

УДК 629.78

Загорулько О.М, Меланченко О.Г.

КОНЦЕПЦІЯ АВТОНОМНОГО УПРАВЛІННЯ ПОЛЬОТОМ КОСМІЧНОГО АПАРАТА СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗЕМЛІ

Запропоновано узагальнену концепцію архітектури автономного управління польотом автоматичного космічного апарата спостереження Землі (АКАСЗ). Перелічені основні властивості, які має запропонована концепція. Проведено декомпозицію системи, приведено опис основних компонентів системи автономного управління. Запропоновано підхід до забезпечення необхідної швидкодії при вирішенні задач автономного планування.

***Ключові слова:** автоматичний космічний апарат спостереження Землі, Центр управління польотами космічних апаратів, автономне управління.*

1. Вступ. Основним мотивом підвищення автономності управління польотом автоматичного космічного апарата спостереження Землі (АКАСЗ) є намагання ослабити необхідність постійного втручання операторів Центра управління польотом (ЦУП) в цей процес. Наприклад, в рамках діючої технології управління підготовка маневру підтримки орбіти АКАСЗ, яка включає прийняття рішення на його проведення, розрахунок параметрів маневру та формування відповідної програми управління, здійснюється на Землі. Якщо перенести рішення цих задач на борт АКАСЗ, то, окрім зниження завантаження ЦУП, це дозволить суттєво підвищити точність підтримки заданої орбіти за рахунок планування та здійснення більш частіших та більш коротких маневрів [1]. Особливу актуальність цей мотив здобуває у випадку АКАСЗ, що експлуатуються у складі кластеру, який забезпечує інтерферометричні спостереження об'єктів на поверхні Землі, коли потрібно високоточне скоординоване керування взаємним положенням та орієнтацією АКАСЗ в кластері. Точна підтримка параметрів номінальної орбіти АКАСЗ дозволить ЦУП планувати польотні операції, не звертаючись до прогнозу змінення орбіти АКАСЗ, виключаючи похибки прогнозування та підвищуючи тим самим точність планування. Оснащення АКАСЗ засобами виявлення, локалізації й парировання відмов дасть можливість не тільки підвищити надійність виконання задач місії, але й суттєво скоротити обсяг телеметричної інформації, що передається на Землю, та знизити трудомісткість її обробки та аналізу.

Ще одним важливим мотивом підвищення автономності є підвищення ефективності цільового застосування АКАСЗ, включаючи підвищення якості цільової інформації (ЦІ), зниження накладних витрат, підвищення оперативності виконання заявок користувачів ЦІ. Більшу частину часу польоту АКАСЗ знаходиться поза зоною видимості засобів наземного сегменту космічної системи (КС). Якщо б АКАСЗ був спроможним автономно виявляти об'єкти спостереження на поверхні Землі, він зміг би автономно перерозподіляти власні ресурси таким чином, щоб оперативно виконувати зйомку виявлених об'єктів, навіть якщо він знаходиться поза сяном зв'язку з Землею [2]. Далі, якщо б АКАСЗ був спроможним автономно оцінювати потужність хмарного покриття над районами запланованої зйомки, це дозволило б виконувати спостереження тільки тих районів на поверхні Землі, які не закриті хмарами, і виключити витрачання ресурсів на проведення марних зйомок хмар [3]. Зрештою, реалізація можливості попереднього оцінювання якості ЦІ на борту АКАСЗ дозволила б виключити збереження й передачу на Землю неякісної ЦІ, та заощадити цінні ресурси бортової масової пам'яті й часу передачі ЦІ на Землю.

Аналіз стану проблеми. Визначення рівнів автономності управління польотом АКАСЗ є надзвичайно складною проблемою, в тому числі через розбіжності між схожими поняттями автономності та автоматизації. АКАСЗ може мати дуже високий рівень автономності щодо окремих функцій (наприклад, визначення та управління орієнтацією), тоді як у частині інших функцій автономність взагалі може бути відсутня (наприклад, планування вмикання корисного навантаження). Тому більш перспективним вважається розробка концепції автономного управління польотом АКАСЗ, яка дасть можливість об'єднати різні рівні автономності реалізації різноманітних функцій управління польотом в рамках єдиного сценарію.

Мета статті. Дана стаття присвячена розробці загальної концепції автономного управління польотом АКАСЗ. Наведені попередні вимоги щодо архітектури управління (розділ 2), розглянуті відомі концепції архітектури автономного управління (розділ 3), наведені пропозиції щодо забезпечення реактивності управління в контексті прийняття рішень (розділ 4).

2. Попередні вимоги до архітектури автономного управління польотом АКАСЗ

Попередні вимоги на даному етапі сформуємо на якісному рівні, тобто в вигляді переліку якостей, які мусить мати архітектура автономного управління польотом АКАСЗ. Основними якостями будемо вважати наступні:

1. *Універсальність архітектури.* Під універсальністю будемо розуміти інваріантність проектованої архітектури по відношенню до типу місії АКАСЗ (наприклад, дистанційне зондування Землі, наукові дослідження навколоземного простору, або космічна розвідка), по відношенню до функції, яка є об'єктом автономного управління (отримання знімків, зберігання ЦІ, передача її на Землю, або визначення й управління орієнтацією АКАСЗ), по відношенню до типу задачі управління (управління фізичними об'єктами або управління обробкою даних), по відношенню до рівня задачі управління (вибір задачі, яка підлягає рішенню, декомпозиція цієї задачі на елементарні операції, прийняття рішення щодо часу початку виконання задачі, за використовуваними для її рішення ресурсами на борту АКАСЗ, або за іншими параметрами рішення обраної задачі), і по відношенню до способу реалізації автономного управління (виконання завчасно розробленої програми управління, виконання завчасно розробленої програми з можливістю її оперативного змінювання, або виконання завчасно розробленого загального плану польоту з оперативним прийняттям рішень щодо формування програми управління на підставі наявного плану).

2. *Відповідність архітектури принципу управління із зворотними зв'язками.* Для виконання цієї вимоги необхідно, щоб проектована архітектура включала до себе чотири базові функції будь-якої замкнутої системи управління: відстеження стану системи, відстеження цілей управління, прийняття рішень по управлінню та виконання прийнятих рішень.

3. *Відповідність архітектури вимогам щодо якості та реактивності управління.* До системи управління польотом АКАСЗ завжди пред'являються вимоги щодо якості управління з точки зору відповідності управління наявним цілям місії й щодо реактивності з точки зору виконання управлінських рішень точно в заданий час. Проектована архітектура мусить забезпечити підтримку виконання цих вимог з урахуванням того, що вони часто є суперечливі.

4. *Модульність архітектури.* Модульність має на увазі декомпозицію системи управління польотом АКАСЗ на окремі контролери, взаємодіючі між собою, що дає можливість зберігати на прийнятному рівні складність системи та забезпечити їй необхідну реактивність управління (при цьому проектована архітектура не повинна накладати обмеження на реалізацію контролера). При такому підході кожен контролер відповідає за окрему підсистему, яка виконує певну підмножину функцій системи управління; виконання однієї й той самої функції двома різними контролерами не дозволяється. Наприклад, контролер визначення й управління орієнтацією АКАСЗ відповідає за відстеження

параметрів кутового руху об'єкта, прийняття й виконання рішень по управлінню орієнтацією в разі її відхилення від заданої траєкторії.

5. Інкапсуляція даних й управління. Ця вимога має на увазі, що для обраної схеми декомпозиції системи на контролери жодна інформація про стан s не може бути отримана жодним іншим способом, ніж запит до контролера m , відповідальному за стан s . Виконання вимоги інкапсуляції гарантує, що різні контролери системи управління матимуть однакову інформацію щодо стану s в будь-який даний момент часу, а також що змінення цього стану не може бути здійснено інакше ніж шляхом передачі відповідного запиту до контролера m . Це виключає можливість неавторизованого змінювання стану s ; можливі конфлікти між запитами на змінення цієї інформації з боку різних контролерів будуть вирішуватися контролером m .

6. Рефлексивність. Задачі управління являються, з одного боку, специфічними (наприклад, управління орієнтацією АКАСЗ й управління масовою пам'яттю для збереження ЦІ), а з другого - представляють собою задачі обробки даних, оскільки включають до себе відстеження інформації стану підсистеми й прийняття рішень. Тому у складі системи автономного управління польотом АКАСЗ повинна бути передбачена диспетчерська підсистема, яка реалізує функцію самоуправління системи.

7. Простота. Проектована архітектура повинна базуватися на прозорих принципах й концепціях, бути зрозумілою та з'ясовною. При цьому вона не мусить бути суб'єктом надмірних обмежень на застосовувані підходи, методи та алгоритми, особливо в частині відстеження даних стану й прийняття рішень.

3. Огляд існуючих концепцій архітектури автономного управління

Практично усі відомі концепції архітектури автономного управління різними об'єктами в космічній, авіаційній техніці та робототехніці можуть бути віднесені до одного з двох класів – централізована й децентралізована, або модульна, архітектура.

Концепції централізованої архітектури в найбільшій мірі розроблені в робототехніці. Серед них класичною вважається концепція, що є запропонована французькою Лабораторією системного аналізу і архітектури систем [4]. Ця концепція передбачує трирівневу архітектуру системи автономного управління. Верхній рівень – рівень прийняття рішень – забезпечує відстеження цілей місії, формування й обслуговування планів дій; наступний рівень – рівень виконання – відповідає за запуск операцій на виконання та відстеження стану виконання планів дій; нарешті, самий нижчий – функціональний рівень – інкапсулює всі базові функції фізичної системи (датчики й виконуючі органи). В цієї концепції основою системи автономного управління є планування, і жодна операція фізичної системи не зможе бути виконана до тих пір, доки вона не буде запланована на рівні рішень. В інших концепціях централізованої архітектури основою системи є диспетчеризація, що відповідає за запуск на виконання й відстеження усіх задач системи, як фізичних задач, так і задач обробки даних, включаючи задачу планування операцій.

Відомі концепції децентралізованої архітектури [5], що найбільшою мірою розроблені стосовно управління безпілотними літальними апаратами, відрізняються між собою, перед усім, підходами к декомпозиції системи автономного управління на різні управляючі модулі. Концепція генератора модулів GENOM [4] передбачає модульну реалізацію усього функціонального рівня системи, причому всі модулі є однорідні. Концепція IDEA передбачає єдину схему модуля прийняття рішень на будь-якому рівні ієрархії системи. Обов'язковими компонентами такого модуля є:

1. *База моделей* – сукупність всіх моделей, асоційованих з діями, які можуть бути запущені на виконання в даному модулі.
2. *База планів* – сукупність всієї інформації щодо минулих, нинішніх й наступних дій та станів, включаючи поточні цілі управління и план їхньої реалізації.
3. *Виконавець плану* – підсистема диспетчеризації роботи модуля.

-
4. *Планувальник реагування* – підсистема, що відповідає за оперативне планування, яке повинне виконуватися за обмежений час й охоплювати обмежений інтервал часу в наступному.

Основними недоліками відомих концепцій архітектури автономного управління є невизначеність місцезположення функцій, що забезпечують відстеження стану системи управління й навколишнього середовища, та відсутність метода синхронізації функцій, що виконуються на різних рівнях ієрархії системи та потребують суттєво різного часу для їх виконання. Крім того, відомі концепції залишають відкритим питання щодо реактивності системи управління в цілому, включаючи рівень рішень.

4. Реактивність системи автономного управління польотом АКАСЗ

Реактивність є одним з найбільш важливих властивостей архітектури системи автономного управління польотом. Для успіху місії АКАСЗ важливе не тільки те, щоб рішення, прийняті кожним контролером, були оптимальними, або, принаймні, мали прийнятну якість. Вони також повинні бути своєчасними й направленими на досягнення цілей місії. У якості прикладу розглянемо *компонент прийняття рішень* у складі контролера зйомки, який посилає *компоненту відстеження виданих запитів* свого контролеру запит на виконання зйомки *C* після того, як АКАСЗ пролетів над районом поверхні Землі, асоційованим зі зйомкою *C*. Навіть якщо прийняте рішення матиме прийнятну якість (наприклад, з точки зору відповідності обраного режиму зйомки району спостереження), запізнення його формування знецінює зйомку *C*.

Вимагання реактивності управління має суттєвий вплив на алгоритми компонентів відстеження стану й прийняття рішення кожного контролера. Як вже відзначалося вище, для цих компонентів бажано використовувати алгоритми з відсіканням часу, які передбачають, що результат роботи кожного компонента буде доступним в будь-який момент часу, принаймні після недовгого часу, необхідного для обчислювань, і якість отриманого результату зростатиме із спливанням часу. Проте *компонент прийняття рішень* повинен також урахувувати можливі зміни стану системи й цілей місії, а також можливу неповноту інформації щодо цих змінювань. Стосовно місій дистанційного зондування Землі та космічної розвідки ці зміни можуть, зокрема, включати появлення нових об'єктів спостереження, надходження на борт АКАСЗ нових заявок на проведення зйомки, невиконання раніш запланованих зйомок, і т. ін. Існує два суттєво різних підходи до рішення цих проблем.

Перший підхід – *планування в обмеженнях* – передбачає формування планів з урахуванням невизначеності можливих шляхів змінювання стану й цілей системи (класичні, робастні, гнучкі або умовні плани), або без їх врахування. У випадку виникнення змін, що роблять поточний план недійсним, метод класичного планування передбачає формування нового плану. Ця задача вирішується, як правило, шляхом перевірки і змінювання попереднього плану, при цьому основним критерієм оптимізації є мінімум часу формування нового плану. Іноді застосовується й додатковий критерій – мінімум змінень попереднього плану. Основними недоліками планування в обмеженнях є такі:

- ✓ Відсутня методика вибору інтервалу часу, на який здійснюється формування плану (інтервалу планування);
- ✓ Відсутня можливість використання позитивних змін стану системи (наприклад, запас якого-небудь ресурсу виявився вище сподіваного), навіть при врахуванні негативних змін (наприклад, відмова обладнання);
- ✓ В ситуаціях з високим рівнем невизначеності інформації щодо стану або цілей системи, змінення плану може здійснюватися занадто часто, й тільки-но сформовані плани одразу ж виявляються недійсними;
- ✓ Неможливість забезпечення формування нового плану протягом часу, який відповідає вимогам щодо реактивності системи управління, особливо якщо необхідне точне досягнення цілей (у найгіршому разі складність формування нового плану на основі

попереднього стає порівняною зі складністю формування нового плану «с чистого листа»).

Другий підхід – *послідовне прийняття рішень* – передбачає формування в ЦУП політик (вручну або автоматично, з використанням моделей або експертних систем), які асоціюють з кожним можливим станом системи та її ціллю оптимальне (або, принаймні, прийнятне) рішення, й завантаження сформованих політик на борт АКАСЗ. Проте кількість можливих станів реальної системи управління та її цілей робить такий підхід практично незастосовним. Наприклад, немає необхідності враховувати в політиках всі можливі об'єкти спостереження на поверхні Землі та заявки на зйомку, які можуть надійти на борт АКАСЗ. Більш перспективним представляється формування політик безпосередньо на борту АКАСЗ з урахуванням поточного стану системи, її поточних цілей та їх очікуваних змін протягом обмеженого інтервалу часу. Проте тут виникають ті ж самі проблеми, які були перераховані вище стосовно планування в обмеженнях – відсутня методика вибору інтервалу планування, формування політик потребує затрат часу й тому не може здійснюватися в реальному масштабі часу.

Для забезпечення виконання вимог щодо реактивності системи автономного управління польотом АКАСЗ пропонується розбити інтервал планування, використовуваний в відомих підходах, на три частини:

1. *Інтервал виконання рішення*, на якому рішення вже прийняті й, можливо, запущені на виконання відповідних дій. В межах цього інтервалу внесення в план яких-небудь змін неможливе, або, у всякому разі, небажане, за винятком особливих разів, таких як невиконання рішення. Наприклад, розпочатий сеанс зйомки не переривається, окрім випадків відмови обладнання, і новий сеанс зйомки не розпочинається до тих пір, доки не завершиться попередній сеанс.

2. *Інтервал прийняття рішення*, на якому приймаються ефективні рішення (рішення на виконання дій). Це можуть бути, наприклад, рішення на проведення наступного сеансу зйомки, наступного маневру переорієнтування АКАСЗ або наступного сеансу зв'язку з Землею. По визначенню, інтервали прийняття й виконання рішення не перетинаються.

3. *Інтервал підготовки рішення*, на якому формуються найліпші з можливих рішень на обраному інтервалі часу. Це можуть бути, наприклад, рішення на проведення декількох наступних сеансів зйомки до чергового сеансу передавання ЦІ або на проведення сеансів зв'язку з Землею на чергову добу польоту. По визначенню, інтервал підготовки рішення включає до себе інтервал прийняття рішення.

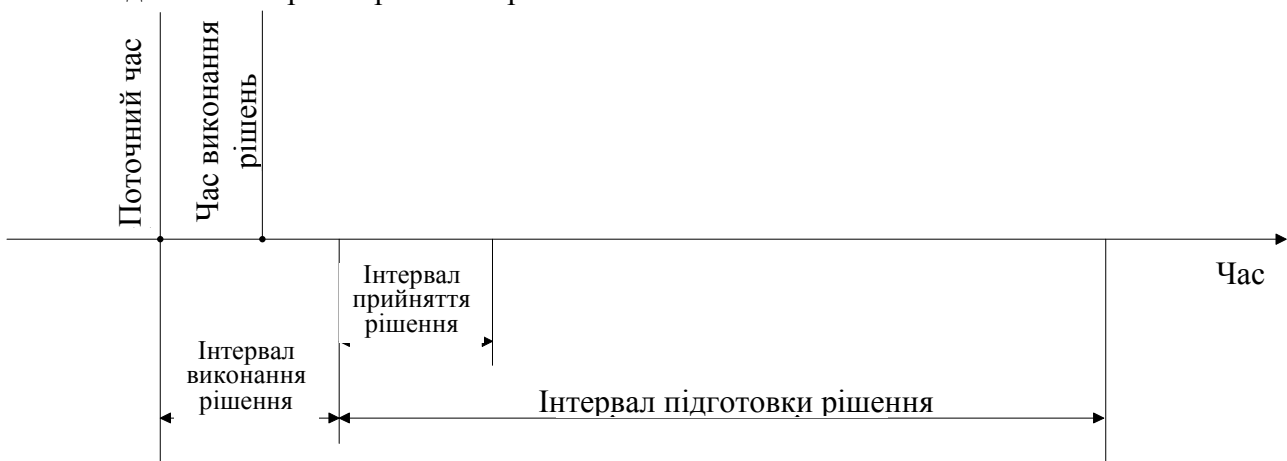


Рис. 1. Інтервали підготовки, прийняття и виконання рішення

Описані інтервали схематично показані на рис. 1. Слід відмітити, що межі інтервалів можуть задаватися не тільки часом, але й іншими параметрами. Наприклад, якщо ресурси АКАСЗ обмежені (наприклад, внаслідок відмов), то інтервал підготовки рішення може бути заданий проведенням декількох наступних сеансів зйомки для районів поверхні Землі з пріоритетом,

що перевищує пороговий рівень, і тоді ресурси будуть витрачатися на проведення зйомки тільки найбільш важливих районів.

При використанні класичних методів планування в обмеженнях, інтервали підготовки й прийняття рішення часто об'єднуються в єдиний інтервал планування. При використанні методів послідовного прийняття рішень інтервал прийняття рішення обмежений тільки одним, найближчим рішенням, а інтервал підготовки рішення має набагато більшу, навіть до нескінченності, довжину.

Виділення трьох інтервалів розширяє можливості проектування системи автономного управління польотом АКАСЗ з урахуванням динаміки змінювання стану й цілей системи, невизначеності інформації об цих змінюваннях, вимог к реактивності системи, складності задачі прийняття рішення й обчислювальних ресурсів на борту АКАСЗ, доступних для її рішення.

Наприклад, якщо швидкість змінювання стану й цілей системи висока, а невизначеність інформації щодо цих змінювань суттєва, доцільно зменшити тривалість інтервалу прийняття рішення. Це дасть можливість максимально зблизити моменти прийняття рішення та його виконання; рішення буде прийнято по найбільш актуальній інформації, а інтервал його виконання не буде надто великим. Якщо вимоги до реактивності системи є високими, а обчислювальні ресурси обмежені, доцільно обмежити тривалість інтервалу підготовки рішення. Це дасть можливість підвищити реактивність за рахунок допустимого зниження якості рішення, і дасть можливість узгодити тривалість процесу підготовки рішення цього інтервалу з часом, реально доступним для підготовки.

Висновки

Представлена загальна концепція модульної архітектури замкнутої системи автономного управління польотом АКАСЗ. Показана можливість створення алгоритмів планування роботи АКАСЗ та його підсистем, позбавлених від недоліків відомих методів планування в обмеженнях и послідовного прийняття рішень. В подальшому необхідно провести роботи по формалізації запропонованої концепції та по її перевірці. Зокрема, необхідно визначити способи взаємодій базових компонентів типового контролера з алгоритмами планування й діагностики. Це, в кінцевому підсумку, дасть можливість створити систему автономного управління польотом АКАСЗ, яка буде мати гарантовані показники якості та швидкодії управління на базовому рівні (зокрема, в задачі парирования позаштатних ситуацій).

ЛІТЕРАТУРА

1. Lamy, A.; Charneau, M.-C.; Laurichesse, D.; Grondin, M.; and Bertrand, R. Experiment of Autonomous Orbit Control on the DEMETER Satellite. In Proc. of the 18th International Symposium on Space Flight Dynamics (ISSFD-04), Monterey, CA. 2002. pp. 38-51.
2. Галабурда Д.А., Москалев С.И., Своробина Л.А. Концепция космической системы интеллектуального наблюдения Земли // 5-й Белорусский космический конгресс: Материалы конгресса в 2-х т. – Минск, 2011. – Т. 1. – С. 364.
3. <http://smc.cnes.fr/pleiades/>
4. Alami, R.; Chatila, R.; Fleury, S.; Ghallab, M.; and Ingrand, F. An Architecture for Autonomy. The International Journal of Robotics Research. 1998. 17(4):315–337.
5. Barrouil, C., and Lemaire, J. Advanced Real-time Mission Management for an AUV. In Proc. of the SCI NATO Symposium on Advanced Mission Management and System Integration Technologies for Improved Tactical Operations. Florence, Italy. 1999. pp. 151-158.