0	80

Розглянемо класифікацію джерел вібрацій КА. В залежності від природи джерел вібрації КА умовно розділяють на внутрішні та зовнішні.

Зовнішні джерела вібрацій фізично пов'язані з дією ФКП та гравітаційних сил. Тому їх класифікація здійснена за цими чинниками. До ФКП відносять дію аеродинамічних сил, термомеханічні деформації, дію сонячного тиску та сонячної радіації, перепад температур «дня» та «ночі», зіткнення з мікрометеоритами та уламками КА, так званим «космічним сміттям».

Ймовірність зіткнення з уламками КА в останні роки в кілька разів перевищує ймовірність зіткнення з мікрометеоритами. Вібрації КА, і навіть пошкодження, можуть викликатися зіткненнями з уламками КА, розміри яких не перевищують десятих та сотих долей сантиметра. За даними [14] в космічному просторі знаходяться трильйони дрібних частинок фарби, що також можуть бути джерелами вібрацій та пошкоджень КА.

Другий чинник пов'язаний з внутрішньою гомогенністю гравітаційних сил. Це гравітаційна дія Сонця та Місяця, еліптичність орбіти, сплюсненість Землі, дія центрального гравітаційного поля Землі.

Отже, основними зовнішніми джерелами вібрацій КА можуть бути:

1. Дія гравітаційного поля Землі.
2. Сонячний тиск.
3. Гравітаційна дія Сонця та Місяця.
4. Дія аеродинамічних сил.
5. Перепад температур дня та ночі, якому підлягає КА ДЗЗ протягом короткого проміжку часу (приблизно 45 хв для ближньої навколоземної орбіти).
6. Термомеханічні деформації КА.
7. Еліптичність орбіти КА.
8. Несферичність Землі біля полюсів.
9. Зіткнення з мікрометеоритами та мікроуламками КА.

Основними внутрішніми джерелами вібрацій КА у польоті під час виконання завдань ДЗЗ можуть бути, крім елементів конструкції КА, різноманітні пристрої та механізми, що забезпечують функціонування основних систем КА, а також виконання КА завдань спостереження та дослідження Землі. Наведемо основні внутрішні джерела вібрацій КА без пояснень призначення наведених нижче елементів конструкції КА, механізмів та пристроїв.

1. Панелі сонячних батарей (СБ) та антени КА.
2. Привід та механізм орієнтації СБ.
3. Механізм висування гравітаційного стабілізатора (ГС).
4. Пристрої та механізми, що забезпечують функціонування науково-дослідницької апаратури

та апаратури спостереження, а також пристрої і механізми управління телескопа, різноманітні маніпулятори тощо.

5. Привід та механізм розвороту антенно-фідерних пристроїв (АФП) КА.

6. Вентилятори системи забезпечення терморегулювання КА (СЗТР КА).

7. Гіроскопічна силова платформа КА.

8. Система управління та забезпечення стабілізації з електромаховиковими виконавчими органами.

9. Вібрації, що викликані функціонуванням двигунної установки (ДУ).

10. Коливання рідинного палива.

Наведений у п. 2—5 перелік механізмів не є повним, він зумовлюється завданнями, що стоять перед КА, а також конструктивними особливостями КА. Проте цей перелік є достатнім для аналізу та опрацювання загального підходу для визначення причин вібрацій КА.

Очевидно, що вищезгаданий перелік враховує тільки ті чинники виникнення вібрацій, що впливають на технічні характеристики бортових оптико-електронних приладів спостереження Землі під час їхнього функціонування, тобто під час виконання цільового завдання. У зв'язку з цим до цього переліку не увійшли механізми розвороту спецпанелей, натягу АФП і т. д., тобто пристрої та механізми, що можуть функціонувати одноразово і не викликають вібрації КА.

Основні причини, що викликають вібрації КА від внутрішніх джерел, такі.

1. Дисбаланс роторів двигунів приводу механізмів КА.
2. Дисбаланс силових маховиків в СУЗС КА.
3. Віброактивність механізмів КА.
4. Перехідні процеси двигунів приводу механізмів КА, тобто наявність прискорень під час розгону та вибігання ротора двигунів.

Кожна з наведених причин потребує детального дослідження та аналізу, для чого необхідно мати дані про тип та характеристики механізмів, двигунів приводу, силових маховиків, розміри панелей СБ, АФП, вентиляторів, гіроскопічних силових платформ та їхніх елементів, характеристики та величини сил, що діють на КА та викликають збурення тощо.

Оцінка коливань, що викликані дисбалансом силових маховиків та роторів двигунів приводу механізмів КА, є дуже важливою для визначення вібрацій КА. На цей час залишається актуальним питання щодо розробки ефективної методики визначення впливу дисбалансу електромаховикових виконавчих органів СУЗС КА на параметри коли-

Таблиця 2. Внутрішні джерела вібрації

Джерело вібрацій	Діапазон збурюючої сили (дин)	Тривалість вібрації, мс
Платформа	1	
Механізм комутації хвильоводу	80	14
Привід та механізм орієнтації СБ	3	56
Двигунна установка	33	30
Механізм орієнтації АФП	3	3600

вання КА, оскільки передбачено серед нових КА ДЗЗ в Україні також розробку КА з СУЗС з електромаховиковими виконавчими органами.

Результати дослідження вібрацій з урахуванням впливу окремих механізмів та конструкції КА за даними [23] на супутнику зв'язку «Olympus» Європейського космічного агентства приведено в табл. 2.

Одним з основних факторів зменшення вібрацій КА є зниження рівня віброактивності механізмів КА, тобто їх здатності створювати коливальні процеси, що через ланки, опори механізмів передаються на корпус КА.

Причиною віброактивності механізмів КА є наявність сил та моментів інерції, що викликані внаслідок незрівноваженості ланок механізмів КА, а саме — обертання незрівноважених мас, незрівноважені силові дії механізмів під час поступального руху ланок, биття зубчатих передач, децентровка валів, муфт, підшипників і т.д.

Причини віброактивності механізмів КА та заходи щодо зменшення рівня віброактивності розглядаються також в залежності від розположення механізмів в КА, функціональних завдань, режимів роботи та навантаженості. Про загальні методи зменшення віброактивності викладено зокрема в [3, 12].

Складність нових розроблюваних на цей час механізмів КА підвищується. Проектуються нові механізми та пристрої для розгортання на орбіті та керування ними, реалізації точного позиціонування та орієнтації компонентів антен, розгортання панелей СБ, управління орієнтацією астрономічних та інших дослідницьких приладів. В конструкції цих механізмів реалізуються новітні космічні технології та останні напрацювання в галузі механіки та динаміки машин і механізмів.

Зокрема, при створенні багатодзеркальних конструкцій для регулювання взаємного положення елементів передбачено виконавчі механізми — стрижні з регульованою довжиною. Застосовуються розкриті мачти, на яких встановлюється апаратура за

межами КА. Замість кутових шарнірів використовуються властивості пружної деформації самих стрижнів; виключення люфтів у шарнірах підвищує точність розкриття мачти. Звичайно, наведений перелік нових механізмів та пристроїв не є повним, їхня номенклатура зростає з кожним роком.

Збільшення номенклатури та усладнення конструкції механізмів та пристроїв КА для вирішення поставлених завдань підтверджує необхідність подальшого дослідження вібрацій КА. Незалежність багатьох джерел вібрації зумовлює випадковий характер вібрації та складність її математичного опису.

Аналітичне визначення рівня вібрацій особливо важливе для великих космічних конструкцій (ВКК), оскільки є суттєва різниця між умовами наземних випробувань та реальним функціонуванням на орбіті, а також внаслідок неможливості проведення повного тестування ВКК в наземних умовах через їх значні розміри [7].

Розглянувши стисло основні фактори, що створюють вібрації КА та впливають на роздільну здатність приладів спостереження КА ДЗЗ, констатуємо, що теретичне опрацювання та аналіз комплексного впливу наведених вище факторів на роздільну здатність КС дасть змогу визначити «реальну» роздільну здатність бортового оптико-електронного обладнання на стадії проектування КС ДЗЗ з її подальшим практичним підтвердженням на спеціалізованому калібрувальному полігоні.

1. Балк М. Б. Элементы динамики космического полета. — М.: Наука, 1965.—340 с.
2. Волошин В. І, Драновський В. Й., Бушуєв Є. І. Стан, перспективи та проблеми ринку послуг дистанційного зондування Землі з космосу // Космічна наука і технологія.— 2002.—8, № 2/3.—С. 41—51.
3. Вульфсон И. И., Ерихов М. Л., Коловский М. З. Механика машин. — М.: Высшая школа, 1996.—510 с.
4. ГОСТ 24346-80. Вибрация. Термины и определение.
5. Добронравов В. В., Никитин Н. Н., Дворников А. Л. Курс теоретической механики. — М.: Высшая школа, 1974.—526 с.
6. Добрынин С. А., Фельдман Н. С., Фирсов Г. И. Методы автоматизированного исследования вибраций машин. — М.: Машиностроение, 1987.—224 с.
7. Згуровский М. З., Бидюк П. И. Анализ и управление большими космическими конструкциями. — Киев: Наук. думка, 1997.—450 с.
8. Ивахненко А. Г. Моделирование сложных систем. — Киев: Вища школа, 1987.—64 с.
9. Кіницький Я. Т. Теорія механізмів і машин. — Киев: Наук. думка, 2002.—660 с.
10. Кононов В. И. Обоснование методики определения разрешения на местности аэродинамических систем с дискретным фотоприемником // Космічна наука і технологія.— 2002.—8, № 2/3.—С. 91—102.
11. Кореневский Д. Г. Устойчивость динамических систем при случайных возмущениях параметров. — Киев: Наук. думка, 1989.—208 с.

12. Красковский Е. Я., Дружинин Ю. А., Филатов Е. М. Расчет и конструирование механизмов приборов и вычислительных систем. — М.: Высшая школа, 1991.—480 с.
13. Левантовский В. И. Механика космического полета в элементарном изложении. — М.: Наука, 1974.—488 с.
14. Мелуа А. И. Старт космической технологии. — М.: Наука, 1990.—185 с.
15. Разыграев А. П. Основы управления полетом космических аппаратов и кораблей. — М.: Машиностроение, 1977.—472 с.
16. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. — М.: Наука, 1967.—444 с.
17. Черноусько Ф. И., Акуленко Л. Д., Соколов Б. Н. Управление колебаниями. — М.: Наука, 1984.—384 с.
18. Яблонский А. А., Корейко С. С. Курс теории колебаний. — М.: Высшая школа, 1966.—254 с.
19. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. — М.: Наука, 1985.—512 с.
20. Якушков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. — М.: Машиностроение, 1989.—360 с.
21. Verstein E. L. Natural frequencies of an orbiting space station // *J. Spacecraft and rockets*.—1972.—9, N 9.—P. 622—630.
22. Schlomi Arnon. Power versus stabilisation for laser satellite communication // *Appl. Opt.*—1999.—38, N 15.—P. 3229—3233.
23. Shlomi Arnon, Kopeika N. S. Laser Satellite Communications Network — Vibration Effect and Possible Solutions // *Proc. IEEE*.—1997.—85, N 10.—P. 1646—1661.

THE INFLUENCE OF VIBRATIONS OF AN EARTH OBSERVATION SATELLITE ON THE RESOLUTION OF OPTOELECTRONIC OBSERVATION DEVICES

V. E. Shatikhin, L. P. Semenov, V. M. Borysenko

The influence of vibrations of an Earth observation satellite on the resolution of optoelectronic observation devices is considered. The influence of satellite vibrations on the quality of images increases in connection with improving the spatial resolution of modern satellites up to 1 m and more. We discuss the factors influencing on the quality of images derived from satellites and present the classification of vibration sources. An analysis of the main causes of vibrations of the modern satellites is carried out and examples of numerical estimates for vibrations of foreign spacecrafts are given.