

ПІДХІД ДО СТВОРЕННЯ ТА РОЗМІЩЕННЯ КЛАСТЕРІВ НАНОСУПУТНИКІВ СИСТЕМИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ CLEAR SPACE

¹Явіся В.С., ¹Лисенко О.І., ¹Алексеева І.В., ²Тачиніна О.М.

¹Інститут телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна
E-mail: yavisya@bigmir.net

²Національний авіаційний університет
E-mail: tachinina5@gmail.com

The method of creation and allocation of nanosatellite clusters of clear space satellite communication system

It is proposed to create a group of nanosatellites of CubeSat format, which will consist of clusters. Each cluster will be similar functionally to Iridium satellite.

Для створення глобальної системи супутникового зв'язку на базі угруповання наносупутників (НС) формату *CubeSat*, яка б за об'ємом виконуваних функцій була аналогічна системі *Iridium*, необхідно буде розташувати на шести орбітах мінімум 66 кластерів НС (по 11 на кожній орбіті) [1-7].

Склад кластеру із НС може бути не однорідним з погляду на функції, що виконуються окремими апаратами: основна частина НС може використовуватися для зв'язку із абонентськими терміналами, інші – для концентрації і комутації навантаження всередині кластеру, зв'язку із сусідніми кластерами НС, які розташовані на власній та суміжних орбітах, а також для зв'язку із наземними станціями. Оскільки відстань між НС кластеру складає лише кілька десятків метрів, взаємодія між ними може здійснюватися за допомогою *Wi-Fi* або оптичного сигналу.

Мінімальна кількість НС у одному кластері визначиться наступним чином. Для зв'язку із абонентськими терміналами, за умови формування одним НС одного парціального променя, потрібно 32 апарати. Функцію концентрації і комутації навантаження всередині кластеру буде виконувати один НС (бажано із дублюванням). Для зв'язку із іншими кластерами на власній та суміжних орбітах – чотири НС, для зв'язку із наземними станціями – два НС. Таким чином, для виконання функцій аналогічних за обсягом тим, що виконує супутник *Iridium NEXT*, в кластері повинно бути не менше 40 НС.

Для формування діаграми спрямованості, яка забезпечить обслуговування території, що за площею співвідноситься із зоною обслуговування одного парціального променя супутника *Iridium NEXT*, пропонується використовувати спіральну конічну антену [1].

Виходячи з питомого енергоспоживання НС, його формат можна

визначити як *CubeSat-2*, коли в одному кубі із стороною 10 см будуть розташовані елементи енергоустаткування (сонячні батареї та акумулятор), а в іншому – обладнання відповідно до функціонального призначення. Загальна вага такої конструкції буде знаходитись в межах 9 кг. При масовому виробництві вартість одного НС формату *CubeSat-2* не буде перевищувати 150 тис доларів. Тому сукупна вартість кластеру складатиме 6 млн доларів.

При виведенні апаратів на орбіту з висотою 750 км ракетою-носієм *Falcon 9* вартість одного кг КН, складатиме близько 11630 доларів [3].

Оцінимо ефективність системи супутникового зв'язку, яка побудована на угрупованні НС. Будемо використовувати параметри, що відповідають одному кластеру НС: кількість одночасних підключень $V_{НС} = 3840$; вартість всіх

сорока НС кластеру з урахуванням витрат на запуск (визначиться добутком маси одного НС та вартості одного кг КН, що виводиться на орбіту) складатиме: $C_{НС} = 40 \times (150000 + 9 \times 11630) \approx 10,2$ млн. доларів, а відповідно $E_{НС} = 2653$ доларів за підключення.

Слід зазначити, що розрахунки проводились за умови використання ракети-носія без повернення першої ступені. Якщо скористатися національними аерокосмічними системами «Оріль», «Світязь» або «МАКС» і при цьому виконувати первинне розміщення НС (рис. 1) за наведеною нижче математичною постановкою задачі [8], то вартість кластерної наносупутникової системи зв'язку значно зменшиться порівняно із існуючими системами:

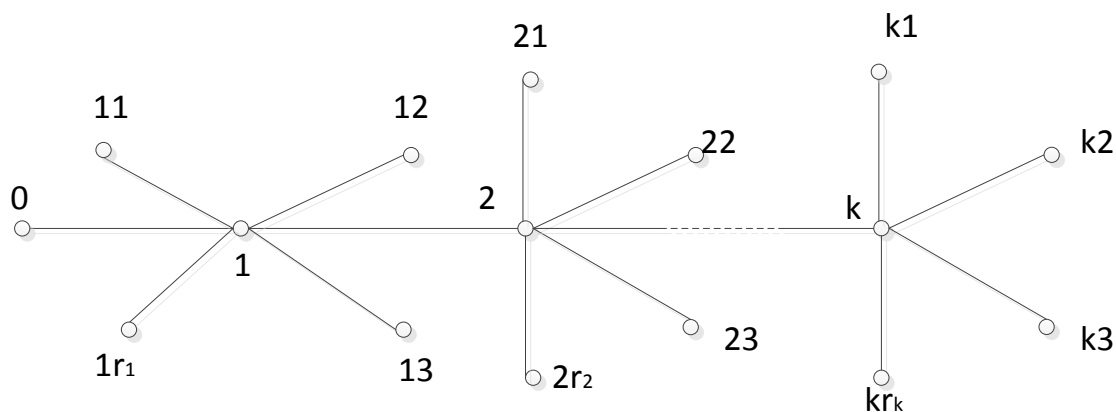


Рис. 1. Структурна схема траєкторії розміщення кластерів наносупутників

$$\dot{x} = f(x, u, t), t \in [t_0, t_f], x \in E^n, u \in \Omega \subset E^m, \quad (1)$$

$$g_l^{(0)}(x_l(t_0), t_0) \begin{cases} = 0, l = \overline{1, k_g^{(0)}}; \\ \leq 0, l = \overline{k_g^{(0)} + 1, n_g^{(0)}}; \end{cases} \quad (2)$$

$$g_l^{(i)}(x_l(t_i), t_i) \begin{cases} = 0, l = \overline{1, k_g^{(i)}}; \\ \leq 0, l = \overline{k_g^{(i)} + 1, n_g^{(i)}}; \end{cases} \quad (t_{i-1} < t_i, i = \overline{1, k}), \quad (3)$$

$$g_l^{(ij)}(x_{ij}(t_{ij}), t_{ij}) \begin{cases} = 0, l = \overline{1, k_g^{(ij)}}; \\ \leq 0, l = \overline{k_g^{(ij)} + 1, n_g^{(ij)}}; \end{cases} \quad (i = \overline{1, k}; j = \overline{1, r_i}) \quad (4)$$

$${}_{\beta} \dot{x} = {}_{\beta} f({}_{\beta} x, {}_{\beta} u, t), t \in [t_{\beta^*}, t_{\beta}], (\beta = i, \beta^* = i - 1; \beta = ij, \beta^* = i; i = \overline{1, k}; j = \overline{1, r_i}); \quad (5)$$

$$q_l^{(\beta)}({}_{\beta} x, {}_{\beta} u, t) \begin{cases} = 0, l = \overline{1, k_q^{(\beta)}}; \\ \leq 0, l = \overline{k_q^{(\beta)} + 1, n_q^{(\beta)}}; \end{cases} \quad t \in [t_{\beta^*}, t_{\beta}] \quad (6)$$

$${}_i x(t_i) - {}_{ij} x(t_i) = 0 \quad (i = \overline{1, k}; j = \overline{1, r_i}); \quad (7)$$

$${}_i x(t_i) - {}_{i+1} x(t_i) = 0 \quad (i = \overline{1, k-1})$$

$${}_i x_n(t_i) = \xi(i) {}_{i+1} x_n(t_i) + \sum_{j=1}^{r_i} {}_{ij} x_n(t_i); \quad (8)$$

$$i = \overline{1, k}, j = \overline{1, r_i}, \xi(i) \begin{cases} 1, i = \overline{1, k-1}, \\ 0, i = k. \end{cases} \quad (9)$$

Таким чином, поєднання ідеї щодо створення низькоорбітального багатоцільового кластерного наносупутникового оперативно відновлюваного угруповання дозволяє на системній основі задовольнити потреби суспільства у надійному інформаційному забезпеченні і при цьому не засмічує ближній навколосезний космічний простір.

Література

1. SatcomDV. Інформація о системах спутникової зв'язи. /Електронний ресурс/ http://www.satcomdv.ru/informaciya_o_sistemah_sputnikovoj_sa.
2. Явіся В.С., Вакулєнко О.В. Аналіз способів побудови систем супутникового зв'язку // Х Науково-практична конференція «Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в АТО». Збірник тез. – К.: ВІТІ. – 2017. – С. 274-275.
3. Все спутники зв'язи. Каталог. /Електронний ресурс/ <http://ecoruspace.me>.
4. Wind-sail, сайт компанії. Космічний сегмент спутникової зв'язи Іридиум. /Електронний ресурс/ <https://wind-sail.ru/equipment/svyaz/sistema-mobilnoj-sputnikovoj-svjazi-iridium/>
5. Satlink. Технічні характеристики спутникової системи зв'язи Іридиум /Електронний ресурс/ http://www.satlink.ru/Spytnikovaia_svyaz/Iridium/Tehnicheskie_harakteristiki.html.
6. Космос Я. Расчет стоимости производства, обслуживания и запуска ракет Falcon 9 и Falcon Heavy компании SpaceX Электронный ресурс/ <http://www.astronews.space/spacescrafts-2/252>.
7. Явіся В.С., Лисенко О.І. Антенні пристрої для наносупутникової системи фіксованого зв'язку // XI Науково-практична конференція «Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення. Застосування підрозділів, комплексів, засобів зв'язку та автоматизації в операції Об'єднаних сил». Доповіді та тези доповідей. – К.: ВІТІ. – 2018. – С. 241.
8. Lysenko O.I., Tachinina O.M., Alekseeva I.V. Path constructing method of unmanned aerial vehicle// IEEE 4th International Conference, «Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments» (Kyiv, Ukraine, October, 17-19, 2017).– К.: NAU, 2017. – pp. 254-259.