

КЕРУВАННЯ АНТЕННОЮ СИСТЕМОЮ З МЕХАНІЗМОМ НАВЕДЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ТИПУ «HEXAPOD»

© М.Паламар, Ю.Пастернак, 2015

Розглядається принцип, алгоритм керування антенною системою з механізмом наведення на основі паралельної кінематичної структури «Hexapod» в якості опорно-поворотного пристрою. Проаналізовано переваги і недоліки такого поворотного пристрою, створена модель та запропоновано алгоритм керування наведенням антени.

This paper considers the principle, algorithm, hardware, and software structure for control of the antenna system with the pointing mechanism based on the parallel cinematic structure «Hexapod» as a supporting-turning device. The advantages and drawbacks of such turning device were analyzed. The computer model of the control system was developed. Antenna pointing control algorithm was proposed.

Вступ і актуальність проблеми. Найбільш вагомим фактором розвитку сучасного суспільства стає інформація. Одним з напрямів інформаційних технологій, що динамічно розвивається в світі, є створення геоінформаційних систем на основі технологій **дистанційного зондування Землі з космосу (ДЗЗ)** за допомогою низькоорбітальних космічних апаратів. Такі системи дають можливості масштабного моніторингу природних ресурсів, надзвичайних ситуацій, використання земель, прогнозування урожайності і багато ін. з метою ефективного вирішення народногосподарських задач.

Для розвитку геоінформаційних систем необхідне створення ефективних наземних антенних станцій (АС) прийому інформації ДЗЗ, що забезпечили б оперативний і надійний доступ до даних з космічних апаратів (КА). Особливостями конструкцій АС, призначених для прийому інформації ДЗЗ є високі вимоги до динамічних характеристик опорно-поворотних пристроїв (ОПП) АС, які повинні забезпечити високу точність наведення і супроводу КА шляхом позиціонування і утримання променя великогабаритного рефлектора АС в напрямі низькоорбітального КА з похибкою одиниць кут. хв.

В класичних 2х-осьових, або модифікованих 3х-осьових конструкціях ОПП АС основним недоліком є складність і високі вимоги до точності обертових механізмів ОПП що повинні забезпечувати прецизійну безлюфтову передачу від електроприводів на осі обертання рефлектора АС [1,2,3].

Відомі кінематичні механізми паралельної структури типу Hexapod, що використовуються в робототехніці та ін. галузях техніки. В останні роки появились публікації про використання таких типів пристроїв для керування великогабаритними механізмами в т.ч. як альтернативний варіант класичним механізмам наведення АС [4].

Метою роботи є розробка та дослідження моделі, алгоритму керування лінійними приводами АС з поворотним механізмом типу Hexapod для наведення променя рефлектора АС на позицію КА, задану в азимутально - кутомісних координатах.

Особливості схеми і конструкції АС з ОПП Hexapod. Опорно-поворотний пристрій на основі лінійних приводів (рис.1) складається із двох платформ, однією із яких є основа опорно-поворотного пристрою а інша основою для кріплення рефлектора антени, та шести актуаторів кожен із яких прикріплений до верхньої і нижньої платформи за допомогою шарнірів карданного типу.

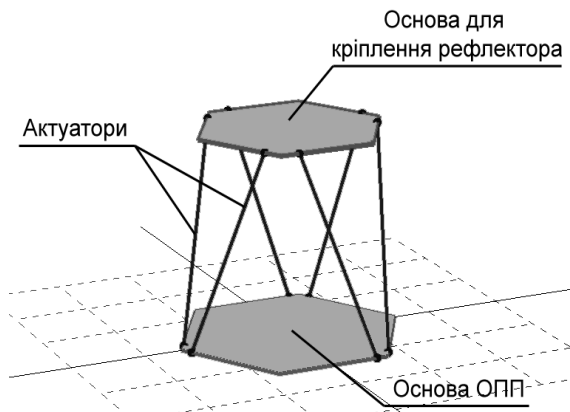


Рис. 1 Тривимірний зріз механізму Нехарод



Рис. 2 Розміщення платформ при крайніх і середньому видовженні актуаторів.

Конструкція такого опорно-поворотного механізму має 6 степенів вільності, що дозволяє здійснювати практично будь-який поворот рефлектора у просторі з високою точністю.

ОПП такої конструкції має ряд переваг порівняно з класичними обертовими механізмами:

- простота механічної конструкції, висока жорсткість, легкий доступ до механічних вузлів антени, відсутність скручування кабелів;
- відсутні «мертві» зони при супроводі КА;
- немає обмеження кутів повороту по азимуту;
- невелика швидкість руху приводів для будь-яких траєкторій супроводу КА;
- висока точність відпрацювання наведення;
- придатність до роботи в складних умовах;
- відносно низька вартість.

Основним недоліком такого ОПП є певні обмеження по низьких кутах нахилу рефлектора, а також складність одночасного керування рухом 6 актуаторів. На відміну від класичних обертових пристроїв АС, керування ОПП на основі лінійних приводів вимагає точного узгодження паралельного руху всіх шести актуаторів одночасно. Кінці всіх актуаторів завжди повинні лежати у відповідних площинах інакше можливе руйнування конструкції або вихід з ладу актуаторів.

Алгоритм розрахунку видовження актуаторів. В загальному випадку щоб навести промінь антени на заданий азимут і кут місця необхідно встановити видовження кожного актуатора на певну величину. Для заходження значень цих величин розв'яжемо обернену задачу.

Виберемо декартову систему координат з осями x , y , z . Задамо в ній площину ОПП до якої кріпиться дзеркало антени. Знаючи фізичні розміри верхньої платформи можна взяти координати кінців шарнірів. Аналогічно задамо в ній основу ОПП (нижню платформу) і визначимо координати нижніх кінців шарнірів у просторі.

При максимальних видовженнях актуаторів, платформи максимально віддалені одна від одної, відповідно, при мінімальних видовженнях відстань між ними буде мінімальною (рис.2). В крайніх положеннях платформи можуть бути лише паралельними.

Щоб досягнути максимально можливого повороту дзеркала антени очевидним є те, що верхня плита повинна знаходитись в середньому положенні. Тоді зберігається рівний запас ходу актуатора як вгору так і вниз.

За допомогою афінних ізометричних перетворень здійснимо поворот верхньої площини у просторі і, відповідно, кінців актуаторів які до неї прикріплені.

Для здійснення довільного повороту в просторі потрібно задати три параметри (рис.3):

- Фіксовану точку перетворення, яка в результаті повороту перейде сама в себе;
- Вектор, навколо якого здійснюється поворот;
- Значення кута на який потрібно здійснити поворот.

Вибираємо фіксовану точку у центрі верхньої платформи.

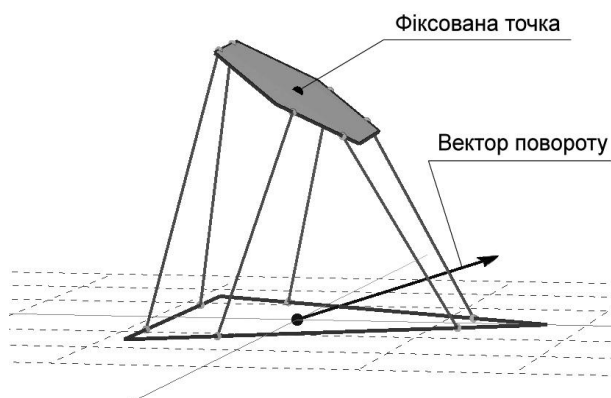


Рис.3 Параметри необхідні для здійснення повороту

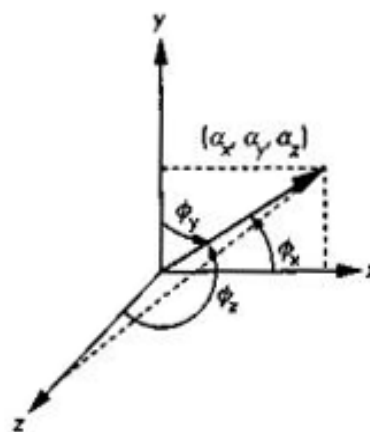


Рис. 4 Направляючі кути осі повороту

Вектор навколо якого здійснюється поворот задаємо двома точками p_1 і p_2 :

$$\mathbf{v} = p_2 - p_1 \quad (1)$$

Порядок використання точок визначає знак напрямку повороту. Важливим є лише напрямок вектора, а його положення у просторі не впливає на результат повороту.

Для спрощення виконання наступних операцій проводимо нормалізацію вектора осі повороту замінивши його вектором одиничної довжини з аналогічним напрямком у просторі:

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \\ X_N &= X/S \\ Y_N &= Y/S \\ Z_N &= Z/S \end{aligned} \quad (2)$$

Операція повороту спрощується якщо початок координат розмістити у фіксованій точці об'єкту повороту. Таким чином перша операція перетворення буде $T(-p_0)$, а остання – $T(p_0)$.

Де $T(-p_0)$ і $T(p_0)$ відповідні матриці перетворення.

$$T(p_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \alpha_x \\ 0 & 1 & 0 & \alpha_y \\ 0 & 0 & 1 & \alpha_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T(-p_0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -\alpha_x \\ 0 & 1 & 0 & -\alpha_y \\ 0 & 0 & 1 & -\alpha_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Поворот навколо довільної осі можна звести до послідовного повороту навколо окремих координатних осей. Основною проблемою при такому підході є знаходження кута на який потрібно здійснити поворот навколо кожної осі.

Однак можна виконати два перших повороти таким чином щоби вісь повороту $\mathbf{v}$ сумістилась з координатною віссю Z . Після цього повернути об'єкт навколо осі Z на потрібний нам кут і виконати два попередніх повороти у оберненому порядку.

Таким чином матриця повороту навколо довільної осі прийме вигляд:

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}_x(-\theta_x) \mathbf{R}_y(-\theta_y) \mathbf{R}_z(\theta_z) \mathbf{R}_y(\theta_y) \mathbf{R}_x(\theta_x) \quad (5)$$

Найскладнішою частиною розрахунків є знаходження матриць $\mathbf{R}_y(\theta_y)$ та $\mathbf{R}_x(\theta_x)$.

Розглянемо компоненти вектора $\mathbf{v}$. Оскільки $\mathbf{v}$ є вектором одиничної довжини то

$$a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 = 1 \quad (6)$$

Проведемо відрізок від початку координат до точки (a_x, a_y, a_z) . Цей відрізок буде мати одиничну довжину і напрямок як у вектора $\mathbf{v}$. Опустимо перпендикуляри з точки (a_x, a_y, a_z) на кожну координатну вісь як це зображено на рис.4. Кути $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ — це кути між вектором $\mathbf{v}$ і координатними осями. Між косинусами кутів і компонентами вектора $\mathbf{v}$ існує співвідношення:

$$\begin{aligned} \cos \varphi_x &= a_x \\ \cos \varphi_y &= a_y \\ \cos \varphi_z &= a_z \end{aligned} \quad (7)$$

Незалежні тільки два кути, оскільки:

$$\cos^2 \varphi_x + \cos^2 \varphi_y + \cos^2 \varphi_z = 1 \quad (8)$$

Знаючи значення косинусів, можна обчислити значення самих кутів Θ_x і Θ_y . На рис.5 видно, що поворот точки (a_x, a_y, a_z) приведе до такого повороту відрізка, що він опиниться в площині $y=0$. Довжина проекції відрізка (до повороту) на площину $x=0$ рівна d .

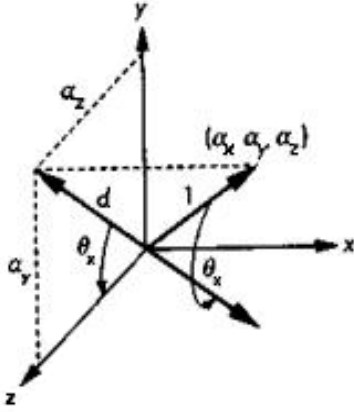


Рис.5. Знаходження кута повороту навколо осі X

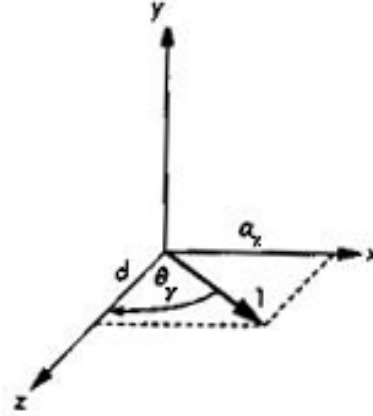


Рис. 6 Знаходження кута повороту навколо осі Y

Однак в матриці повороту присутні не кути, а їх синуси і косинуси, тому нам не потрібно знаходити саме значення Θ_x . Матриця повороту $\mathbf{R}_x(\theta_x)$ матиме вигляд:

$$\mathbf{R}_x(\Theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_z/d & -\alpha_y/d & 0 \\ 0 & \alpha_y/d & \alpha_z/d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

А обернена матриця повороту $\mathbf{R}_x(-\theta_x)$:

$$\mathbf{R}_x(-\Theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_z/d & \alpha_y/d & 0 \\ 0 & -\alpha_y/d & \alpha_z/d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Елементи матриці $R_y(\theta_y)$ розраховуються із аналогічних міркувань (рис.6).
Відповідно матриці повороту для осі y :

$$R_y(\Theta_y) = \begin{bmatrix} d & 0 & -\alpha(z) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \alpha(z) & 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$R_y(-\Theta_y) = \begin{bmatrix} d & 0 & \alpha(z) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\alpha(z) & 0 & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Таким чином вісь повороту (вектор $\mathbf{v}$) сумістилась із віссю Z . Після цього здійснюємо поворот на потрібний нам кут - заданий кут місця для наведення променя рефлектора антени на КА.

$$R_z(\Theta_z) = \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & -\sin(\Theta) & 0 & 0 \\ \sin(\Theta) & \cos(\Theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Далі робимо зворотні перетворення $R_y(-\theta_y)$, $R_x(-\theta_x)$, $T(-p_0)$.

Після чого отримаємо верхню площину повернену на заданий кут який відповідає куту місця наведення променя рефлектора антени.

Перемноживши всі матриці перетворень отримаємо комплексну матрицю M .

$$M = T(-p_0) R_x(-\theta_x) R_y(-\theta_y) R_z(\theta_z) R_y(\theta_y) R_x(\theta_x) T(p_0) \quad (14)$$

Множення будь-якої точки тривимірного простору на отриману комплексну матрицю призведе до повороту її у цьому ж просторі відносно фіксованої точки.

Після виконання повороту верхньої платформи ми отримуємо нові координати верхніх кінців актуаторів, що кріпляться до платформи. Маючи координати верхніх і нижніх кінців актуаторів у просторі знаходимо відстань між ними, тобто видовження для кожного актуатора яке і потрібно було знайти:

$$S = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (15)$$

На основі даного алгоритму за допомогою IDE Borland Delphi 7, та графічної підсистеми OpenGL, написано програму яка проводить розрахунки положень і швидкостей руху кожного актуатора в залежності від заданого кута наведення на координати азимута та кута місця. Програма моделює роботу антенної системи з опорно-поворотним пристроєм на основі паралельної кінематичної структури «Нехарод» з графічним відображенням тривимірної моделі ОПП та рефлектора АС (рис. 7). Задавши графіки зміни кутів наведення по азимуту і куту місця при супроводі КА ми отримуємо графіки траєкторій руху кожного із шести актуаторів (рис.8).

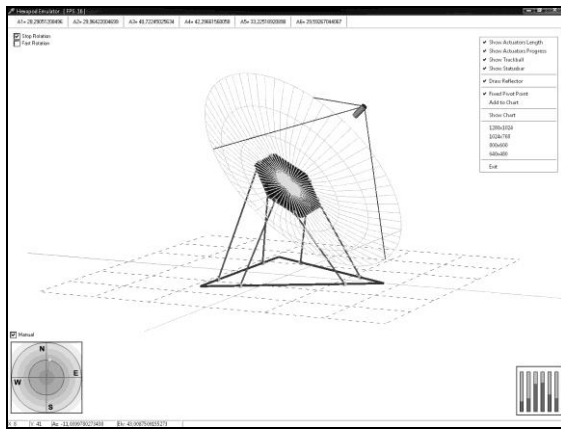


Рис. 7 Тривимірна модель антени з ОПП Нехарод

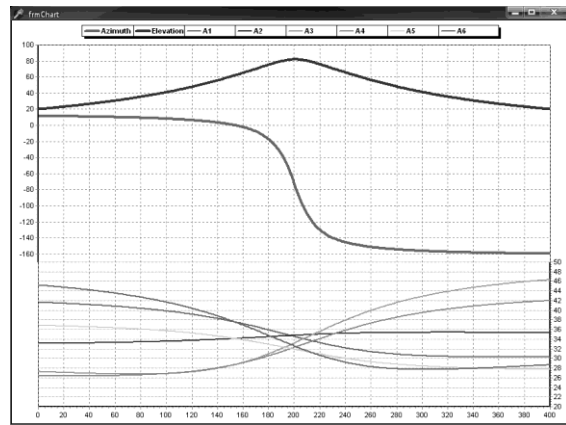


Рис. 8 Моделювання руху 6 актуаторів при заданих траєкторіях азимута і куту місця

Такий алгоритм дозволяє отримати максимальну швидкодію у випадках коли необхідно повернути декілька точок. У випадку здійснення повороту великих об'єктів які складаються з сотень і тисяч точок такий алгоритм являється дуже ефективним, і дозволяє провести перетворення в десятки а то й сотні разів швидше в порівнянні із звичайним покроковим обрахунком.

Висновок. Запропонована модель і алгоритм керування антенною системою з опорно-поворотним пристроєм на основі механізму паралельної кінематичної структури типу «Нехарод». Такий тип ОПП дозволяє спростити механічну конструкцію АС порівняно з класичними обертовими пристроями, є відносно простим і має високі технічні характеристики проте вимагає складніших алгоритмів керування його роботою. Приведено детальний опис алгоритму обчислення видовження кожного із актуаторів для будь-якого заданого положення. Розроблена тривимірна математична модель ОПП успішно використовується при створенні системи керування та дослідного взірця АС.

Література

1. Белянский П.В., Сергеев Б.Г. Управление наземными антеннами и радиотелескопами. – М.: Сов. Радио, 1980. – 280 с.
2. Паламар, М.І. Розробка і моделювання нових антенних станцій прийому інформації ДЗЗ [Текст] / Паламар М.І, Умзар Ю.А., Пастернак Ю.В. // Матеріали другої Всеукраїнської конференції «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки GEO-UA 2010 .– Київ: 14-17 червня 2010 .– с.108-109.
3. Паламар М.І. Керування слідкуючими антенами із невизначеними динамічними параметрами для супроводу низькоорбітальних космічних апаратів. Автоматика, вимірювання та керування. Вісник ДУ «Львівська політехніка». - 2006. - № 401. - с.32-38.
4. <http://www.terraengine.com/Dgroundstation.cfm>