

**ГЛОБАЛЬНЕ ПОКРИТТЯ НАВКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТОРУ  
ЗОНАМИ ВИКОРИСТАННЯ ПРИСТРОЇВ ЙОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ:  
КОНЦЕПЦІЯ І АЛГОРИТМИ**

*Анотація. Представлені результати дослідження в рамках задачі забезпечення повного покриття заданої області висот над поверхнею Землі (області простору між двома сферами зі спільним центром у центрі Землі) миттєвими зонами можливого застосування пристроїв спостереження орбітального базування, розташованими на космічних апаратах в різновисоких орбітальних угрупованнях на колових орбітах. У загальному випадку вирішення задачі передбачає використання декількох різновисоких орбітальних угруповань на колових квазіполярних орбітах, які в спрощеній постановці задачі прийняті полярними. Миттєва зона можливого застосування пристрою спостереження спрощено прийнята у вигляді конусу. Розглянуті випадки застосування пристроїв спостережень «вверх» (над площиною миттєвого місцевого горизонту космічного апарату, що є носієм пристрою спостереження) і спостережень «вниз» (під цією площиною). Запропонована концепція вирішення задачі, яка базується на виборі (на основі розвинення методів застосування відомих алгоритмів) такої структури кожного орбітального угруповання, яка забезпечить неперервне покриття частини заданого простору спостереження (області гарантованого спостереження), границі якої відсутні від розташування пристроїв спостереження, а після того – заповнення простору цими областями. Робота присвячена космічній тематиці, але, узагальнивши постановку задачі, варіюючи низку умов цієї постановки та змінюючи «масштаб» вхідних даних, можна прийти до різноманіття технічних задач, де будуть доцільні і прийнятні (частково або повністю) запропонована концепція та алгоритми, застосовані при її реалізації.*

*Ключові слова: неперервне покриття області простору зонами у вигляді конусів, зони застосування пристроїв спостереження, пристрої спостереження орбітального базування, супутникові системи спостереження орбітальних об'єктів, космічні апарати, різновисокі орбітальні угруповання.*

**Постановка проблеми.** Множина об'єктів на навколоземних орбітах стрімко зростає [1-3]. Поки ще не вирішена проблема космічного сміття, яке зараз складає основну частину цієї множини [1,2], а також відбувається стрибкоподібне збільшення кількості космічних апаратів (зараз, в основному, внаслідок створення угруповань багатосупутникових систем [3], а в подальшому –

завдяки розвитку орбітального сервісу і космічного виробництва [4]). Вимоги безпечного використання навколоземного космосу, прагнення знижувати всі види ризиків застосування космічної техніки та підвищувати ефективність космічних систем призводять до необхідності контролю множини орбітальних об'єктів в навколоземному просторі. Зокрема, є необхідним розвиток сучасних систем і технологій спостереження множини орбітальних об'єктів задля підтримання в актуальному стані різноманітної інформації про її проточний стан як динамічної механічної системи, а також про різні аспекти функціонування космічних апаратів [5-8]. При цьому має бути забезпечене «тотальне» спостереження, як з точки зору підвищення можливостей щодо реалізації спостережень об'єктів малого розміру, так і з точки зору наявності ресурсів спостереження у кількісному і якісному складі для повного неперервного «просторового охоплення» множини тих орбітальних об'єктів, які дозволяє спостерігати вибірково здатність пристроїв спостереження.

Ще не так давно задача оновлення інформації про множини орбітальних об'єктів розглядалася в основному для засобів наземних станцій спостереження. Але зараз стає все більш актуальним застосування (та в подальшому згадане використання з наземними засобами) супутникових систем відповідного призначення [9-13]. Дана робота присвячена одному з аспектів створення глобальної супутникової системи спостереження орбітальних об'єктів, зокрема – «остова» цієї системи, побудованого на різновисоких угрупованнях регулярної структури повного охоплення («огортання» Землі) [7,8,14]. Саме така система має в майбутньому забезпечуватиме, по-перше, повне системне покриття навколоземного простору зонами використання пристроїв спостереження відносно далекої дії застосування (дальність застосування може передбачати можливий діапазон від сотень метрів до десятків тисяч кілометрів) і, по-друге, в подальшому доповнюватися застосуванням невеликих орбітальних угруповань з динамічною, високо адаптивною до вирішення конкретних задач структурою, які наближаються до об'єктів і використовують пристрої спостереження невеликої дальності (в межах від сотень метрів до десятків кілометрів).

Завдання спостереження множини орбітальних об'єктів вирішується на основі синергетичного поєднання застосування різних типів пристроїв спостереження та принципів їх використання (будуть розвиватися далі оптичні і радіолокаційними засоби, видові спостереження та спостереження на основі чергових сеансів, тощо). В даній роботі тип пристрою спостереження не виділений, а взята до розгляду тільки та область простору, в якій на конкретну мить

пристрій спостереження орбітального базування (встановлений на космічному апараті) може бути застосований (миттєва зона його можливого застосування). В роботі розглянута проблема повного покриття заданої області висот над поверхнею Землі миттєвими зонами можливого застосування пристроїв спостереження орбітального базування при спрощеному представленні зони можливого застосування пристрою спостереження у вигляді конусу з вершиною в точці розташування пристрою спостереження (у конкретному випадку – в точці знаходження центру космічного апарату, який є носієм цього пристрою).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Названа вище проблема до недавнього часу не була затребувана саме в такий постановці, але можна назвати проблеми зі схожим формулюванням (саме на застосуванні підходів до їх вирішення базується підхід, представлений в даній роботі). Описана задача «перекликається» з задачею забезпечення безперервного глобального покриття поверхні Землі (що розглядається як сфера), зонами застосування пристроїв супутникової системи зв'язку або системи дистанційного зондування Землі.

На поточний час достатньо розвинута задача балістичного проектування (вибору параметрів орбітального угруповання) супутникової системи з метою забезпечення покриття заданої території обслуговування на поверхні Землі (зокрема – глобального або квазі глобального покриття поверхні Землі) зонами застосування пристроїв, встановлених на космічних апаратах цієї системи (в роботах [15-17] представлені базові, класичні підходи до вирішення питання побудови орбітального угруповання за для забезпечення неперервного покриття поверхні Землі із використанням мінімально можливої кількості космічних апаратів угруповання). При колових орбітах космічних апаратів спрощено і формалізовано названі задачі можна звести до розгляду двох концентричних сфер. Задача при цьому полягає до забезпечення покриття поверхні сфери меншого радіусу (поверхні Землі) із застосуванням пристроїв спостереження з конусовидними зонами можливого миттєвого застосування, вершини яких знаходяться на сфері більшого радіусу (на сфері, якій належать орбіти). «Класичні» алгоритми вирішення цієї задачі залежать від вибору одного з базових принципів побудови орбітального угруповання супутникової системи: 1) на основі «замкнених ланцюжків» («кілець») супутників, коли в кожній номінальній орбітальній площині розташовано декілька супутників [15,16]; 2) побудові угруповання як кінематично кінематично правильної структури [17]. На зараз, коли стає актуальною реалізація міжсупутникового зв'язку (і в системах з головною функцією передачі інформації, і в системах іншого призначення, які бу-

дуть застосовувати міжсупутникові комунікації) зростає актуальність побудови орбітальних угруповань на основі «кілець» супутників (у тому числі це буде актуальним і для систем, що реалізують спостереження). Тому знов представляє інтерес розвиток алгоритмів першої групи. Описана задача покриття сфери заданого радіусу розвивається для випадку використання декількох різновисоких угруповань на колових орбітах при збереженні тієї ж мети – забезпечити покриття поверхні сфери зонами обслуговування, що створюють пристрої, встановлені на космічних апаратах цієї системи.

В даній роботі постановка задач змінюється, ускладнюється. Формулюючи узагальнено, відмінність поставленої задачі в тому, що обирають параметри орбітального угруповання, космічні апарати якого є носіями пристроїв спостереження орбітальних об'єктів, і має бути забезпечено не покриття поверхні сфери зонами застосування цих пристроїв, а покриття простору між двома концентричними сферами (інакше, в більш «вузькій» постановці, – покриття простору в заданій області висот над поверхнею Землі). Але задача неперервного покриття сфери заданого радіусу увійде до запропонованого в даній роботі методу забезпечення покриття простору між двома сферами, стане елементарною часткою повного алгоритму розрахунків щодо вирішення задачі покриття простору миттєвими зонами застосування пристроїв спостереження. У загальному випадку вирішення задачі буде потребувати застосування космічних апаратів на різновисоких орбітальних угрупованнях.

В сучасній літературі вже з'являються дослідження задачі забезпечення покриття простору пристроями цільової апаратури космічних апаратів, розташованих в різновисоких орбітальних угрупованнях. Наприклад, ставиться задача мінімізації структури орбітального угруповання при забезпеченні неперервного покриття із заданою кратністю сферичних шарів в навколоземному просторі зонами застосування пристроїв цільової апаратури, розташованої в різновисоких орбітальних угрупованнях, та пропонується алгоритм комп'ютерного підбору параметрів такої структури при їх варіюванні.

В даній своїй роботі не ставимо задачі мінімізації кількості космічних апаратів орбітального угруповання та забезпечення покриття навколоземного простору в заданій області висот над поверхнею Землі миттєвими зонами застосування пристроїв спостереження з кратністю більшою за одиницю. Але тут визначена базова концепція побудови супутникової системи спостереження орбітальних об'єктів на основі заповнення простору в заданій області висот «полосами» неперервного обзору (більш малими за розміром зонами висот), коли

кожна полоса неперервного обзору забезпечується своїм орбітальним угруповання космічних апаратів. При цьому незалежно розглянуто забезпечення «висотних полос» спостереження як у випадку, коли пристрої спостереження орбітального базування ведуть спостереження «вниз» (спостерігають об'єкти на більш низьких орбітах), так і для випадку, коли такі пристрої застосовуються для спостереження «вверх» (спостерігають орбітальні об'єкти, що знаходяться на більш високих орбітах). Запропонована концепція системи передбачає адитивне застосування обох видів пристроїв спостереження. Запропоновано алгоритм, який надає можливість вибору параметрів описаної системи, що відповідає поставленим умовам.

Проблема покриття заданої області висот множиною пристроїв орбітального базування в схожому до представленого в даній роботі формулюванні вже розглядалася в роботі [14], де були запропоновані два підходи до її вирішення. У запропонованих матеріалах досліджень постановка задачі і стратегія її розв'язку змінюються, більш націлені на вирішення проблеми глобального покриття простору в заданій області висот над поверхнею Землі зонами миттєвого застосування пристроїв спостереження суто в «геометричному» формулюванні.

**Мета дослідження.** Розвиток основ побудови супутникових систем глобального спостереження заданої області висот в навколосемному просторі. Зокрема – розробка принципів побудови та вибору параметрів орбітального угруповання космічних апаратів (носіїв пристроїв спостереження) на колових орбітах, яке забезпечить постійне, неперервне покриття заданої області висот над поверхнею Землі прийнятими конусовидними зонами миттєвого застосування пристроїв спостереження орбітальних об'єктів.

#### **Викладення основного матеріалу.**

**1. Постановка задачі.** Розглядається супутникова система спостереження орбітальних об'єктів. Пристрої спостереження встановлені на космічних апаратах. Для космічного апарату підтримується кутова орієнтація відносно осей зв'язаної з його центром мас барицентричної орбітальної системи координат. Як зазначалося вище, за розташуванням зони можливого застосування пристрою спостереження виділено два типи пристроїв (рис. 1а). Пристрої першого типу ведуть «спостереження вверх» – над площиною миттєвого місцевого горизонту (над площиною, перпендикулярною до радіус-вектору космічного апарату), а пристрої другого типу здійснюють «спостереження вниз» – під цією площиною.

Зони застосування пристрою спостереження, що належить одному з названих типів, максимально спрощено представлена конусом, розміри і розташування якого у просторі задають такі умови (рис. 1а): 1) вершина конусу знаходиться в точці положення центру мас космічного апарату; 2) вісь симетрії конусу співпадає з прямою, якій належить радіус-вектор точки розташування космічного апарату (інакше – з прямою, перпендикулярною до площини миттєвого місцевого горизонту; 3) значення кута  $\beta$  між напрямком з точки розташування космічного апарату на точку положення центру мас об'єкту спостереження і напрямком уздовж вісі симетрії конусу від вершини до основи (для пристроїв спостереження першого типу – уздовж радіус-вектору космічного апарату, що є носієм пристрою; для пристроїв спостереження другого типу – проти напрямку радіус-вектору) не має перевищувати задане значення  $\beta_m - \beta \leq \beta_m$ ; 4) довжина відрізка поверхні конусу, що поєднує його вершину і основу, має значення  $L_m$  (так спрощено врахована умова, що дальність  $L$  від пристрою спостереження до об'єкту спостереження має не перевищувати це значення –  $L \leq L_m$ ).

Орбітальне угруповання супутникової системи спостереження побудовано за таким принципом (рис. 1б): 1) є  $k$  різновисоких угруповань на колових орбітах ( $k$  різновисоких сегментів), на рис. 1б такі угруповання показані повністю, або фрагментарно; 2) вся система побудована на квазіполярних орбітах, але при проектуванні системи будемо вважати, що орбіти полярні; 3) орбіти колові, висота орбіт всіх космічних апаратів  $k$ -го сегменту –  $h_k$ ; 4) в  $k$ -му сегменті угруповання  $M_k$  номінальних орбітальних площин; 5) в кожній  $m$ -й орбітальній площині  $k$ -го сегменту  $N_{km}$  космічних апаратів (для всіх них одне й теж саме значення довготи висхідного вузла  $\Omega_{km}$ ), тобто в кожній орбітальній площині представлене «кільце» космічних апаратів; 6) орбітальні площини симетрично рознесені за значенням довготи висхідного вузла.

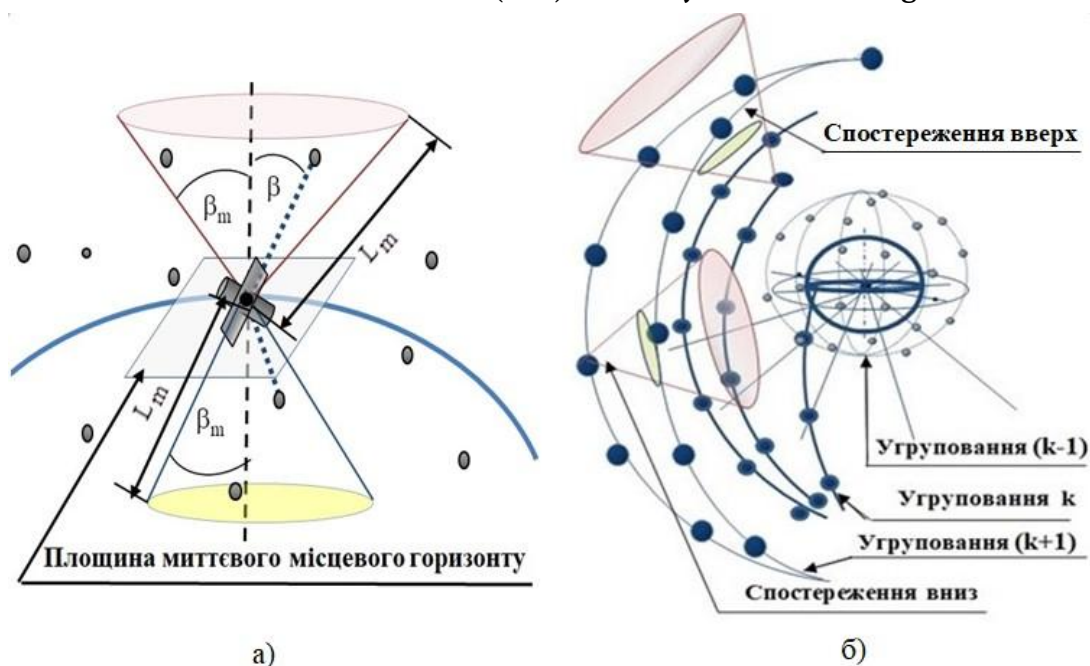


Рисунок 1 – До принципу побудови системи спостереження:  
 область миттєвого покриття простору зонами можливого застосування  
 пристроїв спостереження з космічного апарату (а);  
 фрагменти орбітальних угруповань (б)

Необхідно обрати параметри всього орбітального угруповання, щоб забезпечити кожній миті безперервне покрити зонами спостереження всього простору в заданій області висот над поверхнею Землі (висота  $h$  для кожної точки, що належить до області спостереження, знаходиться в діапазоні між заданими значеннями  $h_{\min}$  і  $h_{\max}$ , тобто  $h \in [h_{\min}, h_{\max}]$ ). В даній постановці задачі прийнято, що значення параметру  $L_m$  також задане і однакове для всіх пристроїв спостереження. Значення кута  $\beta_m$  має бути однаковим для всіх пристроїв спостереження  $k$ -го сегменту супутникової системи (позначається  $\beta_{mk}$ ) і в ході реалізації алгоритму обирається на основі умов реалізації спостережень і технічних можливостей апаратної реалізації.

В даній роботі не ставиться завдання оптимізації за якимось критерієм рішення щодо вибору параметрів орбітального угруповання. Завдання більш просте – обрати одну з можливих структур угруповання, яка відповідає поставленим умовам та запропонувати для цього один з можливих розрахункових алгоритмів, який зв'яже вхідні і вихідні данні (на деяких елементарних етапах реалізації алгоритму застосовується підхід, який спрямований на зменшення кількості космічних апаратів в системі спостереження). Запропонований алго-

ритм може бути покладеним в основу ітераційного процесу пошуку квазіоптимальних рішень, або розвинутий до формулювання та розв'язку оптимізаційної задачі із застосуванням аналітичних залежностей.

**2.°Стратегія вирішення задачі.** Розглянемо як незалежні задачі покриття простору зонами застосування пристроїв, що здійснюють «спостереження вниз», та тих, що здійснюють «спостереження вверх» (не будемо враховувати, що пристрої обох типів раціонально встановлювати на одному з космічних апаратів описаної системи, і це буде давати свій відбиток на пошуку комплексного рішення). Нехай, як зазначалося, неперервне покриття області висот  $h \in [h_{\min}, h_{\max}]$ , що спостерігається, забезпечують зони миттєвого застосування пристроїв «спостереження вниз», встановлених на космічних апаратах  $K$  орбітальних угруповань на колових, прийнятих полярними орбітах. Кожне  $k$ -те угруповання ( $k = \overline{1, K}$ ) забезпечує неперервне покриття «полоси висот» між значеннями  $h_{\min k}$  і  $h_{\max k}$  ( $h \in [h_{\min k}, h_{\max k}]$ ), рис. 2а. Прийmemo, що ці «полоси висот» не перетинаються. Розташування  $K$  описаних «полос висот» «встик» (точніше – відповідних частин («шарів») простору між концентричними сферами з центром в центрі Землі і радіусами, які дорівнюють  $r_{\min k} = R_E + h_{\min k}$  і  $r_{\max k} = R_E + h_{\max k}$ , де  $R_E$  – радіус Землі) забезпечить неперервне покриття зонами застосування пристроїв спостереження області висот  $h \in [h_{\min}, h_{\max}]$  (області між концентричними сферами, центр яких співпадає з центром Землі, а радіуси дорівнюють  $r_{\min} = R_E + h_{\min}$  і  $r_{\max} = R_E + h_{\max}$ ).

За описаним нижче підходом до вирішення задачі «Полоса висот» гарантованого повного покриття простору буде «відсунута» від висоти, де розташовані космічні апарати, що є носіями пристроїв спостереження. На рис. 2.б для випадку «спостережень вниз» схематично показано розташування декількох космічних апаратів на одній з орбіт  $k$ -го орбітального угруповання та полоса висот, для покриття якої будуть застосовані пристрої, встановлені на космічних апаратах угруповання. Аналогічне схематичне представлення приведено на рис. 2б для випадку реалізації «спостережень вверх». На рис. 2а показаний випадок неперервного заповнення заданої області висот «полосами» висот застосування пристроїв «спостереження вниз», і для  $k$ -го сегменту системи зображено розташування космічних апаратів на одній з орбіт цього сегменту (ко-

смичні апарати  $k$ -го сегменту знаходяться в полосі висот більш високого сегменту спостереження, в даному випадку –  $(k + 1)$ -го сегменту).

При такому підході задача забезпечення покриття заданої області висот  $[h_{\min}, h_{\max}]$  розкладається на  $k$  незалежні задач (елементарних задач) вибору структур орбітальних угруповань, кожної  $k$ -е з яких забезпечить повне неперервне покриття своєї полоси висот  $[h_{\min k}, h_{\max k}]$ .

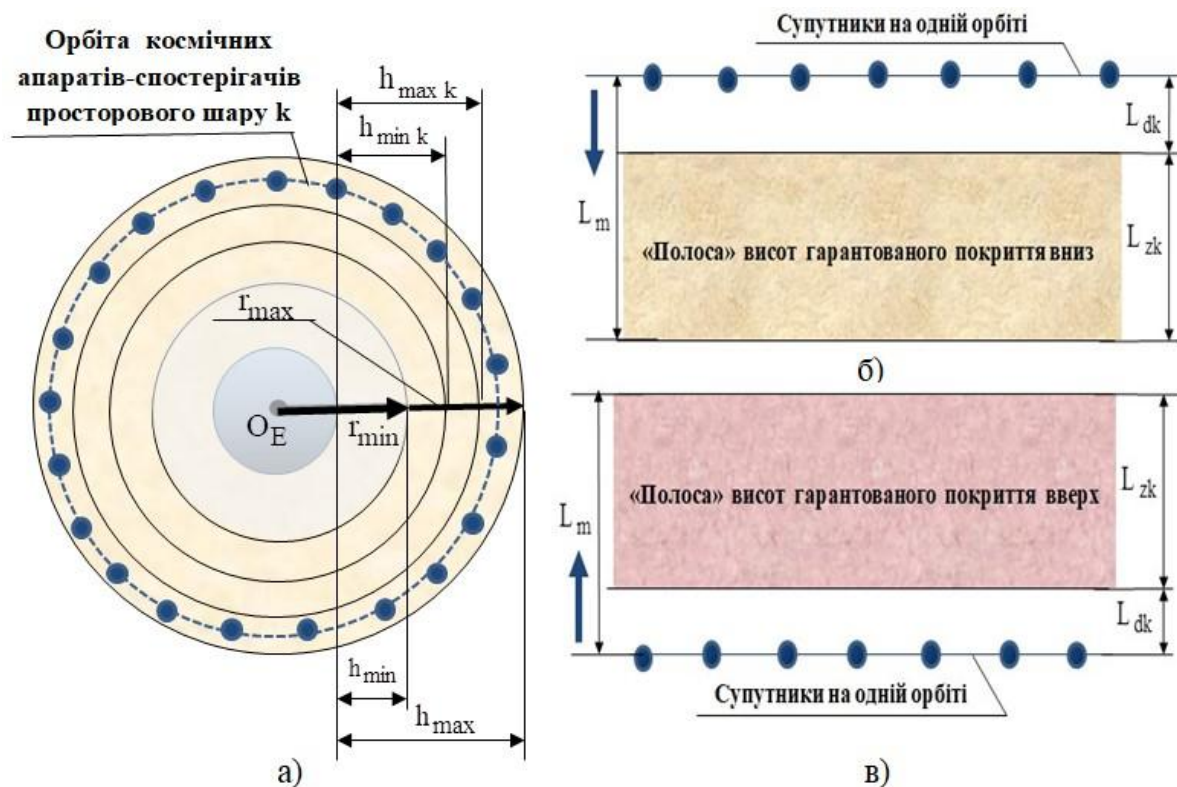


Рисунок 2 – До принципу неперервного заповнення області висот спостереження: покриття області висот «шарами» неперервного спостереження вниз (заповнення «полосами» висот) (а); «полоса» висот неперервного спостереження вниз (б); «полоса» висот неперервного спостереження вверх (в)

Аналогічний підхід реалізується при незалежному вирішенні задачі із застосуванням пристроїв «спостереження вверх», встановлених на космічних апаратах  $k$  угруповань на колових орбітах.

**3. Елементарна складова задачі.** Під елементарною складовою задачі будемо розуміти визначення параметрів  $k$ -го сегменту супутникової системи, побудованої на колових полярних орбітах, що містить  $m_k$  орбітальних площин, в кожній з яких знаходяться  $n_{km}$  космічних апаратів – носіїв пристроїв спосте-

реження, симетрично рознесених у орбітальній площині («уздовж номінальної орбіти»). Обираються такі параметри:: 1) висота орбіти  $h_k$ , на якій розташовано орбітальне угруповання; 2) параметри  $m_k$  і  $n_{km}$ , що визначають кількість  $N_k$  космічних апаратів в  $k$ -му сегменті системи ( $N_k = m_k \cdot n_k$ ) та їх розташування в орбітальних площинах.

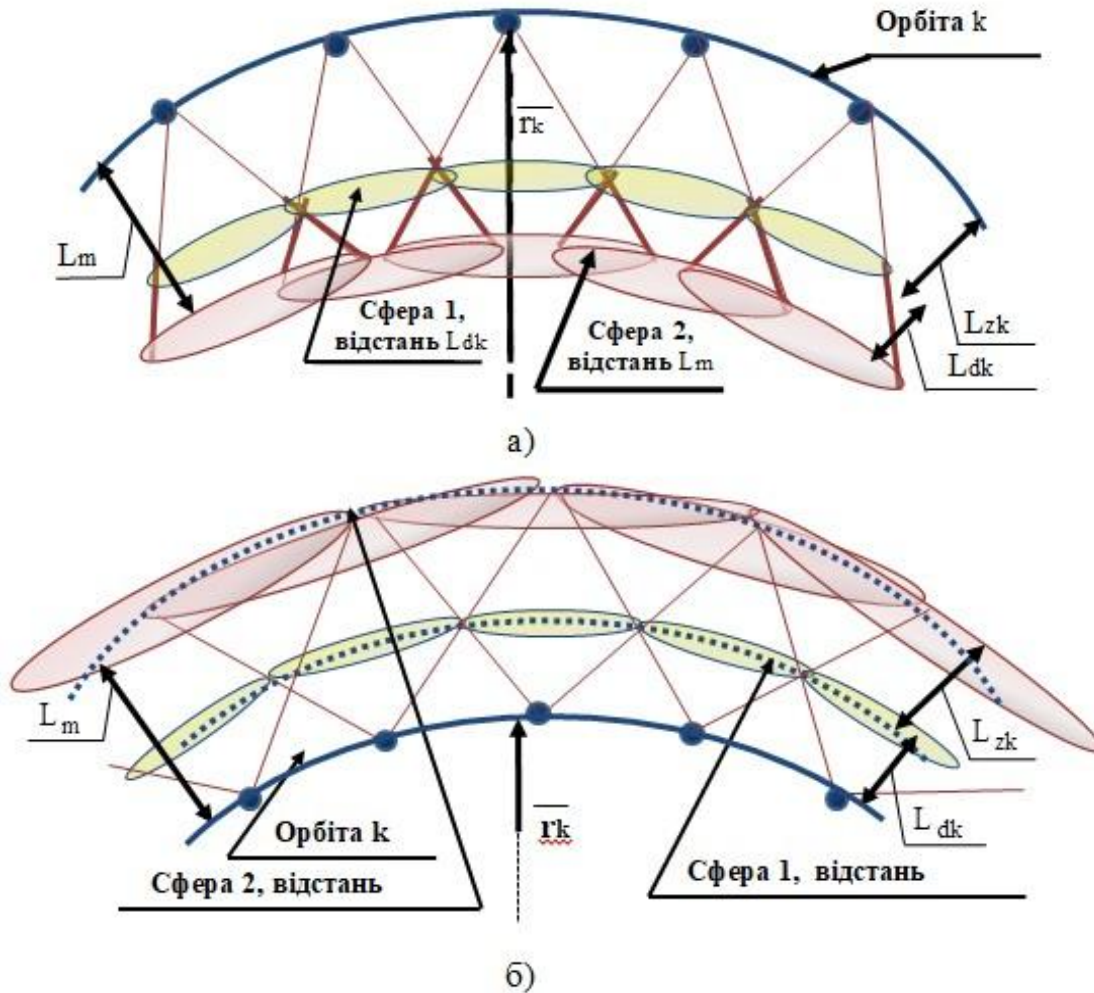


Рисунок 3 – Фрагмент створення частини полоси неперервного спостереження пристроями на одній орбіті: при «спостереженні вниз» (а); при «спостереженні верх» (б)

Розпочнемо з представлення елементарної задачі для випадку, коли застосовуються пристрої «спостереження вниз». Спочатку розглянемо «ланцюжок» супутників в одній орбітальній площині (рис. 2б, рис. 3а). Позначимо радіус орбіт космічних апаратів, що належать угрупованню  $k$ -го сегменту системи, –  $r_k$ . Тоді за дальністю область максимальної досяжності дії пристроїв «спостереження вниз» – це область між сферами радіусів  $r_k$  і  $r_{mk} = r_k - L_m$ .

Оберемо ще одну сферу з радіусом  $r_{dk} = r_k - L_d$ , де  $L_d < L_m$  (тобто сфера з радіусом  $r_{kd}$  ближча до орбітального угруповання, що несе пристрої спостереження, розташована між сферами з радіусами  $r_{km}$  і  $r_k$ ). При вирішенні задачі вважатиме, що пристроями спостереження, встановленими на космічних апаратах  $k$ -го угруповання системи, має бути забезпечено гарантоване безперервне покриття області простору між сферами з радіусами  $r_{mk}$  і  $r_{dk}$  (тобто поло- си висот між значеннями  $h_{\min k} = r_k - L_d - R_E$  і  $h_{\max k} = r_k - L_m - R_E$  ши- риною  $L_z = L_m - L_d$ ).

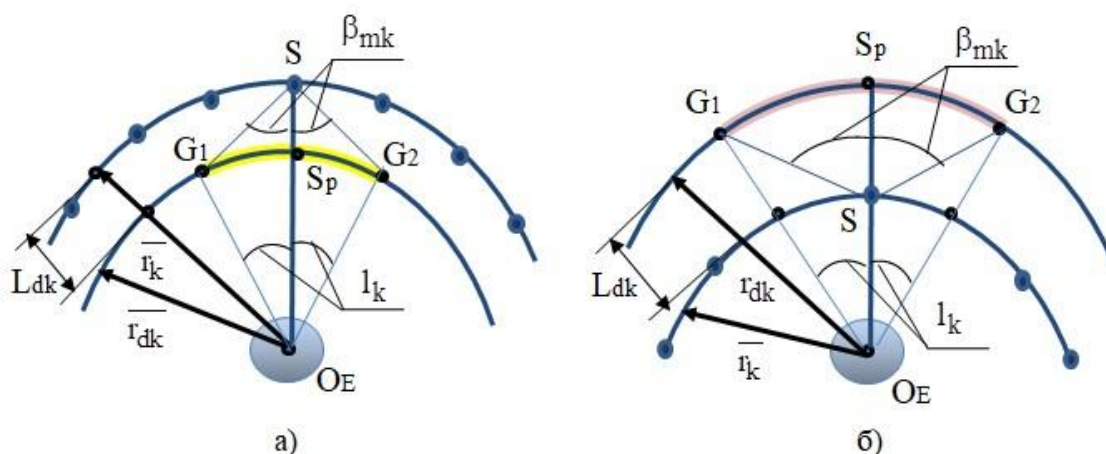


Рисунок 4 – До розрахунку зони покриття пристрою спостереження на визначальній сфері: при «спостереженні вниз» (а); при «спостереженні вверх» (б)

Повне покриття області між сферами з радіусами  $r_{mk}$  і  $r_{dk}$  миттєвими зо- нами можливого застосування пристроїв спостереження буде досягнуте, якщо для кожного моменту часу буде забезпечено повне покриття поверхні сфери радіусу  $r_{dk}$ . Задача неперервного покриття поверхні сфери з радіусом  $r_{dk}$  пов- ністю ідентична задачі повного покриття поверхні Землі (яка розглядається як сфера), зонами можливого застосування відповідних пристроїв супутникової системи зв'язку або дистанційного зондування. На рис. 4а представлена відпо- відна картина у площині одної з орбіт  $k$ -го угруповання системи. Аналогічно задачам покриття поверхні Землі для кожного космічного апарату (на рис. 4а позначення точки його розташування –  $S$ ) можна побачити під супутникову точку  $S_p$ , дугу на поверхні сфери  $r_{kd}$  з кутовою величиною  $2\alpha_k$ , що визначає розмір миттєвої зони покриття на сфері пристроєм, встановленим на відпові- дному космічному апараті).

Визначимо величину дуги  $l_k$  аналогічно тому, як це значення знаходиться при визначенні умов прямої видимості космічного апарату з наземної станції (умова появи космічного апарату над площиною місцевого горизонту наземної станції), тільки при цьому застосовуються не радіус Землі і радіус орбіти космічного апарату, а, відповідно, радіус  $r_{dk}$  сфери, що покривається зонами спостереження, та радіус  $r_k$  сфери розташування космічних апаратів. Виходячи з цього

$$l_k = \arccos\left(\frac{r_{dk}}{r_k}\right). \quad (1)$$

Вважається також, що значення  $\beta_k$  може бути реалізованим при визначенні його з тієї ж умови із застосуванням відповідного до цього рівняння.

Далі задача зводиться до покриття поверхні сфери радіусу  $r_{dk}$  зонами, що визначені дугами  $2l_k$ . Для цього обраний метод, запропонований у джерелі [15] для випадку полярних орбіт. Згідно з базовими положеннями методу, представленого в роботі [15], обирається кількість орбітальних площин  $m_k$  і однакова кількість  $n_{mk}$  космічних апаратів в кожній з цих орбітальних площин (пояснення дані на рис. 5а і 5б). При цьому кількість космічних апаратів  $n_{mk}$  має забезпечити полосу неперервного огляду, ширину якої на сфері радіусу  $r_{dk}$  визначає дуга  $2b_k$  ( $b_k < l_k$ ). Дуга  $b_k$  показана на рис. 5а знизу окружності для випадку, коли підсупутникова точка знаходиться на окружності, а дуга  $l_k$  на тій же окружності, – зверху, також для випадку, коли підсупутникова точка знаходиться на окружності. Величина дуги  $b_k$  прямо пропорційна «ступеню перетинання» суміжних підсупутникових зон на одній орбіті (рис. 5а, рис. 5б). Інакше,  $b_k$  тим більша, чим менша величина дуги  $a_k$  на сфері радіусу  $r_{dk}$ , яка є половиною кутової відстані між підсупутниковими точками суміжних супутників на одній орбіті (на рис. 5б і рис. 6 це дуга між точками  $S_{pj}$  і  $K_1$ ). Величина дуги  $a_k$  пов'язана з кількістю  $N_{mk}$  космічних апаратів на орбіті співвідношенням [15]

$$N_{km} = \left\lceil \frac{\pi}{a} \right\rceil + 1, \quad (2)$$

тут  $\lceil \cdot \rceil$  в формулах означає цілу частину числа. Повне покриття поверхні сфери полосами неперервного огляду з шириною  $b_k$  забезпечить кількість орбітальних площин (відповідно – кількість полос), що визначена рівнянням [15]

$$M_k = \left[ \frac{\pi}{2b_k} \right] + 1 \quad (3)$$

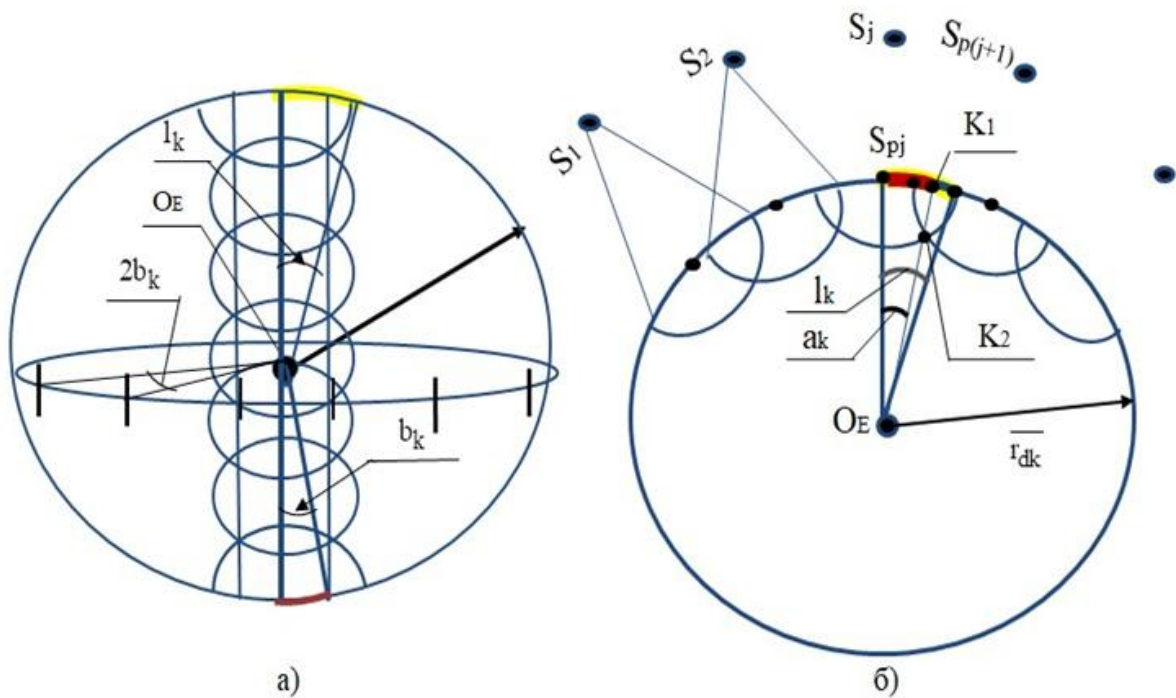


Рисунок 5 – До визначення кількості орбітальних площин і кількості супутників у площинах за джерелом (зроблено на основі рисунків джерела [15]): глобальне покриття полосами неперервного обзору (а); розташування космічних апаратів у орбітальній площині (б)

Величина дуг  $a_k$  і  $b_k$  також зв'язані між собою. Цей зв'язок можна виразити формулою, вирішуючи задачу сферичної тригонометрії при розгляді сферичного прямокутного трикутника  $S_{p(j+1)}K_3K_2$  на рис. 6 (на якому випадок розташування на екваторі підсупутникової точки  $S_{p(j+1)}$ ). Величина дуги  $K_3K_2$  дорівнює величності дуги  $S_{p(j+1)}K_1$  (дуга  $S_{p(j+1)}K_1$  також показана на рис. 5б) і має кутову величину  $a_k$ . Дуга  $S_{p(j+1)}K_3$  дорівнює значенню  $b_k$  половини ширини полоси неперервного огляду (є частиною дуги  $S_{p(j+1)}K_4$ , що має величину  $l_k$ ). З трикутника  $S_{p(j+1)}K_3K_2$  маємо

$$a_k = \arccos \left( \frac{\cos l_k}{\cos b_k} \right). \quad (4)$$

Запишемо величину дуги  $b_k$ , як частину дуги  $l_k$  при заданому коефіцієнті пропорційності  $k_{bk}$ , що зв'яже ці величини

$$b_k = k_{bk} l_k. \quad (5)$$

З врахуванням виразів (4) і (5) рівняння (2) і (3) будуть записані так:

$$M_k = \left[ \frac{\pi}{2k_{bk} l_k} \right] + 1, \quad (6)$$

$$N_{km} = \left[ \frac{\pi}{\arccos \left( \frac{\cos l_k}{\cos(k_{bk} l_k)} \right)} \right] + 1. \quad (7)$$

Варіюючи значення коефіцієнту  $k_{bk}$  з прийнятим кроком в межах інтервалу  $]0, 1[$ , можна обрати значення кількості орбітальних площин  $M_k$  і кількості  $N_{km}$  космічних апаратів у кожній площині, які забезпечать при даній постановці задачі мінімальне значення  $N_k$  ( $N_k = M_k N_{km}$ ) космічних апаратів в угрупованні  $k$ -го сегменту системи (показано у прикладі далі).

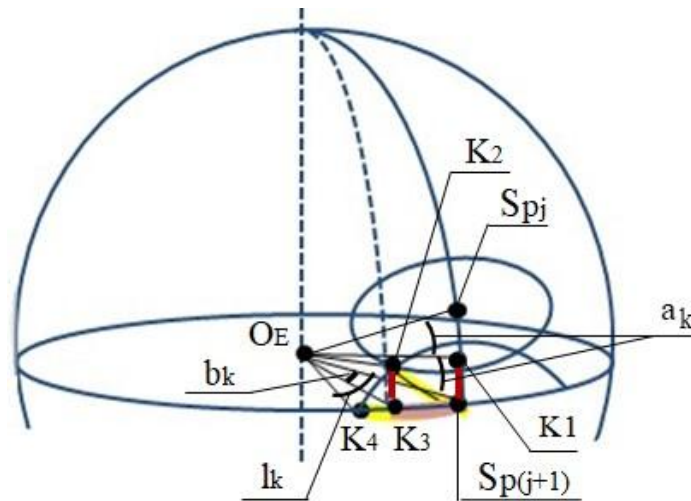


Рисунок 6 – До вирішення задачі сферичної тригонометрії задля знаходження зв'язку між дугами  $a_k$  і  $b_k$  (на основі рисунку джерела [15])

Далі розглянемо елементарну задачу для випадку коли пристрої орбітального угруповання ведуть «спостереження вверх» (рис. 2в, рис. 3б). За аналогією з попереднім випадком, коли ведеться спостереження вниз, позначимо радіус сфери, на який розташовані орбіти космічних апаратів-спостерігачів  $k$ -го орбітального угруповання, –  $r_k$ . Радіус сфери, що визначає границю дальності, на яку можуть здійснюватися спостереження, –  $r_{mk} = r_k + L_m$ . Радіус сфери, що визначає ту границю, від якої буде враховано покриття простору пристроями спостереження  $k$ -го сегменту системи, –  $r_{dk} = r_k + L_d$ . Тобто спостерігатися

буде полоса висот шириною  $L_z$  між концентричними сферами радіусів  $r_{dk}$  і  $r_m$ . Знов реалізується покриття сфери, ближчої до висоти орбіт розташування космічних апаратів, що несуть пристрої спостереження. Тут проекція точки розташування супутника  $S$  на поверхню сфери з радіусом  $r_{dk}$  – також  $S_p$ . Величина дуги  $l_k$  визначається при заданому значенні  $\beta_{mk}$  ( $\beta_{mk} > l_k$ ) на основі рівняння

$$l_k = \beta_{mk} - \arcsin\left(\frac{r_k}{r_{dk}} \sin \beta_{mk}\right). \quad (8)$$

Після визначення величини дуги  $l_k$  алгоритм подальшого рішення задачі вибору кількості орбітальних площин  $N_{km}$  і кількості космічних апаратів в кожній орбітальній площині  $M_k$  співпадає з описаною вище задачею реалізації спостережень вверх.

**4.°Приклади розрахунків.** За даним підходом наведено два приклади розрахунків. В табл. 1 представлений вибір структури системи, побудованої на трьох орбітальних угрупованнях, яка призначена для спостереження вниз і повністю покриває зонами застосування пристроїв спостереження область висот над поверхнею Землі в діапазоні від 400 км до 1000 км при заданому значенні границі максимальної дальності спостереження  $L_m = 300$  км. Для кожного  $k$ -го сегменту системи прийнято значення  $L_{dk} = 100$ .

Таблиця 1

Приклад орбітального угруповання космічних апаратів, що реалізують спостереження вниз при значенні  $L_m = 300$  км

Номер сегменту $k$	Кількість КА	Кількість орбітальних площин	Кількість КА у площині	Висота угруповання	Полоса покриття	
					$h_{\min k}$	$h_{\max k}$
3	378	14	27	1100	800	1000
2	364	14	26	900	600	800
1	357	13	27	700	400	600

Приклад вибору значення коефіцієнту  $k_{b3}$ , представлений для третього сегменту обраного в прикладі орбітального угруповання системи, що реалізує «спостереження вниз», представлено на рис. 7 (при варіюванні значення  $k_{b3}$  обрано значення  $k_{b3} = 0,69$ , яке забезпечує найменше значення  $N_3(k_{b3}) = 378$  кількості космічних апаратів в угрупованні).

В табл. 2 представлений вибір структури системи, побудованої на трьох орбітальних угрупованнях, яка веде спостереження вверх і повністю покриває зонами застосування пристроїв спостереження область висот над поверхнею Землі в діапазоні від 500 км до 1100 км при заданому значенні границі максимальної дальності спостереження  $L_m = 400$  км. Для кожного  $k$ -го сегменту системи прийнято значення  $L_{dk} = 200$ .

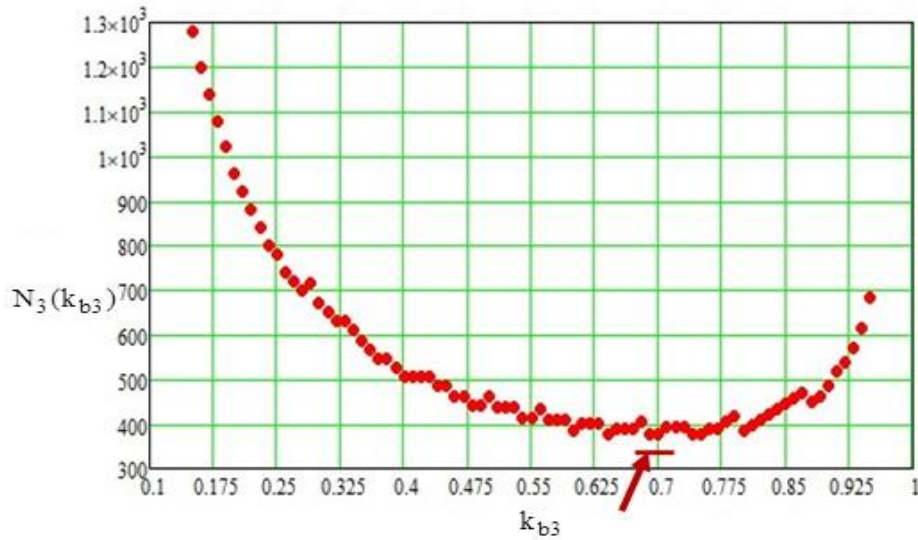


Рисунок 7 – До вибору значення коефіцієнту  $k_{bk}$  – вибір значення коефіцієнта  $k_{b3}$  сегменту 3 ( $k = 3$ ) у представленому прикладі побудови угруповання спостереження вниз

Таблиця 2

Приклад орбітального угруповання космічних апаратів, що реалізують спостереження вверх при значенні  $L_m = 400$  км

Номер сегменту $k$	Кількість КА	Кількість орбітальних площин	Кількість КА у площині	Висота угруповання	Полоса покриття	
					$h_{\min k}$	$h_{\max k}$
3	242	11	21	700	900	1100
2	240	12	20	500	700	900
1	231	11	22	300	500	700

**Висновки.** Основним результатом даної роботи є представлення простого алгоритму, який може бути покладений в основу ітераційного алгоритму пошуку квазіоптимального рішення задачі при варіюванні даних, що обираються в процесі рішення (а також при варіюванні вхідних даних). В описаній постановці головним чином обираються значення відстані ( $L_{kd}$ ) для кожного  $k$ -го

угруповання системи спостереження, на яку «полоса висот» гарантованого покриття простору миттєвими зонами застосування пристроїв спостереження цього угруповання відсунута від висоти, на якій знаходиться угруповання. Значення відстаней  $L_{kd}$  і  $L_m$  визначають ширину полоси висот зони гарантованого використання пристроїв спостереження, кількість цих полос та їх розташування. Вибір значення  $L_{kd}$  може бути заснованим тільки на врахуванні заданої мінімальної дальності, яка має бути між об'єктом спостереження та космічним апаратом, що є носієм пристрою спостереження. А в основному її вибір продиктований прагненням «відсунути» ближчу границю зони спостереження задля зменшення кількості космічних апаратів угруповання, які реалізують спостереження (перевага від цього більше явна при реалізації «спостережень вверх»). Але на альтернативу цьому є і прагнення наблизити до пристроїв спостереження границі області, яка гарантовано спостерігається, задля підвищення якості спостережень. При цьому слід відзначити, що пристрої спостереження можуть бути застосовані і до границі, з якої при проектуванні угруповання починається виконання умови можливості їх застосування у будь якій точці.

В представленому підході «полоси висот» гарантованого спостереження простору не перекриваються, але побудова систем спостереження множини орбітальних об'єктів у навколосемному просторі має передбачати їх перекриття в різний спосіб, задля чого базові підходи і алгоритми вирішення елементарних задач, представлені в даній роботі, також стануть у пригоді.

Ще одним результатом є отримання (як прикладу) деяких показників щодо необхідної кількості космічних апаратів-спостерігачів, які будуть здатні гарантовано покрити миттєвими зонами застосування пристроїв спостереження орбітального базування велику частину області висот низькоорбітальних супутникових систем. Приведені приклади показують, що при дальності застосування пристроїв спостереження в декілька сотень кілометрів мінімально необхідний склад орбітального угруповання супутникової системи спостереження – біля тисячі одиниць космічних апаратів в декількох різновисоких орбітальних угрупованнях, що для сучасних глобальних систем не є критично великим числом.

Робота присвячена космічній тематиці, але, узагальнивши постановку задачі, варіюючи низку умов цієї постановки та змінюючи «масштаб» вхідних даних, можна прийти до різноманіття технічних задач, де будуть доцільні і прийнятні (частково або повністю) запропонована концепція та алгоритми, за-

стосовані при її реалізації. Зокрема – при створенні систем спостереження або систем комплексного застосування пристроїв виконання технічних операцій.

#### 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](https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf)
2. Our world in Data. Number of objects in the orbits of the Earth. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://ourworldindata.org/grapher/low-earth-orbits-objects?country=Debris~Payloads~Rocket+bodies>
3. Space explained: How much space junk is there?: [Електронний ресурс]: <https://www.inmarsat.com/en/insights/corporate/2022/how-much-space-junk-is-there.html>
4. Васильев В.В. Орбітальний сервіс — крок до подальшого освоєння навколоземного космосу / В.В. Васильев, Л.Я. Годунок, С.А. Матвієнко // Космічна наука і технологія. 2021. 27, № 3 (130). С. 39-50. <https://doi.org/10.15407/knit2021.03>
5. Випорханюк Д.М. Основи космічної ситуаційної обізнаності (Space Situation Awareness, SSA). Іноземний і вітчизняний досвід космічної діяльності у сфері оборони: монографія./ Д.М. Випорханюк, С.В. Ковбасюк // Житормир: Видавництво О.О. Євєнук, 2018. – 532 с.
6. Беспалко І.А. Концепція інформаційної системи для забезпечення моніторингу космічного простору з метою підвищення воєнної безпеки. / І.А. Беспалко, Л.Д. Греков, Д.В. Пекареєв, Д.Л. Федорчук // Космічна наука і технологія. 2022. 28, № 4 (137). С. 3—17. <https://doi.org/10.15407/knit2022.04.003>
7. Лабуткіна Т.В. Всеобщая глобальная космическая система наблюдения Земли и космоса в аспекте мира и безопасности землян, акцент на орбитальной составляющей / Т.В. Лабуткіна, А.В. Хлапоніна // Наукові читання «Дніпровська орбіта-2020»: Збірник доповідей. - Дніпро, НЦАОМ, 2020. - С. 120-130. URL: [https://dneprorbita.org.ua/\\_files/doc/sbornik2020.pdf](https://dneprorbita.org.ua/_files/doc/sbornik2020.pdf)
8. Ананко Р.В., Лабуткіна Т.В. Навколоземний космос, контрольований людством: системність підходів, глобальність рішень, система-спостерігач на навколоземних орбітах. // Друга науково-практична Інтернет-конференція «Космічні горизонти», третій етап конференції - «Космос для людства». Збірник тез, НЦАОМ, Дніпро, 1-3 грудня, 2022. - С. 33-43. URL: [https://spacehorizons.org.ua/uploads/source/archiv\\_2022\\_3/tezu\\_3\\_2022.pdf](https://spacehorizons.org.ua/uploads/source/archiv_2022_3/tezu_3_2022.pdf)
9. Mark R. Ackermann, Colonel Rex R. Kiziah, Peter C. Zimmer, John T. McGraw, David 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. - SAND2015-3726C.

<https://www.osti.gov/servlets/purl/1253293>Emiliano Cordelli

10. Zhao Li, Yidi Wang, Wei Zheg Space-Based Optical Observation of Space Debris via Multipoint of View // Hindawi International Journal of Aerospace Engineering. // Volume 2020, Article ID 8328405, 12 pages. <https://doi.org/10.155/2020-83284>

11. Лабуткіна Т.В., Скородень Я.А., Борщева А.В., Тихонова А.А. Неітераційний метод планування спостереження орбітальних об'єктів з космічного апарата // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. – 2016. – Том XXI – С. 53-69.

12. HU Yunpeng<sup>1</sup>, LI Kebo<sup>1</sup>, LIANG Yan'gang<sup>1</sup>, and CHEN Lei<sup>2,\*</sup> Review on strategies of space-based optical space situational awareness

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9612138>

13. Лабуткіна Т.В Концепція системи з наземними і орбітальними засобами спостереження орбітальних об'єктів: стратегії використання засобів /Т.В. Лабуткіна, А.В. Хлапоніна, О.Р. Акіншев // Multidisciplinary academic notes. Theory, methodology and practice. Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference. Tokyo, Japan. 2022. Pp. 1060-1069 URL: <https://isg-konf.com/multidisciplinary-academic-notes-theory-methodology-and-practice/>

14. Лабуткіна Т.В., Ананко Р.В. До концепції складової супутникової системи спостереження орбітальних об'єктів на основі стабільних регулярних угруповань космічних апаратів // Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference. Stockholm, Sweden. 2023. Pp. 616-625. URL: <https://isg-konf.com/prospects-of-modern-science-and-education/>.

15. Барінов К.Н., Бурдаев М.Н., Мамон П.А. Динамика и принципы построения орбитальных систем космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1975. 270 с.13.

16. Walker J.G. Satellite Constellations. Journal of the British Interplanetary Society, 1984, vol. 24, pp. 369–384.

17. 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

## REFERENCES

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](https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf)

2. Our world in Data. Number of objects in the orbits of the Earth. [Електронний ресурс]: Режим доступу: <https://ourworldindata.org/grapher/low-earth-orbits-objects?country=Debris~Payloads~Rocket+bodies>
3. Space explained: How much space junk is there?: [Електронний ресурс]: <https://www.inmarsat.com/en/insights/corporate/2022/how-much-space-junk-is-there.html>
4. Vasyliev V.V. Orbitalnyi servis — krok do podalshoho osvoiennia navkolozemnoho kosmosu / V.V. Vasyliev, L.Ia. Hodunok, S.A. Matviienko // Kosmichna nauka i tekhnolohiia. 2021. 27, № 3 (130). С. 39-50. <https://doi.org/10.15407/knit2021.03>
5. Vyporkhaniuk D.M. Osnovy kosmichnoi sytuatsiinoi obiznanosti (Space Situation Awareness, SSA). Inozemnyi i vitchyzniani dosvid kosmichnoi diialnosti u sferi oborony: monohrafiia./ D.M. Vyporkhaniuk, S.V. Kovbasiuk // Zhytormyr: Vydavnytstvo O.O. Yeveniuk, 2018. – 532 pp.
6. Bepalko I.A. Kontsepsiia informatsiinoi systemy dlia zabezpechennia monitorynhu kosmichnoho prostoru z metoiu pidvyshchennia voiennoi bezpeky. / I.A. Bepalko, L.D. Hrekov, D.V. Pekariev, D.L. Fedorchuk // Kosmichna nauka i tekhnolohiia. 2022. 28, № 4 (137). С. 3—17 <https://doi.org/10.15407/knit2022.04.003>
7. Labutkina T.V. Vseobshaya globalnaya kosmicheskaya sistema nablyudeniya Zemli i kosmosa v aspekte mira i bezopasnosti zemlyan, akcent na orbitalnoj sostavlyayushej / T.V. Labutkina, A.V. Khlaponina // Naukovi chytannia «Dniprovska orbita-2020»: Zbirnyk dopovidei. - Dnipro, NTsAOM, 2020. - С. 120-130. URL: [https://dneprorbita.org.ua/\\_files/doc/sbornik2020.pdf](https://dneprorbita.org.ua/_files/doc/sbornik2020.pdf)
8. Ananko R.V., Labutkina T.V. Navkolozemnyi kosmos, kontrolovanyi liudstvom: systemnist pidkhodiv, hlobalnist rishen, systema-sposterihach na navkolozemnykh orbitakh. // Druha naukovo-praktychna Internet-konferentsiia «Kosmichni horyzonty», tretii etap konferentsii - «Kosmos dlia liudstva». Zbirnyk tez, NTsAOM, Dnipro, 1-3 hrudnia, 2022. - S. 33-43. URL: [https://space-horizons.org.ua/uploads/source/archiv\\_2022\\_3/tezu\\_3\\_2022.pdf](https://space-horizons.org.ua/uploads/source/archiv_2022_3/tezu_3_2022.pdf)
9. Mark R. Ackermann, Colonel Rex R. Kiziah, Peter C. Zimmer, John T. McGraw, David 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. - SAND2015-3726C. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1253293Emiliano Cordelli>
10. Zhao Li. Yidi Wang, Wei Zheg Space-Based Optical Observation of Space Debris via Multipoint of View // Hindawi International Journal of Aerospace Engineering. // Volume 2020, Article ID 8328405, 12 pages. <https://doi.org/10.155/2020-83284>

11. Labutkina T.V., Skoroden Ya.A., Borshcheva A.V., Tykhonova A.A. Neyteratsyonnyi metod planirovaniya nabliudeniya orbitalnykh ob'ektov s kosmycheskoho apparata // Systemne proektuvannia ta analiz kharakterystyk aerokosmichnoi tekhniki. – 2016. – Tom XXI – С. 53-69.
12. HU Yunpeng<sup>1</sup> , LI Kebo<sup>1</sup> , LIANG Yan'gang<sup>1</sup> , and CHEN Lei<sup>2,\*</sup> Review on strategies of space-based optical space situational awareness <https://ieeexplore.ieee.org/document/9612138>
13. Labutkina T.V. Kontseptsiiia systemy z nazemnymy i orbitalnymy zasobamy sposterezhennia orbitalnykh ob'ektiv: stratehii vykorystannia zasobiv /T.V. Labutkina, A.V. Khlaponina, O.R. Akinshev // Multidisciplinary academic notes. Theory, methodology and practice. Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference. Tokyo, Japan. 2022. Pp. 1060-1069 URL: <https://isg-konf.com/multidisciplinary-academic-notes-theory-methodology-and-practice/>
14. Labutkina T.V., Ananko R.V. Do kontseptsii skladovoi suputnykovoii systemy sposterezhennia orbitalnykh ob'ektiv na osnovi stabilnykh rehuliarnykh uhrupovan kosmichnykh aparativ // Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference. Stockholm, Sweden. 2023. Pp. 616-625. URL: <https://isg-konf.com/prospects-of-modern-science-and-education/>.
15. Barinov K.N., Burdaev M.N., Mamon P.A. Dinamika i principy postroeniya orbitalnykh sistem kosmicheskikh apparatov. M.: Mashinostroenie, 1975. 270 s.13.
16. Walker J.G. Satellite Constellations. Journal of the British Interplanetary Society, 1984, vol. 24, pp. 369–384.
17. 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.

Received 04.05.2023.

Accepted 08.05.2023.

***Global near-earth space coverage by zones of the use of its observation devices:  
concept and algorithms***

*The results of the study are presented within the framework of the task of ensuring full coverage of a given area of heights above the Earth's surface (the area of space between two spheres with a common center at the center of the Earth) by instantaneous zones of possible application of orbital-based surveillance devices located on spacecraft in orbital groups of different heights in circular orbits. In the general case, the solution of the problem involves the use of several orbital groupings of different heights on circular quasi-polar orbits, which in the simplified statement of the problem are assumed to be polar. The instantaneous zone of possible application of the surveillance device is simplified in the form of a cone. The cases of using observation devices "up" (above the plane of*

*the instantaneous local horizon of the spacecraft, which is the carrier of the observation device) and observations "down" (below this plane) are considered. The concept of solving the problem is proposed, which is based on the selection (based on the development of methods of applying known algorithms) of such a structure of each orbital grouping, which will ensure continuous coverage of a part of the given observation space (area of guaranteed observation), the boundaries of which are moved away from the location of observation devices, and then - filling the space with these areas. The work is devoted to the space theme, but by generalizing the statement of the problem, varying a number of conditions of this statement and changing the "scale" of the input data, it is possible to arrive at a variety of technical problems where the proposed concept and algorithms used in its implementation will be appropriate and acceptable (in part or in full). In particular, when some surveillance systems or systems of complex application of technical operations devices are created.*

**Лабуткіна Тетяна Вікторівна** – к.т.н., доцент, доцент кафедри кібербезпеки та комп'ютерно-інтегрованих технологій фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

**Ананко Руслан Віталійович** – аспірант кафедри кібербезпеки та комп'ютерно-інтегрованих технологій фізико-технічного факультету Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

**Labutkina Tetyana Viktorivna** - Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Cyber Security and Computer-Integrated Technologies of the Faculty of Physics and Technology of Oles Honchar Dnipro National University.

**Ananko Ruslan Vitaliyovych** - graduate student of the Department of Cyber Security and Computer-Integrated Technologies of the Faculty of Physics and Technology of Oles Honchar Dnipro National University.