

УДК 629.783.066

doi: 10.32620/aktt.2023.5.02

Т. В. ЛАБУТКІНА, Р. В. АНАНКО

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

«ГОРИЗОНТАЛЬНІ» СПОСТЕРЕЖЕННЯ ОРБІТАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИСТРОЯМИ ОРБІТАЛЬНОГО БАЗУВАННЯ: СУПУТНИКОВЕ УГРУПОВАННЯ ТОТАЛЬНОГО ПОКРИТТЯ ЗАДАНОЇ ОБЛАСТІ ВИСОТ

Перспективні підходи до оновлення різнопланової інформації про космічні апарати і об'єкти космічного сміття передбачають доповнення мереж наземних засобів спостереження застосуванням супутникових систем спостереження навколоземного простору, побудованих на декількох орбітальних угрупованнях (сегментах). **Метою дослідження** є розвиток задачі побудови супутникової системи, яка забезпечує тотальне покриття заданої області висот над поверхнею Землі зонами застосування пристроїв орбітального базування, які здійснюють «горизонтальні спостереження» (вісь симетрії миттєвої зони можливого застосування пристрою «горизонтальних» спостережень, лежить у площині миттєвого місцевого горизонту космічного апарату-носія пристрою). **Результати:** 1) розроблено два «симетричних» методи вирішення задачі вибору параметрів угруповання одного з сегментів супутникової системи спостереження, яке має відому, часто вживану структуру «сузір'я Волкера» на основі «кілець» космічних апаратів у симетрично рознесених орбітальних площинах (угруповання має забезпечити тотальне покритті сферичного шару в області висот навколоземного простору у своєму оточенні при заданих параметрах миттєвої конусоподібної зони застосування пристрою спостереження; «ширина» покритого сферичного шару обирається як частина шару, який був би покритий із використанням пристроїв спостереження з заданими характеристиками при нескінченній кількості космічних апаратів їх базування); 2) запропонований підхід до побудови супутникової системи «горизонтальних» спостережень на декількох різновисоких орбітальних угрупованнях, квазіоптимальної за критерієм мінімізації кількості космічних апаратів; 3) наведені розрахункові приклади застосування розроблених методів, та зроблено декілька наближених оцінок щодо реалізації систем на основі «горизонтальних» спостережень. **Висновки:** супутникові системи спостереження орбітальних об'єктів на основі «вертикальних» (в радіальному напрямку) спостережень, можна доповнити реалізацією «горизонтальних» спостережень.

Ключові слова: космічний апарат; супутникова система; орбітальний об'єкт; пристрій спостереження; орбітальне базування; балістичне проектування.

Вступ

Даний розділ представляє такі аспекти дослідження: 1) обґрунтування актуальності на основі розгляду практичних задач, що потребують результатів досліджень за представленою в статті темою; 2) здобутки на сьогоднішній день за темою дослідження і тренди її розвитку; 3) особливості обраного формулювання теми дослідження, мета дослідження та запропонований підхід до вирішення сформульованих завдань.

Мотивація

Множина орбітальних об'єктів у навколоземному космосі все більше зростає [1, 2]. У тому числі – збільшується кількість об'єктів космічного сміття [1-3]. А також з великою швидкістю збільшається число діючих космічних апаратів (особливо з розгортанням в останні роки багатосупутникових систем) [1, 2, 4]. Комплексне, багатопільове спостере-

ження навколоземного космосу (у тому числі – множини орбітальних об'єктів), має давати інформацію, яка відповідає критеріям високої точності, повноти і актуальності (за сучасною термінологією – забезпечувати високий рівень «космічної ситуаційної обізнаності» [5, 6]).

Велика кількість орбітальних об'єктів призводить до необхідності контролю їх множини як механічної системи, актуалізує періодичне уточнення інформації щодо параметрів орбітального руху та руху навколо центру мас для орбітальних об'єктів різного типу, потребує поточної інформації для моделювання і аналізу проблематики заповнення навколоземного простору орбітальними об'єктами [7-9]. Також наявний спектр задач спостереження орбітальних об'єктів, який включає в себе дистанційну діагностику стану космічних апаратів та отримання зовнішньої інформації щодо різних аспектів їх функціонування [5, 10, 11]. І в цьому ракурсі задачі спостереження діючої орбітальної техніки стають все більш

актуальними, функціонально необхідними при розгортанні бурхливої космічної діяльності людства, яка має стати безпечною [12]. В недалекому майбутньому невід'ємною складовою комічної діяльності буде орбітальний сервіс [10, 11]. Процеси виконання різноманітних сервісних операцій мають відслідковуватися в режимі, наближеному до реального часу (в продовж всієї реалізації операції, або частково). Принаймні, має бути забезпечений періодичний та підсумковий контроль результатів та наслідків їх виконання. Це операції з обслуговування діючих космічних апаратів [10, 11, 13], відведення з орбіт об'єктів космічного сміття [14-16], утилізація космічного сміття [17, 18], тощо).

Навколоземний космос вже давно має розглядатися як «додаткова екосистема», спільно застосоване єдине «орбітальне середовище» [19]. А в рамках космічної діяльності людства все більш активно входить поняття «космічної екосистеми» [12]. Контроль множини орбітальних об'єктів у навколоземному космосі має здійснюватися на системній основі [5, 19, 20]. Це має відбуватися для забезпечення безпечного і ефективного практичного застосування космосу [10-12], а також задля забезпечення безпеки держави або співдружності держав [5, 21, 22]. І хочеться сподіватися, що на певному вітку розвитку людства використання контрольованого космосу стане спільною задачею Землян [23, 24].

Задача спостереження множини орбітальних об'єктів в навколоземному просторі зараз вирішується в основному із використанням наземних засобів [3]. Ці засоби продовжують розвиватися вдосконалюватися [25-27]. І на доданок до наземних засобів, взявши старт десятиріччя тому (прикладом може бути цікава робота [28], написана у 1989 році), вже не один рік розвивається тема спостереження орбітальних об'єктів засобами, що розташовані на космічних апаратах. В роботі [29] представлений аналіз як наземних, так і орбітальних засобів спостереження орбітальних об'єктів. Сьогодні відзначено бурхливим розвитком різнопланових аспектів щодо застосування засобів орбітального базування для спостереження множини орбітальних об'єктів. У тому числі, аналізуються комплексно балістичні аспекти реалізації спостережень і особливості технологій застосування оптичних або радіоелектронних засобів спостереження [30, 31]. Вивчаються задачі планування застосування пристроїв спостережень і принципи побудови орбітальних угруповань [32-34], а також питання централізованого узгодженого спільного застосування наземних і орбітальних засобів [35, 36].

Глибокий аналіз стану вирішення проблеми «космічної ситуаційної обізнаності» в різних ракурсах представлений в публікаціях [5, 6]. В монографії [5] підкреслюється важливість розвитку наземних

засобів отримання інформації та виділені питання забезпечення безпеки держава. В оглядовій статті [6] з акцентом на засоби орбітального базування показана необхідність розвитку методів отримання, обробки та застосування при оперативному реагуванні поточної інформації про космічну ситуацію (одною зі складових названого в роботі [6] комплексу задач присвячена ця стаття).

Тема даного дослідження стосується питань використання пристроїв спостереження, встановлених на космічних апаратах. Концептуальні розробки з питань створення супутникових систем спостереження орбітальних об'єктів передбачають в системі дві основних складових [23, 34, 37] (ці складові можна побачити також в прообразі великої супутникової інтерсистеми, серед комплексу функцій якої має бути присутньою і функція спостереження орбітальних об'єктів [24, 37]). Перша складова представляє собою множину засобів, які встановлені на космічних апаратах великих орбітальних угруповань регулярної структури, кожне з яких забезпечує повне (або майже повне) «огортання» Землі і підтримується стабільним завдяки постійному корегуванню низки орбітальних параметрів космічних апаратів в його складі [23, 24, 30]. Друга складова передбачає невеликі динамічні («мобільні») угруповання космічних апаратів (кластери), які можуть наближатися до об'єктів спостереження, адаптувати свою структуру до виконання задачі [23, 34, 37].

В даній роботі розглядається перша з названих складових супутникової системи спостереження орбітальних об'єктів. Зокрема, дослідження присвячено питанням балістичного проектування орбітального угруповання супутникової системи спостереження орбітальних об'єктів, побудованої на декількох різновисоких орбітальних угрупованнях космічних апаратів на колових орбітах (різновисоких орбітальних сегментах), яка забезпечить у кожний момент часу повне покриття простору в заданій області висот над поверхнею Землі миттєвими зонами можливого застосування кожного з пристроїв спостереження, встановлених на космічних апаратах. Зона застосування пристрою спостереження (інакше – зона миттєвого «покриття» пристроєм) є областю простору в оточенні космічного апарату-носія цього пристрою, де має знаходитися об'єкт, щоб бути спостережуваним цим пристроєм.

Сучасний стан

Дослідженню задач покриття заданої частини навколоземного простору зонами застосування пристроїв орбітального базування передує великий пласт досліджень стосовно покриття поверхні планети або заданої її частини (в низці випадків – покриття

планети та шару висот над нею) зонами застосування пристроїв, встановлених на космічних апаратах. Зокрема, розвинуті різноманітні підходи і методи щодо забезпечення повного покриття поверхні Землі (однократного, чи заданої кратності) при створенні супутникових систем зв'язку, дистанційного зондування Землі. Покриття поверхні Землі і прилеглого до неї шару висот вирішується при створенні сучасних систем супутникової навігації.

Задача покриття сфери з центром в центрі планети була добре розвинута в різних спрощених постановках, які задовольняли суто геометричним рішенням, вже на кінці минулого сторіччя. Цей факт відзначався у публікації [38] у 1998 році. В роботі [38] також акцентувалася увага на розвитку розширеної постановки задачі, в якій враховується комплекс факторів (наприклад, комплексні умови застосування пристроїв орбітального базування, тощо). Вже на той час відзначалася наявність двох видів задач побудови супутникових угруповань з точки зору застосованих методів пошуку рішення. Задачі першого виду передбачають тільки геометричні рішення і базуються в основному на аналітичних розрахункових алгоритмах (наприклад, такі методи представлені в роботах [39, 40]). Розв'язок задач другого виду відбувається на основі застосування або «простих» чисельних алгоритмів, а в більшості випадків – «інтелектуальних» алгоритмів («класу штучного інтелекту»). І вже в роботах [38, 41] для описаних задач побудови орбітального угруповання пропонується застосування «інтелектуальних» алгоритмів. Основним недоліком методів другого типу є витрати часу на пошук рішення, які стають істотними при врахуванні великої кількості факторів в задачі проектування супутникових систем. Розвиваються і застосовуються методи обох класів. «Інтелектуальні» алгоритми дають майже оптимальні рішення, з великою точністю «налаштовані» на складний об'єкт проектування. Методи першого класу в задачах балістичного проектування орбітального угруповання також продовжують розвиватися, вивчаються і привертають увагу і зараз [42]. По-перше, завдяки ефективності комплексного застосування обох методів, коли методи першого типу дозволяють знаходити початкову структуру системи і здійснювати аналіз на проміжних стадіях пошуку рішення, а саме рішення отримується на основі «інтелектуального» алгоритму. По-друге, методи першого класу корисні в умовах обмеженого часу (наприклад, на початкових етапах проектування).

Задача покриття заданої частини навколоземного простору пристроями орбітального базування почала активно розглядатися в останнє десятиріччя, і інтерес до неї суттєво зріс в останні роки. Найбільш

активно розглядається тема покриття зонами застосування пристроїв орбітального базування сферичного шару простору, границі якого задані значеннями мінімальної і максимальної висоти над поверхнею Землі. При цьому головним критерієм оптимального рішення (якщо застосовується багатокритеріальний підхід) вважається мінімізація кількості космічних апаратів.

Розпочнемо розгляд цієї теми з відомої роботи [43], опублікованої у 2014 році. Автори публікації [43] відмічали новизну і слабку вивченість теми у порівнянні з описаною вище задачею покриття сфери з центром у центрі Землі. Але вже тоді вказувалося на появу методів обох вище названих класів (у тому числі, називалися роботи [44, 45]). Аналітичний метод, представлений в публікації [44] (відзначений в роботах [6, 43] та інших) є актуальним і зараз. Автор роботи [44] одним з перших підійшов до задачі покриття сферичного шару простору між заданими висотами над поверхнею Землі, використовуючи метод сферичної тригонометрії та інтерпретуючи до цієї задачі відомі підходи побудови угруповань для покриття планетоцентричної сфери. Як приклад чисельних методів пошуку рішення називалася робота [45] та інші. Сама робота [43] містить геометричне формулювання задачі, аналітичний опис для представлення зони покриття і покриття визначеної кратності. Аналітичні результати, представлені в [43], призначені і використані для перевірки чисельних апроксимацій, які здатні моделювати більш складні конфігурації. В задачі [43] при пошуку рішення враховувалися не тільки геометричні фактори, а й фактор вартості реалізації (завдяки введенню вагових коефіцієнтів). В більшості публікацій, що передують роботі [43], як і в самій роботі [43], область, яку покриває пристрій спостереження, запропоновано розглядати у формі сфери з центром в точці розташування космічного апарату-носія цього пристрою.

Результати роботи [43], на доданок до своєї цінності на сьогоднішній день, ще набудуть додаткової ваги, коли розпочнеться новітній віток розвитку супутникових навігаційних систем на тлі збільшення у складі їх користувачів вагової складової космічних користувачів, що почнуть заповнювати значно ширший шар висот над поверхнею Землі. Але представлення зони застосування пристрою спостереження у формі сфери не підходить для більшості практичних реалізацій супутникових систем спостереження (якщо використовується оптичний датчик, та і для радіолокаційних пристроїв спостереження, зону покриття бажано представляти конусоподібною або у вигляді усіченого конусу). Конусоподібна форма миттєвої зони застосування пристрою спостереження розгляда-

дається в низці робіт, що присвячені реалізації спостереження орбітальних об'єктів орбітальними засобами (наприклад, [31, 32, 46]).

Серед публікацій останніх років, які стосуються проектування орбітальних угруповань космічних апаратів-носіїв пристроїв спостереження орбітальних об'єктів, назовемо публікації [46-48]. При цьому відзначимо, що задача побудови орбітального угруповання повного покриття простору (зокрема – заданої області висот) є частиною задачі побудови супутникової системи спостереження орбітальних об'єктів, що забезпечує повне охоплення спостережуваної множини об'єктів (в заданій області висот). Інакше – є задачею вибору таких параметрів супутникової системи спостереження орбітальних об'єктів, яка б надала потенційну можливість вирішення повної задачі спостереження. В деяких роботах розглядається тільки ця, мінімально необхідна складова задачі спостереження (і відповідна до неї – мінімально необхідна конфігурація угруповання супутникової системи спостереження). Деякі роботи представляють методи, які одразу спрямовані на охоплення спостереженням множини об'єктів

Згідно підходу, представленому в роботі [46], простір цільової для спостережень області сферичного шару між двома значеннями висот над поверхнею Землі розподіляється на серповидні фрагменти. При введених спрощеннях та апроксимаціях для кожного пристрою розглядається охоплення цільової зони за зенітним та азимутальним кутом відносно точки його передбачуваного миттєвого розташування. Запропонована в роботі [46] постановка задачі передбачає дві модифікації: за першою розглядається тільки покриття простору пристроями спостереження (необхідна умова реалізації спостережень), за другою – також враховується щільність заповнення різних частин простору об'єктами спостереження.

В роботі [47] зона застосування пристрою орбітального базування прийнята у вигляді сфери. Запропонований в цій роботі метод спрямований на зменшення часових витрат на пошук рішення. Спочатку задача визначення зони покриття вирішується для одного супутника, а потім із застосуванням цих результатів знаходяться параметри всього угруповання. В роботі [48] запропонований підхід до побудови угруповання космічних апаратів-спостерігачів на основі генетичного алгоритму таким чином, щоб охопити спостереженнями задану множину об'єктів спостереження. Автори статті [48] представляють результати на прикладі побудови невеликого угруповання космічних апаратів-носіїв пристроїв спостереження та роблять висновок про розповсюдження цього підходу на створення великих угруповань космічних апаратів. Відзначимо, що наявні зараз роботи, присвячені проектуванню орбітальних угруповань космічних

апаратів-носіїв пристроїв спостереження орбітальних об'єктів, дуже різноманітні, і їх результати складно порівнювати.

В своїй статті ми обмежимося тільки розглядом питань вирішення першої частини задачі – побудови супутникового угруповання повного гарантованого (не менше ніж однократного) покриття заданої частини навколоземного простору, прийнявши зону застосування пристрою спостереження конусоподібною. Необхідно підкреслити, що при пошуку рішення щодо побудови супутникової систем глобального однократного охоплення поверхні сфери, або сферичного шару простору навколо планети зонами застосування пристроїв виконання цільових задач (обладнання спостереження або зв'язку, тощо) питання мінімізації кількості космічних апаратів в угрупованні значно втрачає свою гостроту. Пропускна здатність сучасних глобальних систем (спрощено – можливість одночасного виконання цільових задач) буде потребувати значно більшої кількості космічних апаратів-носіїв цільового обладнання, ніж мінімально необхідна. Цей факт може бути врахований, наприклад, збільшенням кратності покриття, але він тут не розглядається. Тому при пошуку рішення будемо враховувати прагнення зменшити кількість космічних апаратів угруповання, але мати на увазі, що для комплексної задачі (яка тут не представлена) цей фактор може не бути визначальним.

Особливість представленого дослідження в тому, що за постановкою задачі воно «жорстко прив'язано» до конкретного типу розташування пристрою спостереження на космічному апараті. Саме за такою ключовою особливістю дослідження авторами даної статті вже публікувалися концептуальні розробки в роботах [49, 50].

При виборі концепції побудови орбітального угруповання було враховано, що в перспективній реалізації системи спостереження (побудованої в майбутньому на основі космічних апаратів в єдиному конструктивному виконанні, або на основі «розподілених» космічних апаратів), при застосуванні міжсупутникових ліній зв'язку і сучасних інформаційних технологій має бути створено єдине інформаційне середовище задля поєднання і розподілення в системі процесів отримання та обробки інформації (наприклад, подібно до описаного для супутникової системи, представленій в роботах [51, 52] для обслуговування наземних задач).

Мета та підхід

Постановка задачі забезпечення покриття заданої частини навколоземного простору миттєвими зонами можливого застосування пристроїв спостереження орбітального базування суттєво залежать від

комплексу умов, які визначають орієнтацію цих зон у просторі. Класифікуючи пристрої спостереження, встановлені на космічних апаратах, виділимо два підходи до принципів управління космічним апаратом при застосуванні пристроїв спостереження. Перший підхід передбачає надання космічному апарату такої кутової орієнтації завдяки керуванню обертанням навколо його центру мас, яка спрямована на забезпечення необхідної орієнтації зони застосування пристрою спостереження. Другий підхід полягає у підтриманні стабільної кутової орієнтації космічного апарату, який несе пристрій (пристрої) спостереження, відносно осей зв'язаної з його центром мас системи координат (зокрема – барицентричної орбітальної системи координат $Ox_{br}Y_{br}Z_{br}$, показаної на рис. 1). У цьому випадку зони застосування пристроїв орбітального базування стабільно орієнтовані відносно площин та осей відповідної зв'язаної з центром мас системи координат. Другий підхід до керування космічним апаратом-носієм пристрою спостереження раціонально використовувати в супутникових системах спостереження на основі угруповань глобального «огортання» поверхні Землі. Тому він взятий до розгляду в цій роботі.

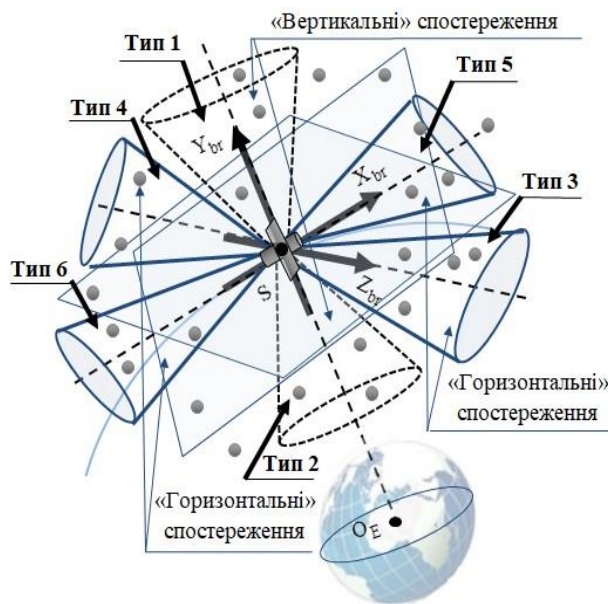


Рис. 1. Типи пристроїв спостереження

Запропонований тут підхід до визначення миттєвої зони можливого застосування пристрою спостереження і її орієнтації у просторі повністю аналогічний до підходу, який запропоновано до визначення миттєвої зони можливого застосування пристрою міжсупутникового зв'язку при стабільній орієнтації космічного апарату відносно осей барицентричної орбітальної системи координат (наприклад, це описано в роботі [53]).

Спрощено миттєва зона застосування пристрою спостереження, яка в реальності має більш складну форму, представлена у вигляді конусу, вісь симетрії якого співпадає з одною з осей барицентричної орбітальної системи координат $Ox_{br}Y_{br}Z_{br}$ (рис. 1 та 2). Площину, перпендикулярну цієї вісі, як і в роботах [32, 35] та інших, назвемо базовою (див. рис. 2). Половина кута при вершині конусу (максимальне можливе відхилення напрямку на об'єкт від осі симетрії конусоподібної зони) має значення β_m (див. рис. 2). Твірна конусу (відрізок між вершиною конусу і границею його основи, який тут дорівнює максимально можливій дальності проведення спостережень) має довжину L_m (див. рис. 2).

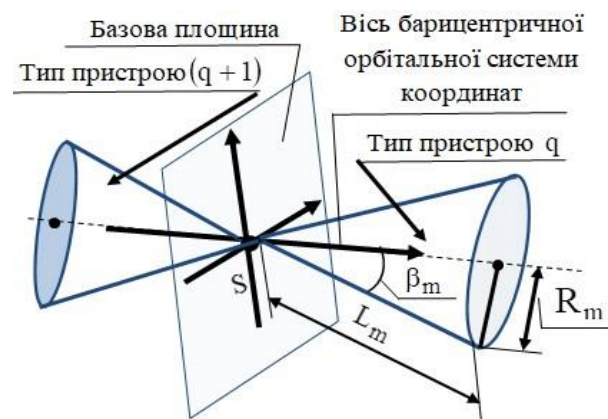


Рис. 2. Области можливого миттєвого застосування пристроїв спостереження

Як було запропоновано в низці робіт (наприклад, в роботах [32, 35, 53]), виділимо 6 типів пристроїв, що будуть реалізовувати спостереження (див. рис. 1). Для пристроїв типів 1 і 2 базовою площиною є площина $Ox_{br}Z_{br}$ барицентричної орбітальної системи координат (площина миттєвого місцевого горизонту), а віссю симетрії – вісь OY_{br} цієї системи. Спостереження пристроями типів 1 і 2, зони використання яких розташовані над і під площиною миттєвого місцевого горизонту (уздовж радіус-вектору космічного апарату та проти його напрямку), як і в роботах [36, 49, 50], назвемо «вертикальними».

Вісі симетрії чотирьох інших типів (3, 4, 5, 6) лежать у площині миттєвого місцевого горизонту космічного апарату-носія пристрою спостереження. Будемо називати спостереження цими пристроями «горизонтальними» (як і в роботі [36]). Для пристроїв типів 3 і 4 базовою площиною є площина $Ox_{br}Y_{br}$ барицентричної орбітальної системи координат (площина орбіти), а вісь симетрії співпадає з віссю OZ_{br} цієї системи. Области застосування пристроїв типів 3 і 4 розташовані відповідно з боків від'ємних та

невід'ємних значень на осі OZ_{br} . Для типів 5 і 6 базовою площиною є площина $OY_{br}Z_{br}$ барицентричної орбітальної системи координат (бінормальна площина), а вісь симетрії співпадає з віссю OX_{br} цієї системи. Області застосування пристроїв типів 3 і 4 розташовані відповідно з боків від'ємних та невід'ємних значень на осі OX_{br} .

Принципи побудови супутникових систем спостереження орбітальних об'єктів на основі одного або декількох колових орбітальних угруповань із застосуванням пристроїв «вертикальних» спостережень мають свої переваги (підходи до побудови таких систем розглядалися в роботах [49, 50]).

Але ефективність рішення задачі спостереження буде більш високою, якщо до «охоплення» заданої області висот над поверхнею Землі «вертикальними» спостереженнями додати і його «покриття» із застосуванням пристроїв «горизонтальних» спостережень. Назвемо тільки одну з переваг застосування «горизонтальних» спостережень над реалізацією «вертикальних» спостережень. Зі збільшенням дальності орбітального об'єкту, який спостерігається, до пристрою спостереження орбітального базування тривалість його перебування у зоні доступності до «вертикальних» спостережень зменшується, а у випадку «горизонтальних» спостережень цей ефект проявляється в декілька порядків менше.

Метою дослідження є розвиток задачі побудови супутникової системи, яка забезпечує тотальне (безперервне у просторі і часі) не менш ніж однократне покриття заданої області висот над поверхнею Землі зонами застосування пристроїв орбітального базування, які здійснюють «горизонтальні спостереження» (вісь симетрії миттєвої зони можливого застосування пристрою «горизонтальних» спостережень лежить у площині миттєвого місцевого горизонту космічного апарату-носія пристрою).

Зображення на рис. 3 представляє зони застосування пристроїв «вертикальних» і «горизонтальних» спостережень, які для наочності «зібрані» на одному космічному апараті, розташованому у орбітальному угрупованні (сегменті) супутникової системи спостереження (показаний фрагмент угруповання). В даній роботі опущено розгляд одночасного застосування декількох пристроїв на одному космічному апараті, але при реалізації супутникових систем спостереження такий підхід буде доцільним. Побудова орбітального угруповання супутникової системи спостереження орбітальних об'єктів буде розглядатися для випадку застосування пристроїв типів 3, 4, 5, 6, а розгляд пристроїв типу 1 і 2 тут опущено (тому на рис. 1 - 3 зони застосування пристроїв 1 і 2 показані пунктиром). При цьому має розумітися, що

досліджується частина задачі побудови глобальної системи спостереження, в якій має бути отримано синергетичне поєднання використання всіх шістьох описаних типів пристроїв, а в більш широкому контексті – пристроїв різних за технологіями і принципами застосування.

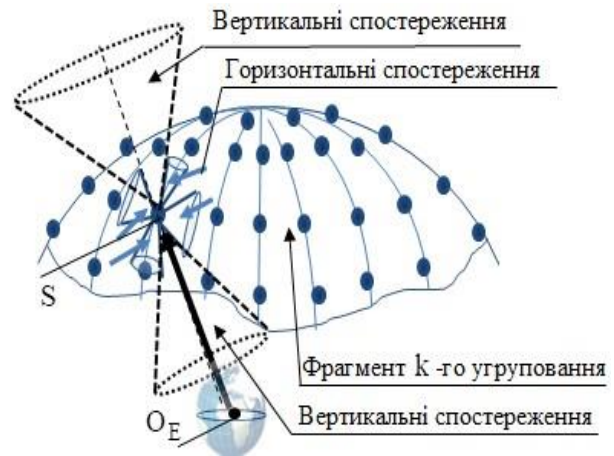


Рис. 3. Зображення зон застосування пристроїв «вертикальних» та «горизонтальних» спостережень для космічного апарату у «фрагменті» орбітального угруповання

Пропонується «розшарування» задачі на «базові» складові і розгляд їх незалежно одна від одної. А саме – розглядаються чотири варіанти постановки задачі побудови орбітального угруповання супутникової системи спостереження заданої області висот у навколоземному просторі. Кожний з варіантів передбачає вибір таких параметрів угруповання, які забезпечать тотальне покриття заданої зони висот над поверхнею Землі пристроями спостереження тільки одного типу.

Матеріали досліджень

Змістом даного розділу є:

- 1) постановка задачі дослідження;
- 2) постановка та метод вирішення виділеної елементарної задачі побудови угруповання супутників на одній висоті для випадку застосування пристроїв спостереження типів 5 і 6;
- 3) модифікація названої елементарної задачі та методу її вирішення для випадку застосування пристроїв типів 3 і 4;
- 4) підхід до побудови супутникової системи на декількох різновисоких сегментах;
- 5) розрахункові приклади щодо вирішення запропонованих елементарних задач та здійснення спрощених розрахунків щодо побудови супутникової системи спостереження на різновисоких

орбітальних угрупованнях, аналіз цих розрахункових результатів;

б) обговорення отриманих результатів щодо перспектив побудови супутникових систем «горизонтальних» спостережень орбітальних об'єктів.

1. Постановка задачі досліджень

Задана область висот над поверхнею Землі, в якій висота h знаходиться між значеннями h_{\min} і h_{\max} , $h \in [h_{\min}, h_{\max}]$. Значенням h_{\min} і h_{\max} відповідають значення r_{\min} і r_{\max} , які є радіусами концентричних сфер, центри яких знаходяться у центрі Землі та визначаються рівняннями

$$r_{\min} = R_E + h_{\min}, \quad (1)$$

$$r_{\max} = R_E + h_{\max}, \quad (2)$$

де R_E означає радіус Землі (рис. 4).

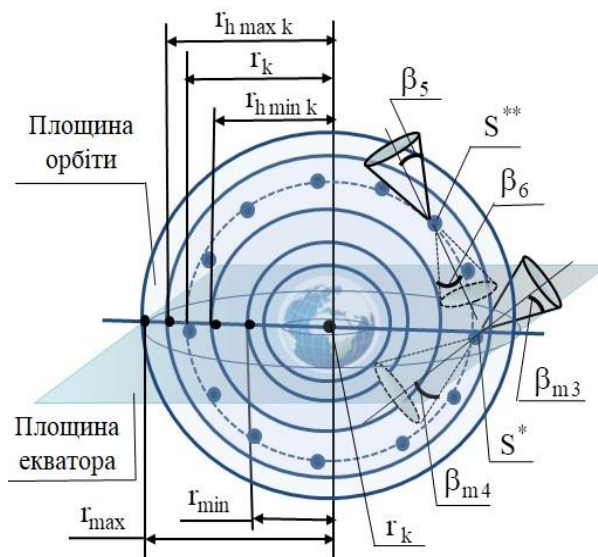


Рис. 4. До пояснення побудови угруповання тотального покриття заданої області висот

На рис. 4 у просторі показані площина екватора і перпендикулярна до неї площина, що співпадає з площиною однієї з номінальних орбіт супутникової системи, на якій розташовано декілька космічних апаратів. Також в цій орбітальній площині показані кола, утворені її перетинаннями з декількома сферами різних радіусів, у тому числі, – з визначеними вище сферами радіусів r_{\min} і r_{\max} .

За постановкою задачі необхідно забезпечити вибір параметрів орбітального угруповання супутникової системи, яке забезпечить тотальне покриття заданої зони висот (області навколоземного простору

між описаними сферами з радіусами r_{\min} і r_{\max}) миттєвими зонами можливого застосування одного з типів пристроїв орбітального базування (q -го типу), які реалізують «горизонтальні» спостереження ($q = \overline{3,6}$). На рис. 4 у просторі зведено представлення миттєвих зон застосування всіх чотирьох типів. Для супутника S^* , точка розташування якого обрана на перетинанні площини орбіти і площини екватора, показані зони покриття простору пристроями типів 3 і 4 (вісь симетрії цих зон перпендикулярні площині орбіти), а для супутника S^{**} – зони застосування пристроїв типів 5 і 6 (вісь симетрії цих зон лежить у площині орбіти).

Задані параметри β_m і L_m , що визначають форму миттєвих зон можливого застосування пристроїв спостереження. Прийmemo, що ці параметри однакові для зон покриття всіх пристроїв спостереження q -го типу. Тобто йдеться про β_m та L_m , але далі індекс q при викладенні більшої частини матеріалу будемо опускати, просто зазначивши про який з типів йдеться. Як в більшості задач початкового проектування супутникових систем, будуть розглядатися кеплерові орбіти.

За постановкою задачі вважається, що космічні апарати супутникової системи спостереження розташовані на колових орбітах. Очевидно, в реалізації системи спостереження на практиці орбіти не будуть обрані точно полярними. Задача забезпечення повного «охоплення» зонами застосування пристроїв спостереження заданої області висот навколо поверхні Землі буде вирішуватися із застосуванням квазіполярних орбіт, у яких відхилення нахилу орбіти від 90 градусів буде меншим за 10 градусів (у більшості випадків – не біля 5 градусів). Вважатиме, що прийняття положення про полярність орбіт (яке дасть спрощення пошуку рішення) не вплине суттєво на отримані результати для випадку квазіполярних орбіт, а відхилення отриманих результатів будуть тільки у бік певного «проектного запасу» збільшення.

Прийнято, що орбітальне угруповання супутникової системи спостереження побудовано за описаною далі концепцією. У загальному випадку в систему входить K різновисоких орбітальних угруповань (K орбітальних сегментів). Кожне k -те угруповання ($k = \overline{1, K}$) має часто вживану структуру «сузір'я Волкера»: у номінальних орбітальних площинах системи розташовані «кільця» («замкнені ланцюжки») космічних апаратів [39, 40]. В кожному k -му угрупованні буде M_k орбітальних площин, які рівномірно рознесені за значенням довготи висхідного

вузла. В кожній орбітальній площині k -го угруповання знаходяться N_k космічних апаратів, що є носіями пристроїв спостереження. Космічні апарати рівномірно рознесені у орбітальній площині уздовж орбіти. Фрагмент орбітального угруповання k -го сегменту описаної системи показаний на рис. 3. Обрана структура угруповання зручна для створення мережі супутникового зв'язку, що має бути застосована в системі спостереження як основа єдиного інформаційного середовища (як відзначалося вище з посиланням роботи [51, 52]).

За обраним принципом побудови супутникової системи пристрої, які встановлені на космічних апаратах орбітального угруповання k -го сегменту ($k = \overline{1, K}$) з висотою орбіт h_k , мають забезпечувати неперервне покриття області висот від $h_{\min k}$ до $h_{\max k}$, $h_k \in [h_{\min k}, h_{\max k}]$. Висоті орбіти h_k відповідає сфера, радіус якої дорівнює радіусу r_k орбіти k -го угруповання, а висотам $h_{\min k}$ і $h_{\max k}$ – сфери з радіусами $r_{\min k}$, $r_{\max k}$. Це концентричні сфери з центрами в центрі Землі. Зв'язок між значеннями висот h_k , $h_{\min k}$, $h_{\max k}$ і відповідними радіусами r_k , $r_{\min k}$, $r_{\max k}$, визначають рівняння, аналогічні рівнянням (1) і (2). На рис. 4 названим сферам відповідають окружності радіусів r_k , $r_{\min k}$ та $r_{\max k}$.

Рішення поставленої повної задачі буде забезпечено послідовним безперервним заповненням заданої області простору (між сферами з радіусами r_{\min} і r_{\max}) повністю покритими сферичними «шарами» простору кількістю K , кожний з яких оточує k -те орбітальне угруповання. З прагнень мінімізації кількості космічних апаратів будемо вважати, що ці зони можуть бути розташовані «в стик» (або з деяким невеликим перекриттям, як пояснювалося вище тут пошук рішення з великою точністю не потрібний).

Згідно з обраною концепцією побудови орбітального угруповання системи уточнимо вхідні і вихідні данні задачі. При заданих вхідних даних (h_{\min} , h_{\max} , β_m і L_m) для забезпечення тотального покриття зонами застосування пристроїв спостереження заданої області висот навколоземного простору знаходяться такі вихідні данні: кількість різновисоких сегментів K , висота орбіт космічних апаратів h_k в кожному орбітальному угрупованні, кількість орбітальних площин M_k в угрупованні k -го сегменту і кількість космічних апаратів N_k в кожній з орбітальних площин k -го сегменту.

2. Метод вирішення елементарної задачі у випадку пристроїв спостереження типів 5 і 6

Як зазначалося, елементарною складовою задачі (яка увійде зв'язаною частиною до комплексної задачі побудови орбітального угруповання системи) є вибір параметрів орбітального угруповання k -го сегмента системи. Надалі при викладенні частини матеріалу, яка стосується розгляду окремо k -го сегменту, для спрощення записів в позначеннях величин будемо опускати індекс « k » та додавати його тільки наприкінці при опису кінцевого, комплексного рішення.

Для елементарної задачі побудови k -го орбітального угруповання вхідними даними будуть такі: параметри β_m і L_m зон можливого застосування пристроїв типу 5 цього сегменту, які задані як вхідні данні в загальній постановці задачі; а також значення висоти орбіти h цього угруповання, обране на поточній ітерації пошуку рішення повної задачі (і, таким чином, значення радіусу орбіти r цього угруповання, відповідне до значення висоти h).

На рис. 5 та 6 показані точки знаходження трьох космічних апаратів – $S_{(j-1)}$, S_j , $S_{(j+1)}$, розташованих послідовно поряд в одній орбітальній площині на орбіті радіусу r .

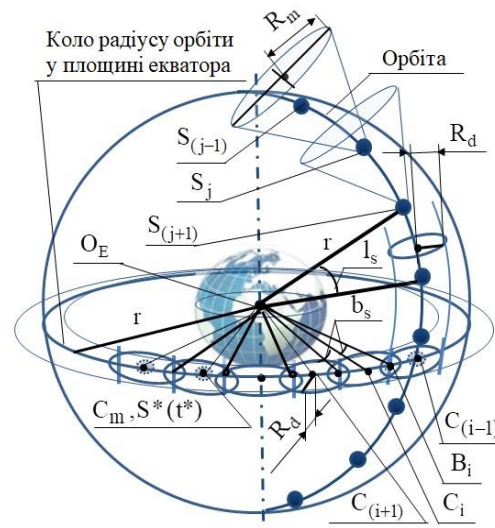


Рис. 5. До вибору параметрів угруповання системи при покритті простору пристроями типу 5 (та, аналогічно, типу 6)

Прямі l_{hj} і $l_{h(j+1)}$ (рис. 6 та 7) для космічних апаратів, що знаходяться в точках S_j і $S_{(j+1)}$ відповідно, є лініями перетину миттєвого місцевого горизонту та площини орбіти. Перетином площиною орбіти зони

застосування пристрою спостереження, встановленому на космічному апараті, що знаходиться в точці $S_{(j+1)}$, є рівнобедрений трикутник $S_{m(j+1)}^* S_{(j+1)} S_{m(j+1)}$ (виділений товщиною лінії і показаний наполовину чорним і наполовину сірим кольором на рис. 6).

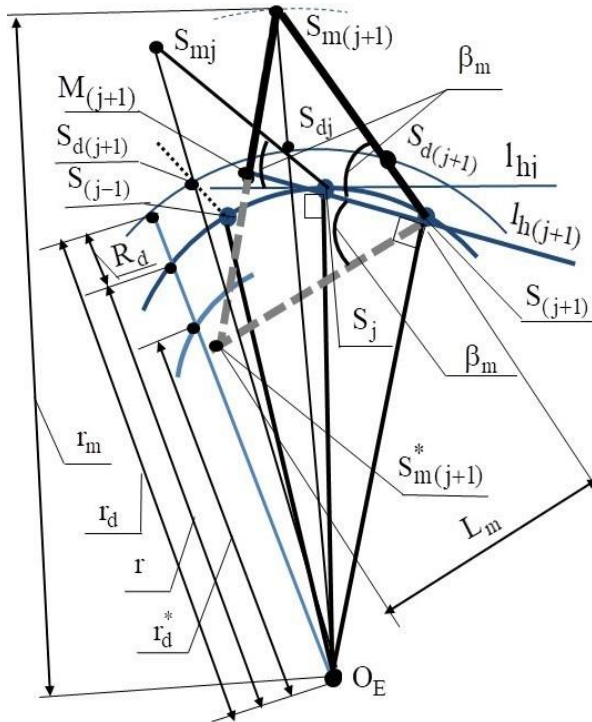


Рис. 6. До постановки геометричної задачі вибору кількості космічних апаратів на орбіті

Будемо розглядати тільки ту половину трикутника $S_{m(j+1)}^* S_{(j+1)} S_{m(j+1)}$, що розташована над прямою $l_{h(j+1)}$ (це трикутник $S_{(j+1)} M_{(j+1)} S_{m(j+1)}$, показаний на рис. 6 чорним кольором).

Необхідно обрати кількість космічних апаратів n^* , рівномірно розташованих на орбіті радіусом Γ . Інакше – необхідно знайти кутову величину дуги l_s між кожною парою точок розташування сусідніх космічних апаратів на орбіті (рис. 5 - 7). Значення n^* має бути таким, щоб було забезпечено повне покриття області між двома окружностями з центрами в центрі Землі і радіусами r і r_d (рис. 6 та 7) тими половинами перетинів з площиною орбіти зон застоування пристроїв спостереження космічних апаратів у цій площині, кожна з яких знаходиться над площиною миттєвого місцевого горизонту відповідного космічного апарату (ці половини перетинів будуть трикутниками, аналогічними трикутнику $S_{(j+1)}M_{(j+1)}S_{m(j+1)}$ представленому на рис. 6).

Окружність радіусу r_d знаходиться від концентричної до неї окружності радіусу r на відстані R_d , тобто можна записати

$$r_d = r + R_d. \quad (3)$$

Вважатиме, що розгляд других половин трикутників перетину зон можливого застосування пристроїв спостереження з площиною орбіти (аналогічних зображеному на рис 6 трикутнику $S_{(j+1)}M_{(j+1)}S_{m(j+1)}^*$ для супутника $S_{(j+1)}$) стосовно їх покриття області між двома окружностями з радіусами r і r_d^* (див. рис. 6), де

$$r_d^* = r - R_d, \quad (4)$$

на рішення щодо вибору значення кількості космічних апаратів на орбіті n^* у бік його збільшення не вплине.

Тобто R_d є вимірюваною в радіальному напрямку шириною суцільно покритої описаними трикутниками області на площині орбіти між окружностями r і r_d .

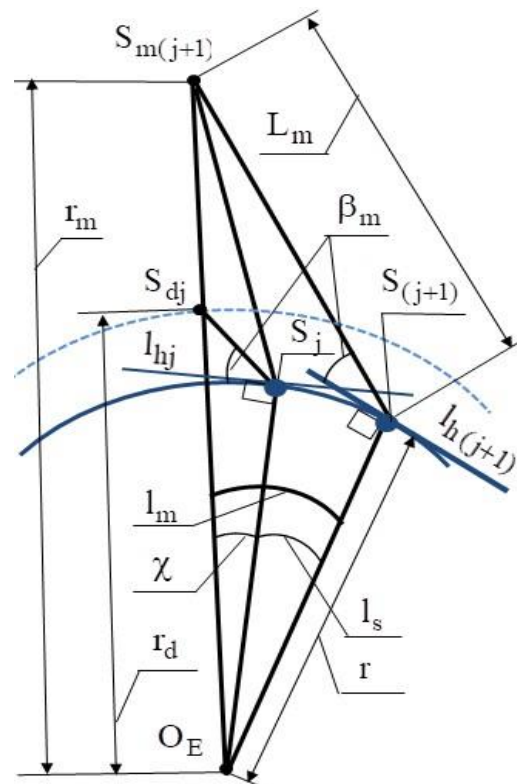


Рис. 7. До вирішення геометричної задачі вибору кількості космічних апаратів на орбіті

Максимальне значення величини R_d , що визначає у площині орбіти «ширину» області між окружностями радіусів r і r_d^* , дорівнює значенню R_m радіуса кола в основі конусовидної зони можливого застосування пристрою спостереження (рис. 2, 5, 8), що визначається формулою

$$R_m = L_m \sin \beta_m. \quad (5)$$

Але для забезпечення $R_d = R_m$ необхідно, щоб шукана кількість космічних апаратів n^* на орбіті була нескінченною ($R_d = R_m$ досягається при $n^* \rightarrow \infty$). Кількість космічних апаратів має бути кінцевою і, як завжди, одночасно з прагненням розширити зону покриття пристроями спостереження враховується й альтернативне прагнення вирішити задачу, застосовуючи меншу кількість космічних апаратів. Візьмемо значення R_d ($R_d < R_m$) як частину k_d ($0 < k_d < 1$) величини R_m :

$$R_d = k_d R_m. \quad (6)$$

При цьому величину радіусу орбіти r_d можна записати так

$$r_d = r + k_d R_m. \quad (7)$$

Далі знайдемо величину дуги l_s , яка забезпечить це значення R_d . Для цього розглянемо окружність радіусу r_m з центром в центрі Землі, яка проходить через $S_{m(j+1)}$ (на рис. 6 ця окружність представлена невеликою дугою синього кольору у оточенні приналежній до неї точки $S_{m(j+1)}$).

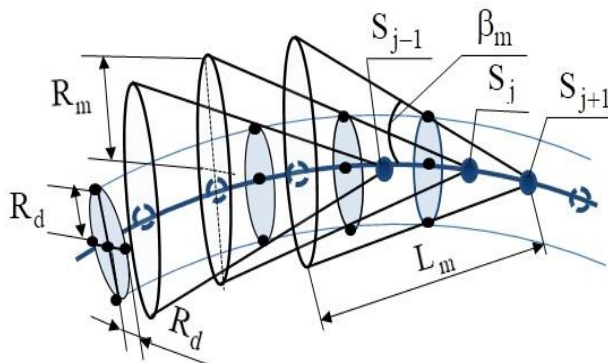


Рис. 8. Фрагмент тороподібної області простору, безперервно покритою зонами застосування пристроїв спостереження на одній орбіті

Безперервне покриття зони між окружностями радіусів r і r_d (рис. 6 та 7) буде забезпечено, якщо для двох сусідніх космічних апаратів, наприклад, космічних апаратів, що розташовані в точках S_j та $S_{(j+1)}$, виконується описана далі умова. Відрізок $O_E S_{m(j+1)}$, що поєднує точку центру Землі O_E і зазначену вище точку $S_{m(j+1)}$, перетинає окружність радіусу r_d в одній точці з відрізком $S_j S_{mj}$ (у точці S_{dj} на рис. 6 та 7). Відрізок $S_j S_{mj}$ є одною з границь перетину зони застосування пристрою спостереження, встановленому на космічному апараті, що знаходиться в точці S_j . Також на окружності радіусу r_d на рис. 6 показані точки перетинання аналогічних границь перетинів зон застосування пристроїв космічних апаратів, один з яких знаходиться в точці $S_{(j+1)}$ (точка перетинання його границі з окружністю радіусу r_d – $S_{d(j+1)}$), а інший в точці $S_{(j-1)}$ (точка перетинання його границі з окружністю радіусу r_d – $S_{d(j-1)}$).

Розглядаючи трикутник $O_E S_{(j+1)} S_{m(j+1)}$ та трикутник $O_E S_j S_{dj}$ (див. рис. 7), вирішимо задачу знаходження кутової величини дуги l_s . З трикутника $O_E S_{(j+1)} S_{m(j+1)}$ (враховуючи, що кут $O_E S_{(j+1)} S_{m(j+1)}$ має величину $(\beta_m + \frac{\pi}{2})$) записується формула, що визначає кутову величину дуги l_m (інакше – величину кута $S_{(j+1)} O_E S_{m(j+1)}$)

$$l_m = \arcsin \left(\frac{L_m \cos(\beta_m)}{\sqrt{r^2 + L_m^2 + 2rL_m \sin(\beta_m)}} \right). \quad (8)$$

З трикутника $O_E S_j S_{dj}$ (враховуючи, що кут $O_E S_j S_{dj}$ має величину $(\beta_m + \frac{\pi}{2})$, довжина боку $O_E S_j$ цього трикутника дорівнює r , а довжина боку $O_E S_{dj}$ має значення r_d (визначене рівнянням (7)), знаходимо величину кута χ (див. рис. 7)

$$\chi = \frac{\pi}{2} - \beta_m - \arcsin \left(\frac{r \cos(\beta_m)}{r_d} \right). \quad (9)$$

Кутова величина дуги l_s між точками розташування космічних апаратів визначається як різниця кутів l_m і χ . Тому, враховуючи рівняння (7), (8), (9),

значення l_s можна записати із застосуванням значень параметрів зони застосування пристрою спостереження L_m і β_m , обраного радіусу орбіти r та прийнятого значення коефіцієнту k_d у вигляді рівняння, яке приведено далі

$$l_s = l_m - \chi = \arcsin \left(\frac{L_m \cos(\beta_m)}{\sqrt{r^2 + L_m^2 + 2rL_m \sin(\beta_m)}} \right) + \arcsin \left(\frac{r \cos(\beta_m)}{r + k_d L_m \sin(\beta_m)} \right) + \beta_m - \frac{\pi}{2}. \quad (10)$$

Кількість n^* космічних апаратів при відомій кутовій відстані l_s між точками їх рівномірного розташування визначається приведеною далі формулою (в цій формулі для позначення n^* також використано позначення n_5^* , яке показує, що ця формула отримана для випадку пристрою спостереження типу 5)

$$n_5^* = n^* = \left\lceil \frac{2\pi}{l_s} \right\rceil + 1, \quad (11)$$

в якій позначення $\lceil \cdot \rceil$ означає цілу частину числа. Формула (11) аналогічна формулі, що запропонована в роботі [29] для вибору кількості космічних апаратів на орбіті у схожому до представленого тут підході, який застосований при вирішенні іншої задачі – забезпечення покриття поверхні Земної сфери зонами застосування пристроїв спостереження, що розташовані в орбітальному угрупованні системи на колових орбітах одної висоти).

Вирішивши описану задачу у площині орбіти та, враховуючи симетричність миттєвої зони застосування пристрою спостереження, можна вважати, що знайдена кількість n^* (n_5^*) космічних апаратів забезпечить неперервне покриття простору у області, що має вигляд замкненої труби, інакше – у тороподібній зоні, що оточує орбіту. Для пояснення «утворення» навколо орбіти з n^* космічними апаратами-носіями безперервно покритої пристроями спостереження зони на рис. 8 показаний фрагмент орбіти, а на рис. 9 приведено узагальнений вигляд цієї зони у оточенні орбіти. Таким чином, серединою цієї безперервно покритої тороподібної зони буде орбіта радіусу r , а всі точки її границь відстоять від орбіти на величину R_d . Інакше – на перетину цієї області простору біномальною площиною, яка проходить через

будь яку точку орбіти, буде коло, центром якого є ця точка на орбіті, а радіус дорівнює величині R_d .

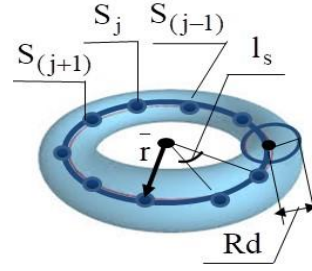


Рис. 9. Тороподібна область простору, безперервно покрита зонами застосування пристроїв спостереження на одній орбіті

Для орбітального угруповання одного сегменту супутникової системи кількість таких тороподібних зон неперервного покриття простору миттєвими зонами можливого застосування пристроїв спостереження дорівнює кількості орбіт m^* . Пояснимо підхід до вибору кількості орбітальних площин m^* в угрупованні. На рис. 5 показана низка точок перетинання орбіт (середин тороподібних зон) з площиною екватора (вузлові точки орбіт). Виділені три розташовані послідовно поряд точки перетинання орбіт з площиною екватора, пронумеровані у напрямку зростання величин довжини висхідного, – точки C_{i-1} , C_i , і C_{i+1} (їм відповідають орбіти за номерами $(i-1)$, i , $(i+1)$). На рис. 5 показаний фрагмент одної з тороподібних зон навколо орбіти за номером $(i-1)$ та у площині екватора навколо вузлових точок зображені кола радіусу R_d перетинів описаних тороподібних зон з площиною екватора. Також фрагмент картини у площині екватора, представленій на рис. 5, зображений на рис. 10, де на площину екватора надано погляд з північного полюсу).

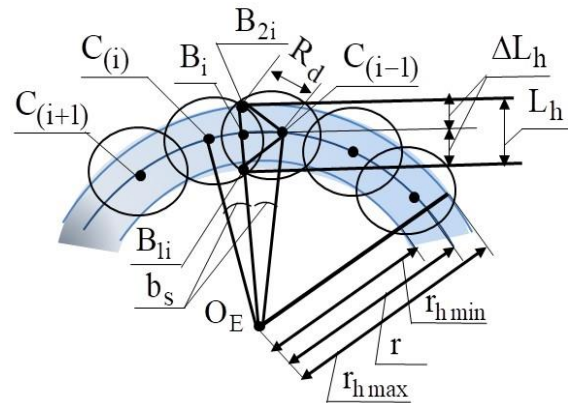


Рис. 10. Фрагмент картини у площині екватора, погляд з північного полюсу

На рис. 10 у площині екватора показана частина абстрактного кола, радіус якого дорівнює радіусу орбіти r . Згідно з прийнятою концепцією побудови системи вузлові точки на обраному абстрактному колі мають бути рівномірно рознесені уздовж нього. Тобто відстань між кожною парою сусідніх точок (наприклад, між точками $C_{(i-1)}$ і C_i , рис. 5 та 10) визначає одна й та ж величина дуги $2b_s$.

Відзначимо, що оскільки точки $C_{(i-1)}$ і C_i є вузловими точками орбіт, то величина $2b_s$, а описаному випадку є аналогом різниці $\Delta\Omega$ значень довготи висхідного вузла між для пари сусідніх орбіт, але поки не станемо позначати величину $2b_s$ як величину $\Delta\Omega$ (величина $\Delta\Omega$ буде визначена після вибору кількості орбітальних площин m^* і не точно дорівнюватиме значенню $2b_s$).

Кола перетинів тороподібних зон з площиною екватора, центрами яких є точки $C_{(i-1)}$ і C_i (див. рис. 10), перекриваються, а окружності, що їх оточують, – перетинаються у точках B_{i1} і B_{i2} . Точки B_{i1} і B_{i2} належать окружностям радіусів $r_{h\min}$ і $r_{h\max}$ (рис. 10), які належать площині екватора і мають центри в центрі Землі (центр Землі – точка O_E на рис. 5 та 10). Ці окружності задають у площині екватора границі області, що безперервно покрита перетинами з площиною екватора тороподібних зон безперервного покриття простору зонами застосування пристроїв спостереження.

Значення радіусів $r_{h\min}$ і $r_{h\max}$ визначають рівняння

$$r_{h\min} = r - \Delta L_h, \quad (12)$$

$$r_{h\max} = r + \Delta L_h, \quad (13)$$

де значення ΔL_h – половина відстані між точками B_{i1} і B_{i2} (середина відрізка $B_{i1}B_{i2}$, в якій знаходиться точка B_1 , лежить на окружності радіусу r і може розглядатися як середина основи рівнобедреного трикутника $B_{i1}C_{(i-1)}B_{i2}$). Величина ΔL_h є половиною розміру L_h «ширини» зони неперервного покриття області між окружностями радіусів $r_{h\min}$ і $r_{h\max}$ ($L_h = 2\Delta L_h$).

Ступінь перекриття перетинів тороподібних зон неперервного покриття простору у площині екватора визначає величину «ширини» зони L_h . З точки зору математики можна отримати максимальне значення

величини ΔL_h ($\Delta L_h = \Delta R$), якщо кількість m^* тороподібних зон покриття (кількість орбітальних площин m^* в угрупованні) є нескінченною. Для отримання практичного рішення візьмемо величину ΔL_h меншою за величину R_d , визначивши її як частину k_h ($0 < k_h < 1$) від величини R_d

$$\Delta L_h = k_h R_d. \quad (14)$$

Застосовуючи обране значення величини ΔL_h та розглядаючи трикутники $B_{i1}C_iB_{i2}$ і $B_{OE}B_{i2}C_i$, отримаємо вираз для величини дуги b_s

$$b_s = \arcsin\left(\frac{R_c \arccos(\Delta L_h / R_d)}{r}\right). \quad (15)$$

Із врахування значення b_s можна знайти кількість m^* орбітальних площин, яка забезпечить кутову відстань між вузловими точками не меншу цього значення (в розрахунковій формулі для позначення m^* також використано позначено m_5^* для визначення, що розглядається пристрій спостереження типу 5)

$$m_5^* = m^* = \left\lceil \frac{\pi}{2b_s} \right\rceil + 1, \quad (16)$$

де позначення $\lceil \cdot \rceil$ означає цілу частину числа.

Якщо обрана кількість орбіт m^* в заданій постановці (це дорівнює m^* тороподібних зон), то не тільки перетини тороподібних зон безперервно заповнять області між окружностями радіусів $r_{h\min}$ і $r_{h\max}$ у площині екватора (з вимірюваною у радіальному напрямку «шириною» L_h), а й тороподібні зони безперервно заповнять область між двома концентричними сферами з центрами в центрі Землі і радіусами $r_{h\min}$ і $r_{h\max}$ (сферичний шар «шириною» з L_h , яка вимірюється в радіальному напрямку) (див. рис. 10).

Серединою області між описаними сферами з радіусами $r_{h\min}$ і $r_{h\max}$ буде сфера з радіусом r орбіт космічних апаратів угруповання (див. рис. 4). Значення m^* , знайдене на основі рівняння (19), відповідає повному «огортанню» простору тороподібними зонами неперервного покриття в оточенні орбіт (задача гарантованого покриття простору між сферами

$\Gamma_{h \min}$ і $\Gamma_{h \max}$ вирішена із «запасом», якій збільшується у напрямку від площини екватора до полюсів).

Слід зазначити, що вирішена саме задача неперервного покриття простору зонами застосування пристроїв спостереження (на величину дуги $2b_s$ розділена тільки половина кутової величини окружності π , так як одна тороподібна зона має два перетини з екватором). Але при такому виборі кількості орбіт тільки частина орбітальних об'єктів в цій зоні покриття (при грубій оцінці – приблизно половина з них) буде спостерігатися по ходу руху космічного апарату-спостерігача (наприклад, спостерігач і об'єкт рухаються від південного до північного полюсу), а інша частина буде мати «зустрічний рух» (в оборотному прикладі – спостерігач рухається до північного полюсу, а об'єкт – до південного). Щоб забезпечити необхідну умову тотального покриття заданої області висот зонами можливого спостереження у «співнаправленому» русі, кількість орбітальних площин m^{**} (m_5^{**} для випадку зв'язку типу 5) має бути обраною за формулою

$$m_5^{**} = m^{**} = \left\lceil \frac{\pi}{b_s} \right\rceil + 1. \quad (17)$$

Тобто в формулі (17) враховано, що буде розділення на величину $2b_s$ кутової величини 2π . В цьому випадку маємо подвійне «огортання» простору тороподібними зонами, подвійне його покриття в заданій зоні висот, але маємо однократне огортання з точки зору спостереження при співнаправленому русі.

І після обрання кількості орбітальних площин m^* (або m^{**}) можна визначити кутову відстань між орбітальними площинами у площині екватора, яка представляє собою різницю $\Delta\Omega^*$ (або $\Delta\Omega^{**}$) значень довготи висхідного вузла для сусідніх орбітальних площин

$$\Delta\Omega^* = \pi / m^* \quad (18)$$

або

$$\Delta\Omega^* = 2\pi / m^* \quad (19)$$

відповідно до обраної стратегії рішення пошуку рішення.

Далі врахуємо, що обираються параметри орбітального угруповання k -го сегмента і здійснимо заміну позначень кількості орбітальних площин сегменту з m^* (m_5^*) і n^* (n_5^*) відповідно на M_{qk} (M_{5k})

і N_{qk} (N_{5k}). Тут вже фігурує узагальнене позначення типу зв'язку, представлене індексом q , а в дужках надано запис з врахуванням типу зв'язку $q=5$. Кількість космічних апаратів N_{gqk} (зокрема – N_{g5k}) у k -му сегменті дорівнює

$$N_{gqk} = M_{qk} \cdot N_{qk}. \quad (20)$$

Кількість N_{Gq} космічних апаратів повного угруповання системи спостереження, яке використовує пристрій типу q (зокрема кількість N_{G5} для випадку використання пристрою типу 5), визначається так

$$N_{Gq} = \sum_{k=1}^K N_{gqk} = \sum_{k=1}^K M_{qk} \cdot N_{qk}. \quad (21)$$

Описані алгоритми та концепція їх використання при побудові угруповання супутникової системи спостереження, яка забезпечить покриття простору миттєвими зонами застосування пристроїв орбітального базування типу 6, повністю співпадають з описаними для пристроїв типу 5.

3. Метод вирішення елементарної задачі у випадку пристроїв спостереження типів 3 і 4

Перейдемо до пошуку рішення тієї ж задачі тільки для випадку пристрою типу 3. Постановка сформульованих вище загальної і елементарної задач майже повністю співпадають з розглянутими для пристрою типу 5. Змінюється тільки тип пристрою, що тут дорівнює зміні орієнтації зони його застосування відносно барицентричної орбітальної системи координат. В даному випадку алгоритми вирішення задачі з точки зору геометрії залишаються такими самими, але змінюється («перевертається», «піддається рокируванню») точка зору на дві частини задачі, якими є вибір кількості орбітальних площин і вибір кількості космічних апаратів в орбітальних площинах).

Пояснення підходу, на основі якого здійснюються розрахунки у випадку пристроїв спостереження типу 4, представлено на рис. 11 (цей рисунок, є аналогічним рис. 5, який був застосований у випадку пристрою типу 5). На рис. 5 навколо деяких точок перетинання орбітальних площин з площиною екватора були показані пунктиром ймовірні розташування космічних апаратів в цих точках (в момент відповідного проходження космічного апарату вузлової точки). При розгляді застосування пристроїв

типу 3 на рис. 11 представлена уявна, штучно обрана для пошуку рішення ситуація, коли в один з моментів часу t^* в кожній з вузлових точок на площині екватора знаходиться космічний апарат. Окремо помічені точки знаходження космічних апаратів $S_{(j-1)}$, S_j і $S_{(j+1)}$.

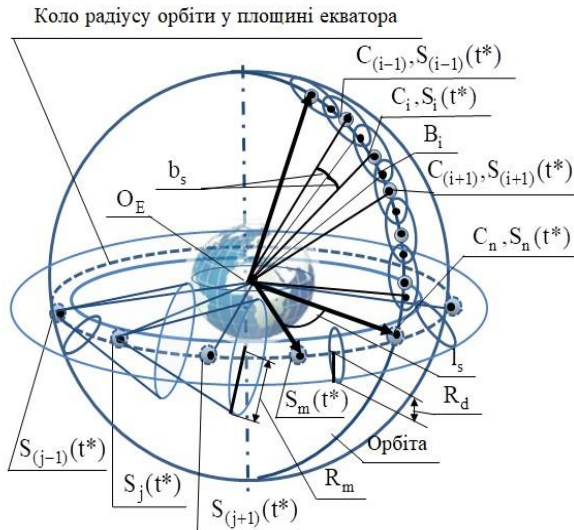


Рис. 11. До вибору параметрів угруповання системи при покритті простору пристроями типу 3 (та, аналогічно, типу 4)

В даному випадку (див. рис. 11) маємо у площині екватора картину, схожу до тої, яку розглядали у площині орбіти на рис. 5: є у площині екватора абстрактне коло з центром в центрі Землі і радіусом орбіти r , на якому рівномірно рознесені точки розташування космічних апаратів (штучний, уявний аналог орбіти). Обравши відповідне значення кутової величини дуги l_s між точками розташування сусідніх космічних апаратів (аналогічно тому, як обиралася кількість космічних апаратів у площині орбіти), можна забезпечити неперервне покриття тороподібної зони навколо обраного кола у площині екватора (див. рис. 11). Фактично, приходимо до задачі, яка розглядалася у площині орбіти у випадку застосування пристроїв спостереження типу 5. І для пояснення розв'язку цієї задачі підходять рис. 6 - 9, а для розрахунків – формули (5)-(10). Формула (10) дає значення величини дуги l_s і в випадку пристроїв спостереження типу 5, і у випадку пристроїв типу 3, а вже наступна формула (11) у даному випадку змінить свій вигляд і набуває іншого значення. Ми штучно «розташували» супутники у вузлових точках на екваторі у один момент часу t^* , тому аналогом формули (11) буде формула, записана нижче, (в цій формулі

застосоване і значення m_3^* , яке показує, що розглядаються пристрої спостереження типу 3)

$$m_3^* = m^* = \left[\frac{\pi}{l_s} \right] + 1. \quad (22)$$

На відміну від формули (11), формула (22) визначає не кількість космічних апаратів, а кількість орбітальних площин m^* , необхідних для повного покриття тороподібної зони, яка утворена навколо умовного кола радіусу r , у площині екватора (див. рис. 11). Перетин цієї тороподібної зони площиною, перпендикулярною до площини екватора, має радіус R_d (рис. 8, 9, 15). В формулі (22), на відмінність від формули (11), на величину l_s розділена величина π з врахуванням того, що в запропонованій для розгляду уявній штучній ситуації вважається, що у обох вузлових точках в орбітальній площині розташовані космічні апарати (тобто кожна пара космічних апаратів в протилежних вузлових точках відповідає одній площині).

Якщо б задача вирішувалася суто геометрично, можна було б забезпечити повне покриття простору в певній області висот, що оточує сферу з центром в центрі Землі і радіусом r , безперервно «заповнивши» цей простір тороподібними зонами, для яких площина кожної окружності, що в середині тороподібної зони, паралельна площині екватора, а радіуси зменшуються з наближенням до полюсів. В описаному рішенні окружності, що розташовані посередині тору, перетинають кожну з орбіт, і, визначивши кількість точок перетинання орбіти, можна було б, відповідно, визначити і необхідну кількість космічних апаратів в одній орбітальній площині. Але, враховуючи, що на коловій орбіті відстань між парою космічних апаратів незмінна, і що за постановкою задачі космічні апарати симетрично рознесені уздовж орбіти, оберемо інший підхід до пошуку рішення, який забезпечить його з великим «запасом».

Нехай на одній з орбіт (див. рис. 11) обрані симетрично рознесені уздовж орбіти точки, які можна уявити точками міста знаходження космічних апаратів у деякий умовний момент часу t^* (величина дуги між кожною парою сусідніх точок – $2b_s$). На рис. 11 відповідно виділені розташовані поряд послідовно точки $C_{(i-1)}$, C_i і $C_{(i+1)}$ (вони співпадають з відповідними точками розташування космічних апаратів $S_{(i-1)}$, S_i і $S_{(i+1)}$). Для забезпечення цілісності представленої задачі на рис. 11 точки на орбіті «розставлені» таким чином, що є точка, яка співпадає

з вузловою точкою орбіти (зокрема – точка C_n , якій відповідає точка розташування супутника S_n).

Для пояснення «розвороту погляду» на геометричну постановку задачі при пошуку рішення у випадках пристроїв типу 5 і типу 3 ще раз порівняємо картини на рис. 11 та на рис. 5. На кожному з рисунків можна бачити два кола радіусу r у взаємно перпендикулярних площинах. На одному з кіл показані точки, рознесені на величину дуги l_s (три з них – $S_{(j-1)}$, S_j і $S_{(j+1)}$), а в іншому – знаходяться точки (три з них – $C_{(i-1)}$, C_i і $C_{(i+1)}$), між кожною парою яких величина дуги $2b_s$. В одному випадку (для типу пристроїв спостереження 5) першою площиною є площина орбіти, а другою площиною – площина екватора. У другому випадку (для типу пристроїв спостереження 3) – першою площиною є площина екватора, а другою площиною – площина орбіти.

Кількість описаних точок у орбітальній площині (кількість космічних апаратів на орбіті) для випадку пристроїв спостереження типу 3, будемо обирати за тим підходом, що запропонований для вибору кількості орбітальних площин у випадку пристроїв спостереження типу 5. Для пояснення пошуку рішення повністю підходять геометричні побудови, зображені на рис. 10 (у цьому випадку на рис. 10 зображена картина у площині орбіти, якщо на цю площину дивитися таким чином, що висхідний вузол знаходиться праворуч, а низхідний – ліворуч). Розрахунки при цьому можуть бути здійснені на основі рівнянь (12)–(15) та при застосуванні іншого запису рівняння (16), який приведений далі

$$n_3^* = n^* = \left\lceil \frac{\pi}{b_s} \right\rceil + 1. \quad (23)$$

В рівнянні (23), на відміну від рівняння (16), для випадку пристроїв спостереження типу 3 визначається не кількість орбітальних площин, а кількість n^* (n_3^*) космічних апаратів, які мають бути рівномірно розташовані на орбіті (кутова величина – 2π), знаходячись один від одного на величині дуги $2b_s$.

Якщо за описаним розрахунковим алгоритмом на основі рівняння (22) знайдені значення кількості орбітальних площин m^* (m_3^*), а також кількості космічних апаратів n^* (n_3^*) на основі рівняння (23), то миттєвими зонами можливого застосування пристроїв типу 3 буде безперервно покрита область висот відповідної ширини в оточенні орбітального

угруповання космічних апаратів того сегменту системи, який обирається в даній елементарній задачі. Але при співнаправленому русі буде спостерігатися тільки частина (за грубою оцінкою – приблизно половина) об'єктів цієї покритої області. Якщо формулу (23) записати інакше, як показано далі

$$m_3^{**} = m^{**} = \left\lceil \frac{2\pi}{l_s} \right\rceil + 1, \quad (24)$$

то будемо мати подвійне покриття цієї області простору зонами застосування пристроїв спостереження, але буде забезпечена можливість спостереження всіх об'єктів при «співнаправленому» русі.

Обравши значення кількості орбітальних площин на основі рівнянь (23) або (24), відповідно можна визначити різницю значень довготи висхідного вузла $\Delta\Omega^*$ на основі рівняння (18) або $\Delta\Omega^{**}$ на основі рівняння (19).

Враховуючи, що обрані значення m^* і n^* можна для пристроїв типу q і сегменту за номером k записати відповідно M_{qk} і N_{qk} , кількість космічних апаратів N_{gqk} у k -му сегменті визначає формула (20), а кількість космічних апаратів N_{Gq} у всій системі спостереження – формула (21).

4. Підхід до побудови супутникової системи на декількох різновисоких сегментах

Вище були представлені алгоритми вибору параметрів одного з угруповань (угруповання k -го сегмента) супутникової системи спостереження для пристроїв чотирьох типів. Далі описаний запропонований підхід до побудови всього орбітального угруповання, який може бути застосований у випадку покриття простору одним з чотирьох зазначених типів спостереження.

Ширина області висот, яку безперервно покривають зони застосування пристроїв k -го сегменту, залежить не тільки від параметрів β_{mk} , L_{mk} , що визначають зону застосування пристроїв спостереження в кожному сегменті, а й від тих параметрів, які обираються при побудові:

1) значення коефіцієнтів k_d , k_h (вони для кожного k -го сегмента можуть відрізнятися і будуть записані – k_{dk} , k_{hk});

2) та від значення r_k радіусу його орбіт угруповання k -го сегменту.

Спочатку розглянемо рішення в спрощеній постановці, коли воно може бути аналітичним. Введемо припущення що параметри, які визначають розмір миттєвої зони, покритої пристроєм спостереження k -го угруповання (L_{mk} , β_{mk} та, відповідно, R_{mk}) – однакові для всіх угруповань системи (зокрема, можна вважати, що $R_{mk} = R_m$, яке є середнім значенням по всіх сегментах). Також прийемо, що коефіцієнти k_{dk} і k_{hk} однакові для всіх сегментів ($k_{dk} = k_d$, $k_{hk} = k_h$).

Тоді «ширина» сферичного шару навколоземного простору, безперервно покритого пристроями спостереження орбітального угруповання кожного k -го сегменту, може бути визначено рівнянням

$$L_h = 2k_d k_h R_m, \quad (25)$$

а кількість шарів K , що безперервно покривають задану область висот $[h_{\min}, h_{\max}]$ (еквівалентно – кількість різновисоких орбітальних угруповань), відповідно, дорівнює

$$K = \left\lceil \frac{h_{\max} - h_{\min}}{L_h} \right\rceil + 1, \quad (26)$$

де $\lceil \cdot \rceil$ означає цілу частину числа.

Радіус орбіт угруповання r_k кожного k -го угруповання визначає рівняння

$$r_k = R_E + h_{\min} + L_h(k-1) + L_h/2. \quad (27)$$

Обравши значення K і r_k ($k = \overline{1, K}$) за відповідним з двох запропонованих методів вирішується елементарна задача для кожного сегмента і знаходиться кількість космічних апаратів у сегменті.

Більш точне рішення, яке враховує відмінності вихідних даних для кожного сегменту може бути знайдено із застосуванням чисельного алгоритму, який на основі варіювання пар коефіцієнтів k_{dk} і k_{hk} забезпечує дві складові вирішення задачі на ітерації. Перша частина стосується визначення кількості орбітальних сегментів, а друга – розрахунку кількості космічних апаратів в кожному сегменті із застосуванням запропонованого методу вирішення елементарної задачі. Ще раз підкреслимо, що обрані в такий спосіб області простору, покриті пристроями сусідніх сегментів, можуть мати невеличке перекриття. Детальна опис пошуку рішення та розробка алгоритму його реалізації тут не представлені.

5. Розрахунки та їх аналіз

Далі приведені розрахункові результати вирішення із застосуванням запропонованого методу елементарної задачі (побудови одного орбітального сегменту супутникової системи) для випадку використання пристрою типу 5 (для випадку пристрою спостереження типу 6 отримаємо такі ж результати). Задані значення параметрів миттєвої зони покриття простору пристроєм спостереження: $L_m = 1500$ км, $\beta_m = 40$ град. Здійснюються розрахунки для орбітального угруповання одного з сегментів систем, вважаючи значення його висоти $h = 800$ км. Змінюються значення коефіцієнтів k_d і k_h з обраними кроками в межах можливого і раціонального діапазону, та розраховується кількість $n_5^*(k_d)$ космічних апаратів в кожній орбітальній площині угруповання і кількість орбітальних площин $m_5^*(k_d, k_h)$. Також знаходиться повна кількість космічних апаратів угруповання $N_5^*(k_d, k_h)$ та ширину $L_{h5}(k_d, k_h)$ зони висот над поверхнею Землі, яку забезпечує це угруповання. Розрахунки названих функцій відповідно до порядку, в якому вони перелічені вище, представлені на рис. 12 - 15. На кожному графіку на вісі абсцис відкладені значення коефіцієнта k_d , а для кожного значення k_h на графіках залежностей $m_5^*(k_d, k_h)$, $N_5^*(k_d, k_h)$, $L_{h5}(k_d, k_h)$ представлена окрема функція. За результатами розрахунків функції $n_5^*(k_d)$ і $m_5^*(k_d, k_h)$ (див. рис. 12 та 13) можна бачити, очевидні тенденції:

1) зростання кількості космічних апаратів $n_5^*(k_d)$ на орбіті зі збільшенням значення коефіцієнта k_d ;

2) зростання кількості орбітальних площин $m_5^*(k_d, k_h)$ в угрупованні висотного сегмента супутникової системи зі збільшенням значення коефіцієнта k_h .

Зростання значення коефіцієнта k_d призводить до зменшення кількості $m_5^*(k_d, k_h)$ орбітальних площин в орбітальному угрупованні висотного сегмента супутникової системи. Це спричинено тим, що при збільшенні значення k_d стає більшим радіус R_d перетину бінормальною площиною тороподібної зони (це забезпечено збільшенням кількості космічних апаратів $n_5^*(k_d)$), і завдяки «розширенню»

тороподібної зони можна отримати покриття простору меншою кількістю $m_5^*(k_d, k_h)$ орбітальних площин).

Описаний ефект у поведінки функції $m_5^*(k_d, k_h)$ схожий на той, що спостерігається і при розв'язку задачі побудови орбітального угруповання космічних апаратів, яке забезпечує повне покриття поверхні земної сфери [40]. В задачі покриття Земної сфери при збільшенні кількості космічних апаратів на орбіті також зменшується необхідна кількість орбітальних площин, що спричинено збільшенням ширини полоси неперервного огляду поверхні Землі комічними апаратами на одній орбіті (ширина полоси неперервного огляду цьому при порівнянні задач виступає аналогом розміру перетину бі-нормальною площиною тороподібної зони безперервного покриття простору).

До головних показників, які впливають на вибір параметрів орбітального угруповання висотного сегменту системи належать загальна кількість $N_5^*(k_d, k_h)$ (див. рис. 14) космічних апаратів цього угруповання та ширина $L_{h5}(k_d, k_h)$ безперервно покритої зони висот у оточенні k -го сегмента орбіталь-

ного угруповання системи, яку забезпечують пристрої спостереження цього сегменту (див. рис. 14). При заданих параметрах області миттєвого покриття простору пристроєм спостереження та при обраній висоті орбіти найменшій кількості космічних апаратів в угрупованні сегмента відповідає точка 1 на графіках рис. 15, в якій $N_5^*(0,52, 0,3) = 4608$. Ширина повністю покритої зони простору при тих самих значеннях коефіцієнтів k_d і k_h (точка 1, рис. 16) буде $L_{h5}(0,52, 0,3) \approx 301$ км. Збільшенню ширини повністю покритого сферичного шару висот приблизно у двічі відповідає точка 2 на рис. 16 – $L_{h5}(0,78, 0,4) \approx 602$ км. Таку ширину забезпечуватиме кількість супутників (точка 2 на рис. 15)

$N_5^*(0,78, 0,4) = 6171$. Тобто збільшення ширини повністю покритої області висот в два рази відповідає збільшенню кількості космічних апаратів в угрупованні сегмента в 1,3 рази (а це, за дуже грубою оцінкою, при даній постановці задачі та без врахування багатьох інших факторів, дає обґрунтування доцільності в наведеному прикладі обрати один сегмент замість двох).

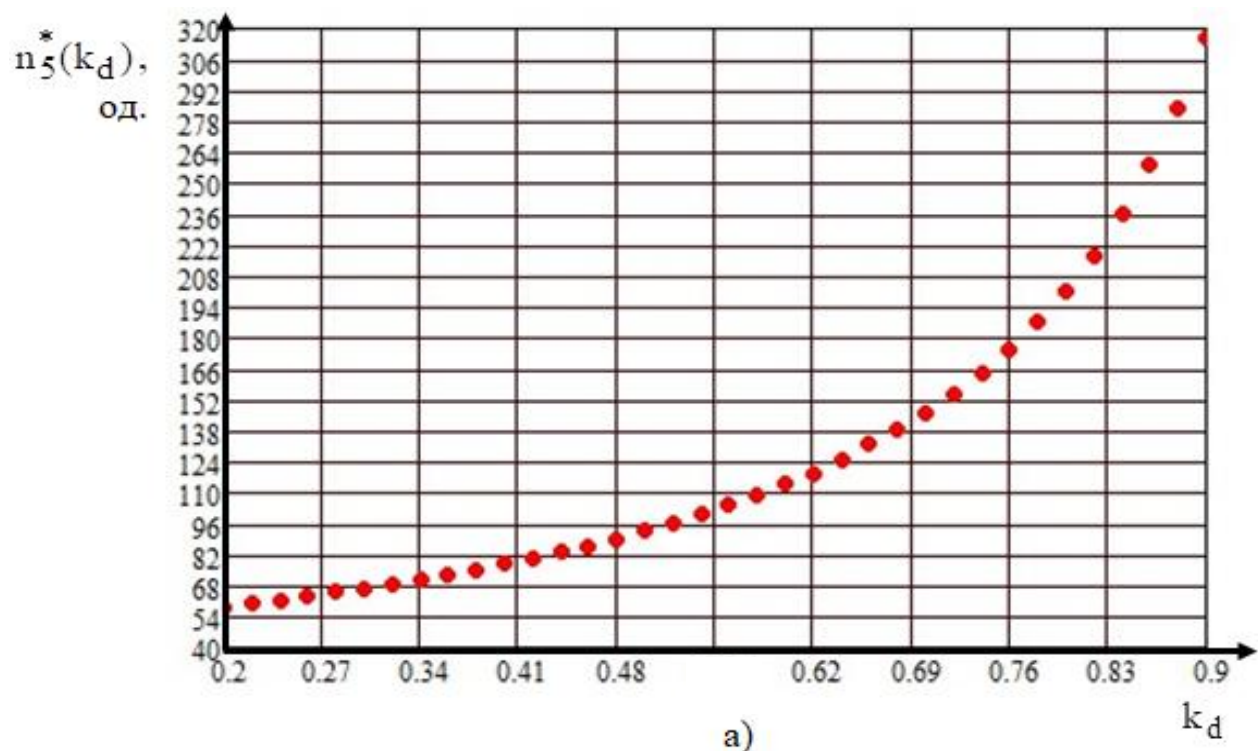


Рис. 12. Залежність кількості космічних апаратів $n_5^*(h_d)$ в орбітальній площині сегменту системи від обраного значення коефіцієнта k_d

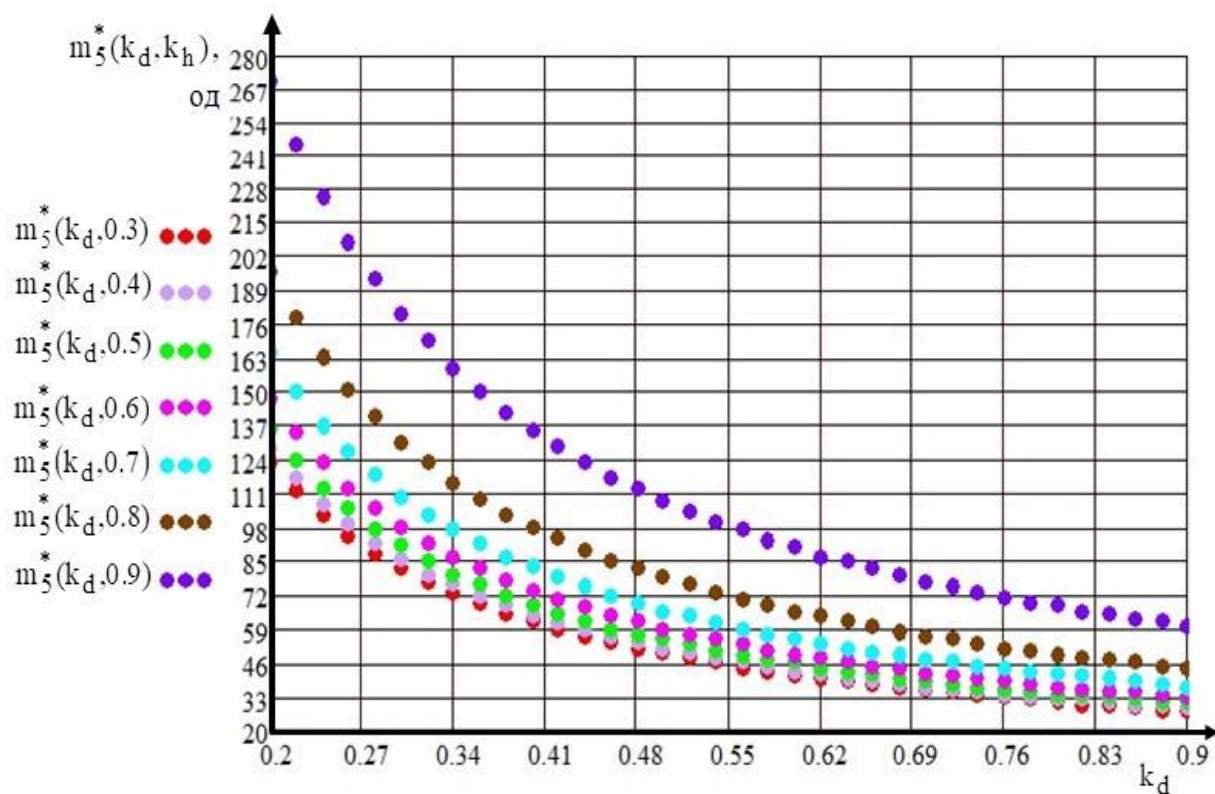


Рис. 13. Залежність кількості орбітальних площин $m_5^*(k_d, k_h)$ в орбітальному угрупованні сегменту системи від обраних значень коефіцієнтів k_d і k_h

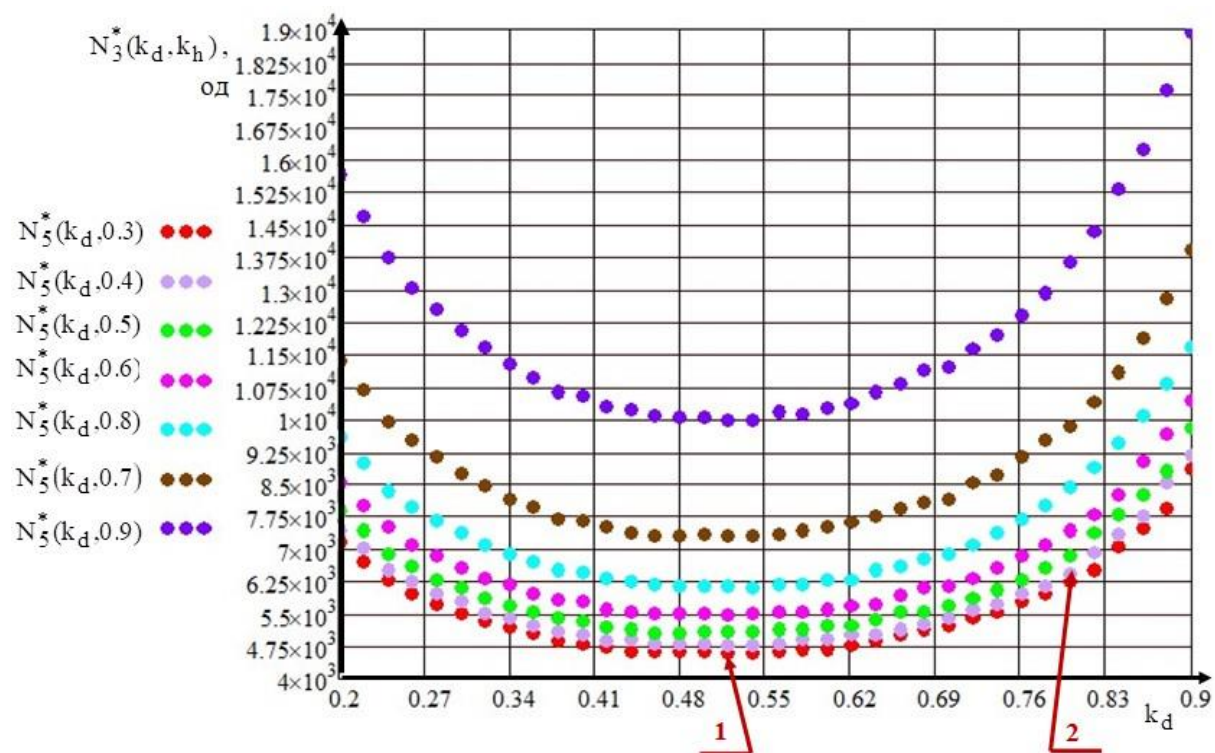


Рис. 14. Залежність кількості космічних апаратів $N_5^*(k_d, k_h)$ в орбітальному угрупованні сегменту системи від обраних значень коефіцієнтів k_d і k_h

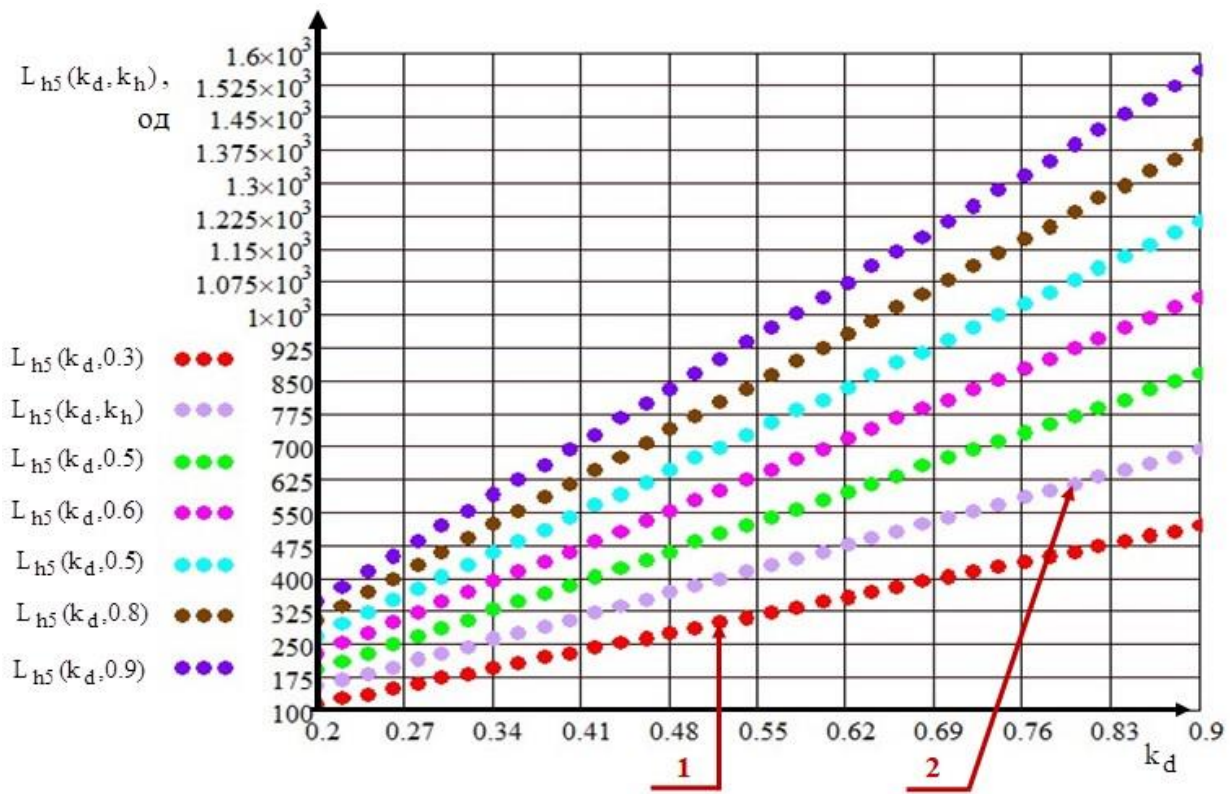


Рис. 15. Залежність ширини $L_{h5}(k_d, k_h)$ зони висот безперервного покриття у оточенні орбітального угруповання сегмента системи, яку забезпечують пристрої спостереження цього сегменту, від обраних значень коефіцієнтів k_d і k_h

В дані роботі не досліджується вплив параметрів миттєвої зони можливого застосування пристрою спостереження на необхідну для забезпечення вимог задачі кількість космічних апаратів. Але для поверхневої оцінки можливостей реалізації покриття простору пристроями «горизонтальних» спостережень приведемо (без представлення графіків розрахунків) приклад застосування пристрою з меншим значенням граничної дальності застосування для спостережень.

Нехай при інших незмінних вхідних даних гранична межа за дальністю проведення спостережень – $L_m = 500$ км. Тоді необхідна кількість космічних апаратів в угрупованні висотного сегмента системи – $N_5^*(0,52, 0,3) = 36920$ одиниць, а ширина повністю покритої зони висот – $L_{h5}(0,52, 0,3) \approx 100$ км.

Якщо для випадку застосування пристрою типу 3 або 4 застосовується метод вирішення другої елементарної задачі при тих самих значеннях величин β_m , L_m і h , які застосовані для пристроїв типів 5 і 6, результати будуть «симетричні» до результатів, які надає метод вирішення першої задачі. А саме:

1) графік, що представляє на рис. 12 кількість $n_5^*(k_d)$ космічних апаратів у орбітальній площині

для випадку пристроїв типу 5, у випадку пристроїв типу 3 представляють кількість $m_3^*(k_d)$ орбітальних площин;

2) графіки, що представляють на рис. 13 значення кількості орбітальних площин $m_5^*(k_d, k_h)$ для випадку пристроїв типу 5, у випадку пристроїв типу 3 представляють кількість $n_3^*(k_d, k_h)$ космічних апаратів в площині. При цьому результати розрахунків кількості $N_3^*(k_d, k_h)$ космічних апаратів в орбітальному угрупованні сегменту системи і «ширини» покритого сферичного шару $L_{h3}(k_d, k_h)$ у випадку пристрою спостереження типу 3 ідентичні до результатів, знайдених у випадку пристрою спостереження типу 5 (дорівнюють значенням $N_5^*(k_d, k_h)$ і $L_{h5}(k_d, k_h)$ відповідно).

На рис. 16 приведені результати розрахунків глобальних параметрів повної супутникової системи спостереження орбітальних об'єктів на основі аналітичних розрахунків за запропонованим спрощеним підходом при тих же значеннях параметрів β_m , L_m та заданих границях зони покриття системи (а саме:

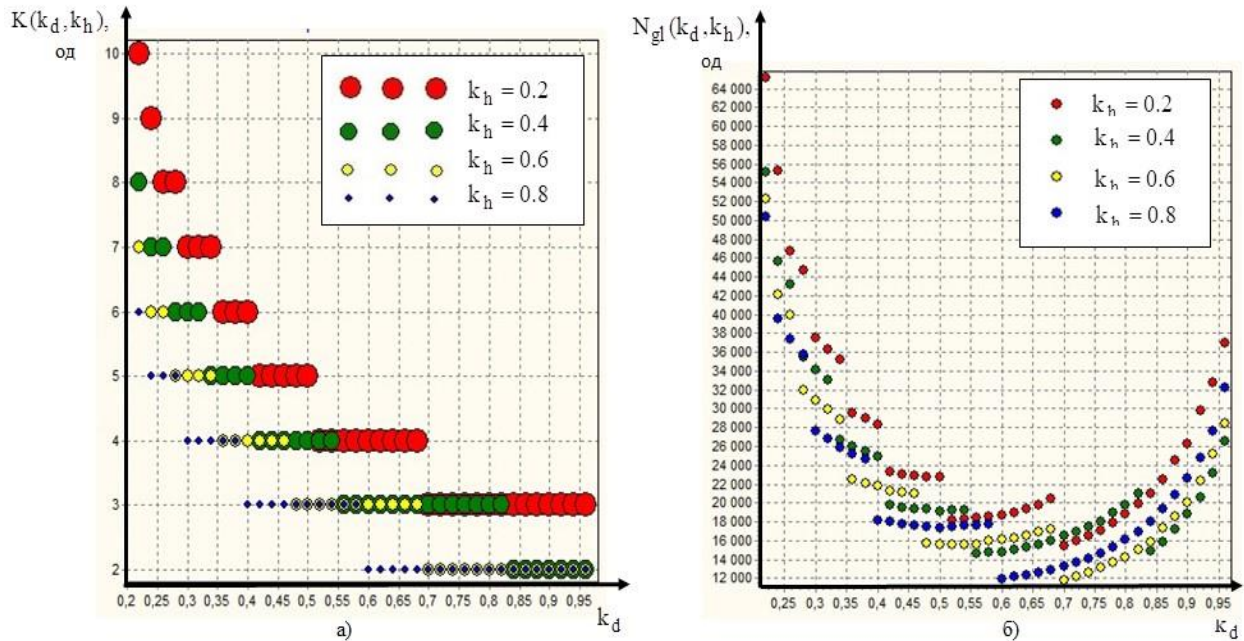


Рис. 16. Залежності глобальних параметрів орбітального угруповання системи спостереження від коефіцієнтів k_d і k_h : а) для кількості орбітальних сегментів $K(k_d, k_h)$; б) для кількості космічних апаратів в системі $N_{gl}(k_d, k_h)$

$h_{\min} = 200$ км, $h_{\max} = 1000$ км). В залежності від аргументів k_d і k_h на рис. 16, а представлена кількість орбітальних сегментів в угрупованні системи $K(k_d, k_h)$, а на рис. 16, б – кількість космічних апаратів в системі $N_{gl}(k_d, k_h)$. Кожний розрив на графіку відповідає зміні кількості сегментів у угрупованні.

З тих результатів, які приведені на графіках, мінімальну кількість космічних апаратів можна отримати при значеннях $k_d \approx 0,69$ і $k_h = 0,6$. Для розв'язку задачі повного, не менш ніж однократного, покриття заданої області висот необхідно приблизно 12000 космічних апаратів-спостерігачів і два орбітальних угруповання. Але знов таки, прийнемо до уваги, що максимальна дальність дії пристрою спостережень у 1500 км, що була взята для розрахунків, реалізується складно (особливо для пристроїв орбітального базування). Змінивши дальність дії пристрою спостереження на 500 км будемо мати мінімально необхідну кількість космічних апаратів приблизно 300000, а розміщення їх – у 4 сегментах. Більш точні результати можна отримати, варіюючи значення k_d і k_h в раціональному діапазоні зі зменшеним кроком варіювання. Відзначимо, що в порівнянні з елементарними задачами оптимальний результат для повної системи відповідає більшим значенням коефіцієнту k_h .

6. Обговорення результатів щодо побудови супутникових систем «горизонтальних» спостережень

Підведемо підсумки щодо перспектив реалізації «горизонтальних» спостережень орбітальних об'єктів. Розрахункові результати, приведені в даній роботі, показують, що при достатньо великій дальності дії пристроїв спостереження системи орбітальне угруповання, що забезпечує «горизонтальні» спостереження в області низьких висот тільки одним видом пристрою, можна реалізувати (кількість 4600 космічних апаратів, необхідна для угруповання на висоті 800 км над поверхнею Землі при 1500 км дальності спостереження, не є критичною для сучасних концепцій великих угруповань).

При зменшенні граничної дальності спостереження необхідна кількість космічних апаратів істотно збільшується, але тут необхідно врахувати декілька факторів. По-перше, пристрої, що реалізують «симетричні» горизонтальні спостереження (це пари типів пристроїв 3 і 4, 5 і 6), можуть бути використані одночасно, і тоді буде розглядатися задача неперервного покриття простору за результатом їх спільного застосування. В цьому випадку за грубою оцінкою для спостереження того ж сферичного шару навколоземного простору кількість космічних апаратів угруповання можна зменшити приблизно вдвічі (для

більш глибокого аналізу і точної оцінки метод вибору параметрів угруповання має бути модифікованим).

По-друге, коли обирається кількість космічних апаратів за запропонованим в роботі методом, враховується тільки область безперервного покриття, але пристрій спостереження покриває ще частину області простору (поза тороподібною зоною), що також можна використати.

По-третє, завдяки періодичності процесів орбітального руху, об'єкти спостереження періодично стають то ближче, то далі до пристроїв спостереження. Тому в подальшому рішення може бути у комбінації пристроїв спостереження різної дальності в орбітальному угрупованні.

Висновки

Виділимо аспекти наукової новизни даної роботи. По-перше, отримала розвиток тема застосування пристроїв орбітального базування для спостереження множини орбітальних об'єктів. Зокрема, висвітлений на рівні постановки задачі та розробки підходів і методів щодо її вирішення один з мало вивчених аспектів в рамках зазначеної тематики, а саме – забезпечення тотального (неперервного у часі і просторі) покриття зонами застосування пристроїв «горизонтальних» спостережень заданої зони висот над поверхнею Землі, при яких космічний апарат-носії пристрою спостереження стабільно орієнтований відносно осей барицентричної орбітальної системи координат, в вісь симетрії миттєвої конусоподібної зони можливого застосування пристрою лежить у площині миттєвого місцевого горизонту космічного апарату.

По-друге, розроблено два «симетричних» методи визначення параметрів орбітального угруповання космічних апаратів на колових орбітах однієї висоти, які застосовують один з чотирьох можливих типів пристроїв «горизонтальних» спостережень (перший метод призначений до випадку, коли вісь симетрії миттєвої зони застосування пристрою лежить у площині орбіти, а другий методи – коли ця вісь перпендикулярна до площини орбіти). Вважається, що у загальному випадку супутникова система спостереження буде побудована на декількох таких угрупованнях різної висоти. Методи забезпечують пошук параметрів орбітального угруповання, для якого обрана структура, що часто вживана в задачах тотального покриття поверхні Землі: угруповання побудовано на колових полярних орбітах у вигляді декількох «кілець» («замкнених ланцюжків») космічних апаратів, розташованих в одній номінальній площині (варіант сузір'я Волкера). Пристрої спостереження,

встановлені на космічних апаратах угруповання, мають забезпечити тотальне покриття не поверхні сфери (наприклад, Земної сфери), а області простору у вигляді сферичного шару, серединою якого є сфера з радіусом орбіт космічних апаратів угруповання. Крім того, для цього, на відміну від задачі покриття поверхні земної сфери, застосовуються не пристрої «вертикальних» спостережень, а пристрої «горизонтальних» спостережень. В основі обох запропонованих методів один і той же розрахунковий алгоритм з точки зору геометрії, але в них змінюється послідовність розгляду аналогічних «картин» в орбітальній площині і площині екватора, що призводить до «рокірування» у порядку розрахункових операцій з визначення кількості космічних апаратів у орбітальній площині і кількості орбітальних площин.

По-третє, розроблені геометричні постановки та алгоритми вирішення комплексу з двох задач:

1) задача вибору кількості космічних апаратів для забезпечення заданого параметру тороподібною зони неперервного покриття пристроями «горизонтальних» спостережень, встановленими на космічних апаратах на одній коловій орбіті (реальній або «уявній»), при заданих параметрах миттєвої зони можливого застосування пристрою спостереження, прийнятою конусоподібною;

2) задача вибору кількості тороподібних зон, покриття яких надасть можливість покрити область висот над поверхнею Землі, якщо розмір цієї зони (який визначається як різниця значень максимальної і мінімальної висоти зони) є заданою частиною від радіуса перетину тороподібною зони.

По-четверте, запропонований підхід до пошуку рішення щодо побудови супутникової системи на декількох різновисоких орбітальних угрупованнях на колових полярних орбітах, яке б забезпечувало тотальне покриття заданої області висот зонами миттєвого застосування пристроїв спостереження одного з типів «горизонтальних» спостережень і було б квазі-оптимальним з точки зору мінімізації кількості космічних апаратів. Особливість підходу у варіюванні для орбітальних угруповань значень двох введених в елементарних задачах коефіцієнтів, один з яких визначає частину від гранично можливої ширини тороподібною зон неперервного покриття навколо номінальної орбіти угруповання, а інший – частину від максимально можливої «товщини» безперервно покритого шару висот, який забезпечувало кожне орбітальне угруповання

По-п'яте, наведено розрахункові приклад застосування запропонованих елементарних методів вибору параметрів орбітальних угруповань різновисоких сегментів супутникової системи, що реалізує «горизонтальні» спостереження орбітальних об'єктів, та приклад реалізації підходу до побудови

всього угруповання. Отримані розрахункові результати надалі можливість здійснити деякі наближені оцінки та зробити висновків щодо перспектив тотального покриття простору зонами миттєвого застосування пристроїв «горизонтальних» спостережень, встановленими на космічних апаратах.

Підведемо підсумки стосовно *практичного застосування отриманих результатів*. Результати, що представлені в даній роботі, забезпечують частину з комплексу задач, які мають бути вирішені при проектуванні супутникової системи спостереження орбітальних об'єктів, створеної на основі синергетичного поєднанні різних типів пристроїв спостереження і підходів до їх застосування.

По-перше, як відзначалося, вирішена задача вибору такої структури орбітального угруповання, яка б надавала можливість повного покриття області простору, де передбачається знаходження об'єктів заданої для спостереження множини, тобто забезпечувала виконання необхідних умов реалізації спостережень без врахування кількості і розміщення ресурсів спостереження відповідно до кількості і розміщення об'єктів спостереження.

По-друге, тут штучно виділений випадок реалізації системи при застосуванні тільки одного типу пристроїв спостереження. Але отримані результати будуть корисними на початкових етапах проектування системи спостереження, коли відбувається «розшарування» задачі щодо її створення, проектне вивчення різних аспектів створення, здійснення аналізу і оцінки можливостей щодо реалізації кожної з «виділених» для розгляду складових.

Серед шляхів подальший розвитку дослідження назовемо такі:

1) ускладнення постановки задачі щодо вимоги забезпечити покриття заданої області висот із заданою кратністю пристроями одного типу;

2) розвиток елементарних задач побудови орбітального угруповання при одночасному застосуванні декількох різних типів пристроїв одним космічним апаратом;

3) застосування запропонованих методів і підходів при проектуванні систем комплексної реалізації «горизонтальних» і «вертикальних» спостережень;

4) пошук квазіоптимального рішення при багатокритеріальній постановці задачі.

Розподіл спільного дослідження за авторством приведено далі. До авторства **Т. В. Лабуткіної** належать: 1) аналіз теми дослідження; 2) методи вирішення елементарних задач побудови сегменту супутникової системи з космічними апаратами на колових орбітах одної висоти; 3) розрахунки та аналіз результатів за цими методами. Автором **Р. В. Ананко**

розроблено: 1) концептуальне рішення та постановка задачі щодо побудови угруповання супутникової системи спостереження орбітальних об'єктів, яка забезпечує тотальне покриття горизонтальними спостереженнями заданого сферичного шару у навколоземному просторі; 2) розробка підходу до вибору параметрів системи на основі запропонованих методів побудови орбітальних угруповань різновисоких сегментів системи; 3) розрахунки загальних показників параметрів системи і аналіз перспектив побудови супутникових систем «горизонтальних» спостережень на різновисоких орбітальних угрупованнях; 4) висновки до статті.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. *ESA'S annual space environment report [Електронний ресурс]: Prepared by ESA Space Debris Office. – Date of Issue 12 June 2023. – Режим доступу: https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf. – 15.06.2023.*
2. *Випорханюк, Д. М. Основи космічної ситуаційної обізнаності (Space Situational Awareness, SSA). Загальна навколоземна космічна обстановка станом на 01.01.2023 р. [Текст] / Д. М. Випорханюк, С. А. Мамрай // Інформаційно-аналітичний бюлетень № 1/01-2023. – Житомир : Поліський національний університет, 2023. – 36 с. – Режим доступу: https://space.polissiauniver.edu.ua/images/2023/SSA_ZAG_2023-01-01_.pdf. – 10.06.2023.*
3. *Technical Study Space Debris [Електронний ресурс]: Prepared by Luke Shadbolton behalf of all HDI Global Specialty offices. – HDI Global Specialty Study Space Debris, 2023. – 44 p. – Режим доступу: https://www.hdi.global/globalassets/_local/international/newsroom/hdi_global_specialty_study_space_debris_2023_corpv5.pdf. – 10.06.2023.*
4. *Our world in Data. Space Exploration and Satellites [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ourworldindata.org/space-exploration-satellites/>. – 10.06.2023.*
5. *Випорханюк, Д. М. Основи космічної ситуаційної обізнаності (Space Situation Awareness, SSA). Іноземний і вітчизняний досвід космічної діяльності у сфері оборони [Текст] : монографія / Д. М. Випорханюк, С. В. Ковбасюк. – Житомир : Видавництво О.О. Євенок, 2018. – 532 с. – Режим доступу: <https://space.polissiauniver.edu.ua/images/book/monograph/rafiya2018.pdf>. – 10.06.2023.*
6. *Research Advancements in Key Technologies for Space-Based Situational Awareness [Text] / Beichao Wang, Shuang Li, Jinzhen Mu, Xiaolong Hao, Wenshan Zhu & Jiaqian Hu // Space: Science & Technology. – 2022. – Vol. 2022. – Article ID 9802793. – 31 p. DOI: 10.34133/2022/9802793.*

7. Hall, T. D. *Satellite Collision and Fragmentation Probabilities Using Radar-Based Size and Mass Estimates [Text]* / Doyle T. Hall & Luis G. Baars // *Spacecraft and Rockets*. – 2023. – Vol. 60, No. 4. – P. 1319-1332. DOI: 10.2514/1.A35697.
8. Pike, Oliver I.-D. *Modelling the Resilience of Space Infrastructure to Impacts from Orbital Debris [Електронний ресурс]* / Oliver I.-D. Pike, Lucy Berthoud, Simon Agass // 73rd International Astronautical Congress (IAC), IAC-22, A6.2,x73719, 18-22 September 2022. – 2022. – Vol. 2022. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/371970279_Modelling_the_Resilience_of_Space_Infrastructure_to_Impacts_from_Orbital_Debris. – 10.06.2023.
9. Визначення орієнтації штучного супутника Землі у випадку дифузного розсіювання світла його поверхнею [Текст] / В. П. Єнішев, В. І. Кудак, І. І. Мотрунич, В. М. Періг, І. Ф. Найбауер, В. І. Присяжний // *Космічна наука і технологія*. – 2022. – Т. 28, № 1(134). – С. 61-69. DOI: 10.15407/knit2022.01.061.
10. *Global Trends in On Orbit Servicing, Assembly and Manufacturing (OSAM)* [Електронний ресурс] / B. A. Corbin, A. Abdurrezak, L. P. Newell, G. M. Roesler & B. Lal. – Science & Technology Policy Institute, March 2020. – Режим доступу: <https://www.ida.org/-/media/feature/publications/g/gl/global-trends-in-on-orbit-servicing-assembly-and-manufacturing-osam/d-13161.ashx>. – 10.06.2023.
11. Васильєв, В. В. Орбітальний сервіс – крок до подальшого освоєння навколосезного космосу [Текст] / В. В. Васильєв, Л. Я. Годунок, С. А. Матвієнко // *Космічна наука і технологія*. – 2021. – Т. 27, № 3 (130). – С. 39-50. DOI: 10.15407/knit2021.03.
12. *Riding the exponential growth in space* [Електронний ресурс] / J. Coykendall, K. Hardin, A. Brady, A. Hussain // *Deloitte Insights*. – 22 March 2023. Режим доступу: <https://www2.deloitte.com/za/en/insights/industry/aerospace-defense/future-of-space-economy.html>. – 10.06.2023.
13. Алпатов, А. П. О выборе оптимального маршрута орбитального сервисного обслуживания [Текст] / А. П. Алпатов, Ю. М. Гольдштейн // *Техн. механика*. – 2019. – № 4. – С. 21-28. DOI: 10.15407/itm2019.04.021.
14. Анализ баллистических аспектов комбинированного метода увода космических объектов с околоземных орбит [Текст] / Н. М. Дронь, А. В. Голубек, Л. Г. Дубовик, А. Ю. Дреус, К. В. Гети // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2019. – Т. 2, № 2(98). – С. 49-54. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.161778.
15. Оценка возможностей применения суборбитальных ракет-носителей для выведения средств увода объектов космического мусора с низких околоземных орбит [Текст] / Н. М. Дронь, К. В. Коростюк, А. В. Голубек, Л. Г. Дубовик, А. В. Кулик // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2020. – № 4 (164). – С. 60-65. DOI: 10.32620/akt.2020.4.07.
16. Golubek, A. V. *Estimation of the possibility of using electric propulsion systems for large-sized orbital debris post-mission disposal [Text]* / A. V. Golubek, M. M. Dron, O. M. Petrenko // *Space Science and Technology*. – 2023. – Vol. 29, iss. 3 (142). – P. 34-46. DOI: 10.15407/knit2023.03.034.
17. Leonard, R. *Viability of a circular economy for space debris [Text]* / R. Leonard & I. D. Williams // *Waste Management*. – 2023. – Vol. 155. – P. 19-28. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.10.024.
18. Alpatov, A. P. *Assesment of perspectives the orbital utilization of space debris [Text]* / A. P. Alpatov, Yu. M. Goldshtein // *Космічна наука і технологія*. – 2021. – Т. 27, № 3. – С. 3-12. DOI: 10.15407/knit2021.03.003.
19. *The Case for Space Environmentalism [Text]* / A. Lawrence, M. L. Rawls, M. Jah, A. Boley, F. Di Vruno, S. Garrington, M. Kramer, S. Lawler, J. Lowenthal, J. McDowell, M. McCaughrean // *Nature Astronomy*. – 2022. – Vol. 6. – P. 428-435. DOI: 10.1038/s41550-022-01655-6.
20. Ананко, Р. В. Навколосезний космос, контрольований людством: системність підходів, глобальність рішень, система-спостерігач на навколосезних орбітах [Text] / Р. В. Ананко, Т. В. Лабуткіна // Друга науково-практична Інтернет-конференція «Космічні горизонти», третій етап конференції – «Космос для людства»: Збірник тез, НЦАОМ, Дніпро, 1-3 грудня, 2022. – С. 33-43. – Режим доступу: https://space-horizons.org.ua/uploads/source/archiv_2022_3/tezu_3_2022.pdf. – 10.06.2023.
21. Концепція інформаційної системи для забезпечення моніторингу космічного простору з метою підвищення воєнної безпеки [Текст] / І. А. Беспалко, Л. Д. Греков, Д. В. Пекарєв, Д. Л. Федорчук // *Космічна наука і технологія*. – 2022. – Т. 28, № 4 (137). – С. 3-17. DOI: 10.15407/knit2022.04.003.
22. Основні тенденції світової космічної діяльності в інтересах національної безпеки та оборони [Текст] / Ф. М. Андреев, І. А. Беспалко, Д. М. Випорханюк, С. В. Ковбасюк // *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: збірник наукових праць*. – 2019. – Вип. 16. – С. 5-14. DOI: 10.46972/2076-1546.2019.16.
23. Лабуткіна, Т. В. Всеобщая глобальная космическая система наблюдения Земли и космоса в аспекте мира и безопасности земель, акцент на орбитальной составляющей [Текст] / Т. В. Лабуткіна, А. В. Хлапоніна // *Наукові читання «Дніпровська орбіта-2020»*: Збірник доповідей. – Дніпро, НЦАОМ, 2020. – С. 120-130. – Режим доступу: https://dneprorbita.org.ua/_files/doc/sbornik2020.pdf. – 10.06.2023.
24. Лабуткіна, Т. В. Інтегрована супутникова система та інформаційна система в її основі: основні положення концептуального рішення [Текст] / Т. В. Лабуткіна // *International scientific conference “Features of innovative development in the field of technology: the comparative experience of Ukraine and the European Union”*: conference proceed-

ings, August 5–6, 2022. Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2022. – P. 28-32. DOI: 10.30525/978-9934-26-230-2-7.

25. Adachi, G. Achievement of Space Debris Observation [Text] / G. Adachi, T. Ohnishi & M. Kameyama // *FUJITSU Sci. Tech. J.* – 2017. – Vol. 53, Iss. 3. – P. 45-51. – Available at: <https://www.fujitsu.com/global/documents/about/resources/publications/fstj/archives/vol53-3/paper08.pdf>. – 10.06.2023.

26. Observations of GEO and LEO Satellites: Radio Engineering Means of the Mykolaiv Astronomical Observatory [Text] / F. I. Bushuev, M. P. Kaliuzhnyi, V. F. Kriuchkovskiy, M. O. Kulichenko, O. V. Shulga, Z. Zhang, V. Bezrukovs, Ye. V. Malynovskiy, O. M. Reznichenko, O. B. Bryukhovetsky & G. Tuccari // *Space Science and Technology*. – 2022. – Vol. 28, iss. 2 (135). – P. 48–53. DOI: 10.15407/knit2022.02.048.

27. Оптичні спостереження штучних космічних об'єктів у Львівській астрономічній обсерваторії [Текст] / С. Б. Вовчик, А. І. Білінський, К. П. Мартинюк-Лотоцький, Н. В. Вірун & І. Я. Підстригач, Р. Т. Ногац // *Космічна наука і технологія*. – 2022. – Т. 28, № 2 (135). – С. 54-60. DOI: 10.15407/knit2022.02.054.

28. Reynolds, Robert C. Observing orbital debris using space-based telescopes: 1. mission control considerations [Text] / Robert C. Reynolds, David L. Talent & Faith Vilas // *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. – 1989. – Vol. 101, Iss. 645. – P. 1055-1060. DOI: 10.1086/132573.

29. A systematic examination of ground-based and space-based approaches to optical detection and tracking of satellites [Text] / Mark R. Ackermann, Colonel Rex R. Kiziah, Peter C. Zimmer, John T. McGraw & David D. Cox // *31st Space Symposium, Technical Track, Colorado Springs, Colorado, United States of America Presented on April 14, 2015*. – P. 1-46. – Available at: https://www.spacesymposium.org/wp-content/uploads/2017/10/M.Ackermann_31st_Space_Symposium_Tech_Track_paper.pdf. – 10.06.2023.

30. Golovich, N. On the Need for a Near-Earth Object Characterization Constellation in Low-Earth Orbit [Text] / N. Golovich // *arXiv:2301.10348v2*. – 26 Jan 2023. – P. 1-27. DOI: 10.48550/arXiv.2301.10348.

31. Zhao Li. Space-Based Optical Observation of Space Debris via Multipoint of View [Text] / Zhao Li, Yidi Wang & Wei Zheg // *International Journal of Aerospace Engineering*. – 2020. – Vol. 2020. – Article ID 8328405. 12 p. DOI: 10.1155/2020/8328405.

32. Неитерационный метод планирования наблюдения орбитальных объектов с космического аппарата [Текст] / Т. В. Лабуткина, Я. А. Скородезь, А. В. Борщева & А. А. Тихонова // *Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки*. – 2016. – Т. XXI. – С. 53-69. – Режим доступу: https://www.dnu.dp.ua/docs/zbirniki/fif/program_5e333a2a7217e.pdf. – 10.06.2023.

33. Review on strategies of space-based optical space situational awareness [Text] / H. U. Yunpeng, L. I. Kebo, L. Yan'gang & C. Lei // *Journal of Systems*

Engineering and Electronics. – 2021. – Vol. 32, iss. 5. – P. 1152-1166. DOI: 10.23919/JSEE.2021.000099.

34. Лабуткина, Т. В. Концепция глобальной космической системы наблюдения орбитальных объектов, фокус на динамическую составляющую системы [Текст] / Т. В. Лабуткина & А. В. Хлапонина // *Perspectives of world science and education. Abstracts of the 7th International scientific and practical conference*. CPN Publishing Group. Osaka, Japan. 2020. – P. 411-420. – Режим доступу: <http://sci-conf.com.ua>. – 10.06.2023.

35. Лабуткіна, Т. В. Концепція системи з наземними і орбітальними засобами спостереження орбітальних об'єктів: стратегії використання засобів [Текст] / Т. В. Лабуткіна, А. В. Хлапоніна & О. Р. Акінішев // *Multidisciplinary academic notes. Theory, methodology and practice. Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference*. Tokyo, Japan. 2022. – С. 1060-1069. – Режим доступу: <https://isg-konf.com/multidisciplinary-academic-notes-theory-methodology-and-practice/>. – 10.06.2023.

36. Лабуткіна, Т. В. Один варіант групи сеансу комбінованих спостережень орбітальних об'єктів та багатоваріантність у групі [Текст] / Т. В. Лабуткіна & О. Р. Акінішев // *XXI міжнародна науково-практична конференція «Науковці та методика використання сучасних технологій» (XXI International Scientific and Practical Conference «Scientists and methods of using modern technologies»)* – Мельбурн, Австралія. 2023. – С. 474-483. – Режим доступу: <https://isg-konf.com/scientists-and-methods-of-using-modern-technologies/>. – 10.06.2023.

37. Лабуткіна, Т. В., Концепція кластеру космічних апаратів з адаптивним до зміни задач орбітальним угрупованням як складова супутникової інтерсистеми [Текст] / Т. В. Лабуткіна & М. О. Перепелиця // *Trends in science and practice of today. Proceedings of the XXIX International Scientific and Practical Conference*. Stockholm, Sweden. 2022. – P. 321–330. DOI: 10.46299/ISG.2022.1.29.

38. Lansard, E. Global design of satellite constellations: a multi-criteria performance comparison of classical walker patterns and new design patterns [Text] / E. Lansard, E. Frayssinhes, J.-L. Palmade // *Acta Astronautica*. – 1998. – Vol. 42, Iss. 9. – P. 555-564. DOI: 10.1016/S0094-5765(98)00043-5.

39. Walker, J. G. Satellite Constellations [Text] / J. G. Walker // *Journal of the British Interplanetary Society*. – 1984. – Vol. 37. – Article No. 559. – Режим доступу: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1984JBIS...37..559W/abstract>. – 10.06.2023.

40. Баринев, К. Н. Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов [Текст] / К. Н. Баринев, М. Н. Бурдаев & П. А. Мамон. – М. : Машиностроение, 1975. – 270 с.

41. Lang, T. J. A Parametric Examination of Satellite Constellations to Minimize Revisit Time for Low Earth Orbits Using a Genetic Algorithm [Text] / T. J. Lang // *AAS/AIAA Astrodynamics Specialist*

Conference, Quebec, Canada, 30 July–2 August 2001. – Vol. 109. – P. 625–640.

42. Huang, S. Multi-Criteria Design of Continuous Global Coverage Walker and Street-of-Coverage Constellations Through Property Assessment [Text] / S. Huang, C. Colombo & F. Bernelli-Zazzera // *Acta Astronautica*. – 2021. – Vol. 188. – P. 151–170. DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.07.002.

43. Biria, A. D. Constellation Design for Space-Based Space Situational Awareness Applications: An Analytical Approach [Text] / Ashley D. Biria & Belinda Marchand // *Journal of Spacecraft and Rockets*. – 2014. – Vol. 51, iss. 2. DOI: 10.2514/1.A32622.

44. Rider, L. Design of low to medium altitude surveillance systems providing continuous multiple above-the-horizon viewing [Text] / L. Rider // *Optical Engineering*. – 1989. – Vol. 28, no. 1. – Article No. 280125. – P. 25–29. DOI: 10.1117/12.7976896.

45. Marchand, B. G. Above the horizon satellite coverage with dual-altitude band constraints [Text] / B. G. Marchand & C. J. Kobel // *Journal of Spacecraft and Rockets*. – 2009. – Vol. 46, no. 4. – P. 845–857. DOI: 10.2514/1.37140.

46. Dual-Altitude Band Coverage for Spaceborne Optical Sensor with Field-of-View Constraint [Text] / Yangyuxi Sun, Changxuan Wen, Zhengfan Zhu & Chen Zhang // *ARC AIAA*. – 2023. DOI: 10.2514/1.A35630.

47. Above-the-Horizon Coverage for Satellite Constellations with Dual-Altitude Band Constraints Using Ring-Based Discretization [Text] / Yangyuxi Sun, Changxuan Wen, Chen Zhang, Zhengfan Zhu & Zhao Ye // *ARC AIAA*. – 2022. – Vol. 60, Iss. 1. DOI: 10.2514/1.A35333.

48. Research on the Efficient Space Debris Observation Method Based on Optical Satellite Constellations [Text] / Gongqiang Li, Jing Liu, Hai Jiang, Chengzhi Liu // *Appl. Sci.* – 2023. – Vol. 13, iss. 7. – Article no. 4127. DOI: 10.3390/app13074127.

49. Лабуткіна, Т. В. До концепції складової супутникової системи спостереження орбітальних об'єктів на основі стабільних регулярних угруповань космічних апаратів [Текст] / Т. В. Лабуткіна & Р. В. Ананко // *Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference*. Stockholm, Sweden. – 2023. – P. 616–625. DOI: 10.46299/ISG.2023.1.5.

50. Лабуткіна, Т. В. Глобальне покриття навколоземного простору зонами використання пристроїв його спостереження: концепція і алгоритми [Текст] / Т. В. Лабуткіна & Р. В. Ананко // *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2023 : тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції, Дніпро, 22 березня 2023 р.* – С. 227–233. – Режим доступу: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/itmm/issue/view/125/101>. – 10.05.2023.

51. Исследование подходов к построению орбитальной вычислительной сети спутниковой системы интернета вещей [Text] / М. Е. Ильченко, Т. Н. Нарытник, В. И. Присяжний, С. В. Капитука,

С. А. Матвиенко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2019. – № 8 (160). – С. 138–151. DOI: 10.32620/akt.2019.8.21.

52. Низькоорбітальна супутникова система інтернету речей на базі розподіленого супутника [Text] / М. Ю. Ильченко, Т. М. Нарытник, В. І. Присяжний, С. В. Капитука, С. А. Матвиенко // *Космічна наука і технологія*. – 2020. – Т. 26, № 4 (125). – С. 57–85. DOI: 10.15407/knit2020.04.057.

53. Имитационная модель спутниковой сети коммутации пакетов с разновысокими орбитальными сегментами [Текст] / Т. В. Лабуткіна, В. А. Ларин, В. В. Беликов, А. В. Борщова, А. А. Тихонова, Д. И. Деревяшкин // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2016. – №1 (75). – С. 66–83. DOI: 10.32620/reaks.2016.1.09.

References

1. ESA'S annual space environment report. Prepared by ESA Space Debris Office. Date of Issue 12 June 2023. Available at: https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf. (accessed 15.06.2023).

2. Vyporkhanyuk, D. M., & Mamray, S. A. Osnovy kosmichnoyi sytuatsynoyi obiznanosti (Space Situational Awareness, SSA). Zahal'na navkolozemna kosmichna obstanovka stanom na 01.01.2023 r. [Basics of space situational awareness (Space Situational Awareness, SSA). The general near-Earth space situation as of January 1, 2023.]. *Informatsiyno-analitychnyy byuleten' – Informational and analytical bulletin*, 2023, no. 1/01-2023, Zhytomyr, Polis'kyy natsional'nyy universytet Publ., 2023. 36 p. Available at: https://space.polissiauniver.edu.ua/images/2023/SSA_ZAG_2023-01-01_.pdf. (accessed 10.06.2023).

3. *Technical Study Space Debris*. Prepared by Luke Shadbolton behalf of all HDI Global Specialty offices. HDI Global Specialty Study Space Debris 2023. 44 p. Available at: https://www.hdi.global/globalassets/_local/international/newsroom/hdi_global-specialty_study_space_debris_2023_corpv5.pdf. (accessed 10.06.2023).

4. *Our world in Data. Space Exploration and Satellites*. Available at: <https://ourworldindata.org/space-exploration-satellites/> (accessed 10.06.2023).

5. Vyporkhanyuk, D. M., & Kovbasyuk, S. V. Osnovy kosmichnoyi sytua-tsiynoyi obiznanosti (Space Situation Awareness, SSA). Inozemnyy i vitchyznyanyy dosvid kosmichnoyi diyal'nosti u sferi oborony [Fundamentals of space situational awareness (Space Situation Awareness, SSA). Foreign and domestic experience of space activities in the field of defense]. Zhytormyr, Vydavnytstvo O. O. Yevenyuk, 2018. 532 p. Available at: <https://space.polissiauniver.edu.ua/images/book/monohrafija2018.pdf>. (accessed 10.06.2023).

6. Wang, B., Li, S., Mu, J., Hao, X.-L., Zhu, W., & Hu, J. Research Advancements in Key Technologies for Space-Based Situational Awareness. *Space: Science &*

Technology, 2022, vol. 2022, article id 9802793. 31 p. DOI: 10.34133/2022/9802793.

7. Hall, D. T., & Baars, L. G. Satellite Collision and Fragmentation Probabilities Using Radar-Based Size and Mass Estimates. *Spacecraft and Rockets*, 2023, vol. 60, no. 4, pp. 1319-1332. DOI: 10.2514/1.A35697.

8. Pike, O. I.-D., Berthoud, L., & Agass, S. Modelling the Resilience of Space Infrastructure to Impacts from Orbital Debris. *73th International Astronautical Congress (IAC)*, IAC-22, A6.2,x73719, 18-22 September 2022, 2022, vol. 2022. Available at: https://www.researchgate.net/publication/371970279_Modelling_the_Resilience_of_Space_Infrastructure_to_Impacts_from_Orbital_Debris. (accessed 10.06.2023).

9. Epishev, V. P., Kudak, V. I., Motrunich, I. I., Perig, V. M., Neubauer, I. F., & Prysiazhnyi, V. I. Vyznachennya oriyentatsiyi shtuchnogo suputnyka Zemli u vypadku dyfuznogo rozsiyuvannya svitla yoho poverkhneyu [Determination of the orientation of the artificial earth satellite in the case of diffusive scattering of light by its surface]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiya – Space science and technology*, 2022, vol. 28, iss. 1 (134), pp. 61-69. DOI: 10.15407/knit2022.01.061.

10. Corbin, B. A., Abdurrezak, A., Newell, L. P., Roesler, G. M., & Lal, B. *Global Trends in On Orbit Servicing, Assembly and Manufacturing (OSAM)*. Science & Technology Policy Institute, March 2020. Available at: <https://www.ida.org/-/media/feature/publications/g/g/global-trends-in-on-orbit-servicing-assembly-and-manufacturing-osam/d-13161.ashx> (accessed 10.06.2023).

11. Vasylyev, V. V., Hodunok, L. Ya., & Matviyenko, S. A. Orbital'nyy servis – krok do podal'shoho osvoyennya navkolozemnoho kosmosu [Orbital service – a step towards further development of near-Earth space]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiya – Space science and technology*, 2021, vol. 27, iss. 3 (130), pp. 39-50. DOI: 10.15407/knit2021.03.

12. Coykendall, J., Hardin, K., Brady, A., & Hussain A. Riding the exponential growth in space. *Deloitte Insights*, 22 March 2023. Available at: <https://www2.deloitte.com/za/en/insights/industry/aerospace-defense/future-of-space-economy.html> (accessed 10.06.2023).

13. Alpatov, A. P., & Holdshtein, Yu. M. On the choice of an optimal on-orbit servicing route. *Technical mechanics*, 2019, no. 4, pp. 21-28. DOI: 10.15407/itm2019.04.021.

14. Dron', M., Golubek, A., Dubovik, L., Dreus, A., & Heti, K. Analysis of ballistic aspects in the combined method for removing space objects from the nearEarth orbits. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, vol. 2, iss. 5 (98), pp. 49–54. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.161778.

15. Dron', N. M., Korostyuk, K. V., Golubek, A. V., Dubovik, L. G., & Kulik, A. V. Otsenka vozmozhnostey primeneniya suborbital'nykh raket-nositeley dlya vyvedeniya sredstv uvoda ob'yektov kosmicheskogo musora s nizkikh okolozemnykh orbit [Estimation of feasibility sub-orbital launch vehicles for the ascent the

means for deorbiting the objects of space debris from low earth orbits]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologiya – Aerospace technic and technology*, 2020, no. 4 (164), pp. 60-65. DOI: 10.32620/aktt.2020.4.07.

16. Golubek, A. V., Dron', M. M., & Petrenko, O. M. Estimation of the possibility of using electric propulsion systems for large-sized orbital debris post-mission disposal. *Kosmichna nauka i tekhnolohiya – Space science and technology*, 2023, vol. 29, iss. 3 (142), pp. 34-46. DOI: 10.15407/knit2023.03.034.

17. Leonard, R., & Williams, I. D. Viability of a circular economy for space debris. *Waste Management*, 2023, vol. 155, pp. 19-28. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.10.024.

18. Alpatov, A. P., Goldshtein, Yu. M. Assessment of perspectives the orbital utilization of space debris. *Space Sci., & Technol.*, 2021, vol. 27, iss. 3, pp. 3-12. DOI: 10.15407/knit2021.03.003.

19. Lawrence, A., Rawls, M. L., Jah, M., Boley, A., Di Vruno, A., Garrington, S., Kramer, M., Lawler, S., Lowenthal, J., McDowell, J., & McCaughrean, M. The Case for Space Environment-talism. *Nature Astronomy*, 2022, vol. 6, pp. 428–435. DOI: 10.1038/s41550-022-01655-6.

20. Ananko, R. V., & Labutkina, T. V. Navkolozemnyy kosmos, kontrol'ovanny lyudstvom: systemist' pidkhodiv, hlobal'nist' rishen', systema-sposterihach na navkolozemnykh orbitakh [Human-controlled space around the Earth: systemic approaches, global solutions, an observer system in near-Earth orbits]. *Druha naukovo-praktychna Internet-konferentsiya «Kosmichni horyzonty», tretiy etap konferentsiyi - «Kosmos dlya lyudstva». Zbirnyk tez, NTSAOM - Second Scientific and Practical Internet Conference "Cosmic Horizons", the third stage of the conference - "Space for humanity". Collection of theses, NCAOM, Dnipro, 1-3 hrudnya, 2022, pp. 33-43. Available at: https://spacehorizons.org.ua/uploads/source/archiv_2022_3/tezu_3_2022.pdf. (accessed 10.06.2023).*

21. Bepalko, I. A., Grekov, L. D., Pekarev, D. V., & Fedorchuk, D. L. Kontseptsiya informatsiynoyi systemy dlya zabezpechennya monitorynhu kosmichnoho prostoru z metoyu pidvyshchennya voyennoyi bezpeky [The concept of an information system to provide the monitoring of space in order to increase military security]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiya – Space science and technology*, 2022, vol. 28, iss. 4 (137), pp. 3-17. DOI: 10.15407/knit2022.04.003.

22. Andreev, F. M., Bepalko, I. A., Vyporkhanyuk, D. M., & Kovbasyuk, S. V. Osnovni tendentsiyi svi-tovoyi kosmichnoyi diyal'nosti v interesakh natsional'noyi bezpeky ta oborony [Main trends of global space activity in the interests of national security and defense]. *Problemy stvorenniya, vyprobuvannya, zastosuvannya ta ekspluatatsiyi skladnykh informatsiynykh system : zbirnyk naukovykh prats'– Problems of creation, testing, application and exploitation of complex information systems: collection scientific work*, 2019, no. 16, pp. 5-14. DOI: 10.46972/2076-1546.2019.16.

23. Labutkina, T. V., & Khlaponina, A. V. Vseobshchaya global'naya kosmicheskaya systema nablyudeniya Zemly u kosmosa v aspekte myra y bezopasnosti zemlyan, aktsent na orbytal'noy sostavlyayushchey [The universal global space system of observing the Earth and space in the aspect of peace and safety of earthlings, emphasis on the orbital component]. *Naukovi chytannya «Dniprovs'ka orbita-2020»: Zbirnyk dopovidey – Scientific readings "Dniprovska orbit-2020": Collection of reports*, Dnipro, NTSAOM, 2020, pp. 120-130. Available at: https://dneporbita.org.ua/_files/doc/sbornik2020.pdf. (accessed 10.06.2023).
24. Labutkina, T. V. Intehrovana suputnykova systema ta informatsiyna systema v yiyi osnovi: osnovni polozhennya kontseptual'noho rishennya [The integrated satellite system and the information system at its core: the main provisions of the conceptual solution]. *International scientific conference "Features of innovative development in the field of technology: the comparative experience of Ukraine and the European Union"*: conference proceedings, August 5–6, 2022. Riga, Latvia: "Baltija Publishing", 2022, pp. 28-32. DOI 10.30525/978-9934-26-230-2-7.
25. Adachi, G., Ohnishi, T., & Kameyama, M. Achievement of Space Debris Observation. *FUJITSU Sci. Tech. J.*, 2017, vol. 53, iss. 3, pp. 45-51. Available at: <https://www.fujitsu.com/global/documents/about/resources/publications/fstj/archives/vol53-3/paper08.pdf>. (accessed 10.06.2023).
26. Bushuev, F. I., Kaliuzhnyi, M. P., Kriuchkovskiy, V. F., Kulichenko, M. O., Shulga, O. V., Zhang, Z., Bezrukovs, V., Malynovskiy, Ye. V., Reznichenko, O. M., Bryukhovetsky, O. B., & Tuccari, G. Observations of GEO and LEO Satellites: Radio Engineering Means of the Mykolaiv Astronomical Observatory. *Kosmichna nauka i tekhnolohiya – Space science and technology*, 2022, vol. 28, iss. 2 (135), pp. 48-53. DOI: 10.15407/knit2022.02.048.
27. Vovchuk, E. B., Bilinskiy, A. I., Martyniuk-Lototskiy, K. P., Virun, N. V., Pidstrygach, I. Ya., & Nogach, R. T. Optychni sposterezheniya shchuchnykh kosmichnykh ob'yektiv y L'vivskiy astronomichnyy observatoriyyi [Optical observations of artificial space objects y Lviv Astronomical Observatory]. *Kosmichna nauka i tekhnolohiya – Space science and technology*, 2022, vol. 28, iss. 2 (135), pp. 54-60. DOI: 10.15407/knit2022.02.054.
28. Reynolds, R. C., Talent, D. L., & Vilas, F. Observing orbital debris using space-based telescopes: 1. mission control considerations. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1989, vol. 101, iss. 645, pp. 1055-1060. DOI: 10.1086/132573.
29. Ackermann, M. R., Kiziah, C. R. R., Zimmer, P. C., McGraw, J. T., & Cox, D. D. A systematic examination of ground-based and space-based approaches to optical detection and tracking of satellites. *31st Space Symposium, Technical Track*, Colorado Springs, Colorado, United States of America Presented on April 14, 2015, pp. 1-46. Available at: https://www.spacesymposium.org/wp-content/uploads/2017/10/M.Ackermann_31st_Space_Symposium_Tech_Track_paper.pdf. (accessed 10.06.2023).
30. Golovich, N. On the Need for a Near-Earth Object Characterization Constellation in Low-Earth Orbit. *arXiv:2301.10348v2*, 26 Jan 2023, pp. 1-27. DOI: 10.48550/arXiv.2301.10348.
31. Li, Z., Wang, Y., & Zheg, W. Space-Based Optical Observation of Space Debris via Multipoint of View. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2020, vol. 2020, article id 8328405. 12 p. DOI: 10.1155/2020/8328405.
32. Labutkina, T. V., Skoroden, Ya. A., Borshcheva, A. V., & Tikhonova, A. A. Neiteratsionnyy metod planirovaniya nablyudeniya orbital'nykh ob'yektiv s kosmicheskogo apparata [A non-iterative method for planning the observation of orbital objects from a spacecraft]. *Systemne proektuvannya ta analiz kharakterystyk aerokosmichnoyi tekhniki – System design and analysis of the characteristics of aerospace technology*, 2016, vol. XXI, pp. 53-69. Available at: https://www.dnu.dp.ua/docs/zbirniki/ftf/program_5e333a2a7217e.pdf. (accessed 10.06.2023).
33. Yunpeng, H. U., Kebo, L. I., Yan'gang, L., & Lei, C. Review on strategies of space-based optical space situational awareness. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2021, vol. 32, iss. 5, pp. 1152-1166. DOI: 10.23919/JSEE.2021.000099.
34. Labutkina, T. V., Khlaponina, A. V. Kontseptsiya global'noy kosmicheskoy sistemy nablyudeniya orbital'nykh ob'yektiv, fokus na dinamicheskuyu sostavlyayushchuyu sistemy [The concept of a global space system for observing orbital objects, focusing on the dynamic component of the system]. *Perspectives of world science and education. Abstracts of the 7th International scientific and practical conference*. CPN Publishing Group. Osaka, Japan. 2020, pp. 411-420. Available at: <http://sci-conf.com.ua>. (accessed 10.06.2023).
35. Labutkina, T. V., Khlaponina, A. V., & Akinshev, O. R. Kontseptsiya systemy z nazemnyimi i orbital'nymi zasobami sposterezheniya orbital'nykh ob'yektiv: stratehiyi vykorystannya zasobiv [Concept of a system with ground and orbital means of observing orbital objects: strategies for using the means] *Multidisciplinary academic notes. Theory, methodology and practice. Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference*. Tokyo, Japan. 2022, pp. 1060-1069. Available at: <https://isg-konf.com/multidisciplinary-academic-notes-theory-methodology-and-practice/>. (accessed 10.06.2023).
36. Labutkina, T. V., & Akinshev, O. R. Odyn variant hrupy seansu kombinovanykh sposterezhen' orbital'nykh ob'yektiv ta bahatovariantnist' u hrupi. *XXI mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya «Naukovtsi ta metodyka vykorystannya suchasnykh tekhnolohiy» – XXI International Scientific and Practical Conference «Scientists and methods of using modern technologies»*. Melbourne, Australia. 2023, pp. 474-483. Available at: <https://isg-konf.com/scientists-and->

methods-of-using-modern-technologies/. (accessed 10.06.2023).

37. Labutkina, T. V., & Perepelitsa, M. O. Kontseptsiya klasteru kosmichnykh apparativ z adaptivnym do zminy zadach orbital'nykh uhrupovanniy yak skladova suputnykovoyi intersystemy [The concept of a cluster of space vehicles with an orbital grouping adaptive to changing tasks as a component of a satellite intersystem]. *Trends in science and practice of today. Proceedings of the XXIX International Scientific and Practical Conference*, Stockholm, Sweden. 2022, pp. 321-330. DOI: 10.46299/ISG.2022.1.29.

38. Lansard, E., Frayssinhes, E., & Palmade, J.-L. Global design of satellite constellations: a multi-criteria performance comparison of classical walker patterns and new design patterns. *Acta Astronautica*, 1998, vol. 42, iss. 9, pp. 555-564. DOI: 10.1016/S0094-5765(98)00043-5.

39. Walker, J. G. Satellite Constellations. *Journal of the British Interplanetary Society*, 1984, vol. 37, article no. 559. Available at: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1984JBIS...37..559W/abstract>. (accessed 10.06.2023).

40. Barinov, K. N., Burdaev, M. N., & Mamon, P. A. *Dinamika i printsipy postroyeniya orbital'nykh sistem kosmicheskikh apparatov* [Dynamics and principles of constructing spacecraft orbital systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 270 p.

41. Lang, T. J. A Parametric Examination of Satellite Constellations to Minimize Revisit Time for Low Earth Orbits Using a Genetic Algorithm. *AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference*, Quebec, Canada, 30 July–2 August 2001, vol. 109, pp. 625-640.

42. Huang, S., Colombo, C., & Bernelli-Zazzera, F. Multi-Criteria Design of Continuous Global Coverage Walker and Street-of-Coverage Constellations Through Property Assessment. *Acta Astronautica*, 2021, vol. 188, pp. 151-170. DOI: 10.1016/j.actaastro.2021.07.002.

43. Biria, A. D., & Marchand, B. Constellation Design for Space-Based Space Situational Awareness Applications: Analytical Approach. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2014, vol. 51, iss. 2. DOI: 10.2514/1.A32622.

44. Rider, L. Design of low to medium altitude surveillance systems providing continuous multiple above-the-horizon viewing. *Optical Engineering*, 1989, vol. 28, no. 1, article no. 280125, pp. 25-29. DOI: 10.1117/12.7976896.

45. Marchand, B. G., & Kobel, C. J. Above the horizon satellite coverage with dual-altitude band constraints. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2009, vol. 46, no. 4, pp. 845-857. DOI: 10.2514/1.37140.

46. Sun, Y., Wen, C., Zhu, Z., & Zhang, C. Dual-Altitude Band Coverage for Spaceborne Optical Sensor with Field-of-View Constraint. *ARC AIAA*, 2023, DOI: 10.2514/1.A35630.

47. Sun, Y., Wen, C., Zhu, Z., & Ye, Z. Above-the-Horizon Coverage for Satellite Constellations with Dual-

Altitude Band Constraints Using Ring-Based Discretization. *ARC AIAA*, 2022, Vol. 60, Iss. 1. DOI: 10.2514/1.A35333.

48. Li, G., Liu, J., Jiang, H., & Liu, C. Research on the Efficient Space Debris Observation Method Based on Optical Satellite Constellations. *Appl. Sci.*, 2023, vol. 13, iss. 7, article no. 4127. DOI: 10.3390/app13074127.

49. Labutkina, T. V., & Ananko, R. V. Do kontseptsii skladovoyi suputnykovoyi systemy sposterezheniya orbital'nykh ob'yektiv na osnovi stabil'nykh rehulyarnykh uhrupovan' kosmichnykh apparativ [To the concept of a component satellite system for observing orbital objects based on stable regular groups of spacecraft]. *Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference*. Stockholm, Sweden. 2023, pp. 616-625. DOI: 10.46299/ISG.2023.1.5

50. Labutkina, T. V., & Ananko, R. V. Hlobal'ne pokryttya navkolozemnoho prostoru zony vy-korystannya prystroyiv yoho sposterezheniya: kontseptsiya i alhorytmy [Global coverage of near-Earth space with zones of use of its observation devices: concept and algorithms]. *Information technologies in metallurgy and mechanical engineering. ITMM'2023: abstracts of reports of the international scientific and practical conference, Dnipro, March 22, 2023*, pp. 227-233. Available at: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/itmm/issue/view/125/101>. (accessed 10.05.2023).

51. Ilchenko, M. E., Narytnik, T. N., Jury, V. I., Kapshtyk, S. V., & Matvienko, S. A. Doslidzhennya pidkhodiv do pobudovy orbital'noyi obchyslyval'noyi merezhi suputnykovoyi systemy internetu rechey [Research of approaches to the development of the orbital computing network for the satellite system of internet of things]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2019, no. 8 (160), pp. 138-151. DOI: 10.32620/akt.2019.8.21.

52. Ilchenko, M. Yu., Narytnyk, T. M., Prysiazhnyi, V. I., Kapshtyk, S. V., & Matvienko, S. A. Nyz'koorbital'na suputnykova systema internetu rechey na bazi rozpodilenooho suputnyka [Low-Earth orbital Internet of Things satellite system on the basis of distributed satellite architecture]. *Kosm. nauka tekhnol. – Space Sci. & Technol.*, 2020, vol. 26, iss. 4(125), pp. 57-85. DOI: 10.15407/knit2020.04.057.

53. Labutkina, T. V., Larin, V. A., Belikov, V. V., Borshcheva, A. V., Tikhonova, A. A., & Derevyashkin, D. I. Imitatsionnaya model' sputnikovoy seti kommutatsii paketov s raznovysokimi orbital'nymi segmentami [A simulation model of a packet switching satellite network with different orbit heights segment]. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi – Radioelectronic and computer systems*, 2016, no. 1 (75), pp. 66-83. DOI: 10.32620/rebs.2016.1.09.

Надійшла до редакції 16.08.2022, розглянута на редколегії 20.09.2023

**"HORIZONTAL" OBSERVATIONS OF ORBITAL OBJECTS
BY ORBIT-BASED DEVICES: SATELLITE GROUPING OF TOTAL COVERAGE
OF A GIVEN ALTITUDE RANGE**

Tetiana Labutkina, Ruslan Ananko

Promising approaches to updating multi-faceted information about space vehicles and objects of space debris involve the addition of networks of ground-based surveillance tools using satellite systems for observing near-Earth space, built on several orbital groups (segments). The purpose of the research is to develop the task of building a satellite system that provides total coverage of a given area of heights above the Earth's surface by the application zones of orbital-based devices that carry out "horizontal observations" (the axis of symmetry of the instantaneous zone of possible application of the "horizontal" observation device lies in the plane of the instantaneous local horizon space vehicle-device carrier). Results: 1) two "symmetrical" methods of solving the problem of choosing the parameters of the grouping of one of the segments of the satellite observation system, which has a well-known, often used structure based on the "rings" of spacecraft in symmetrically spaced orbital planes, have been developed (the grouping should ensure total coverage of the spherical layer in the altitude area of near-Earth space in its environment with the given parameters of the instantaneous cone-shaped zone of application of the observation device; the "width" of the covered spherical layer is chosen as a part of the layer that would be covered using observation devices with the given characteristics with an infinite number of spacecraft based on them); 2) the proposed approach to the construction of a satellite system of "horizontal" observations on several orbital groups of different heights, quasi-optimal according to the criterion of minimizing the number of spacecraft; 3) calculated examples of the application of the developed methods are given, and several approximate estimates are made regarding the implementation of systems based on "horizontal" observations. Conclusions: satellite systems for observing orbital objects based on "vertical" (in the radial direction) observations can be supplemented with the implementation of "horizontal" observations.

Keywords: spacecraft; satellite system; orbital object; surveillance device; orbital basing; ballistic design.

Лабуткіна Тетяна Вікторівна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. кібербезпеки та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна.

Ананко Руслан Віталійович – асп. каф. кібербезпеки та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна.

Tetiana Labutkina – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Cyber Security and Computer-Integrated Technologies Department, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine,

e-mail: tvlabut@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3333-3296.

Ruslan Ananko – PhD Student at Cyber Security and Computer-Integrated Technologies Department, Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine,

e-mail: sa9in1@gmail.com, ORCID: 0009-0002-4201-8148.