

## ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ КОСМІЧНОГО СЕГМЕНТУ СИСТЕМИ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ CLEAR SPASE

<sup>1</sup>Явіся В.С., <sup>1</sup>Лисенко О.І., <sup>1</sup>Алексеева І.В., <sup>2</sup>Тачиніна О.М.

<sup>1</sup>Інститут телекомунікаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна

E-mail: yavisya@bigmir.net

<sup>2</sup>Національний авіаційний університет

E-mail: tachinina5@gmail.com

### Approach of construction of the space segment of the satellite communication system CLEAR SPASE

One of the possible uses of nanosatellites is their use to build a satellite communications system. To compare such a promising system with existing low-orbit and geostationary satellite systems, an efficiency indicator is proposed. It is shown that the value of this indicator for a nanosatellite system is several times better than for existing systems.

Останнім часом стрімкими темпами відбувається зростання кількості проектів, в яких пропонується використовувати наносупутники (НС). За їх допомогою можна здійснювати дослідження земної поверхні та верхніх шарів атмосфери, прогноз землетрусів, екологічний моніторинг, а також будувати системи супутникового зв'язку (ССЗ). Причому передбачається, що НС будуть знаходитись на низьких орбітах, що дозволить частково вирішити проблему космічного сміття.

Виходячи з цього, доцільно оцінити ефективність перспективної ССЗ на базі НС, та порівняти її з існуючими низькоорбітальними та геостаціонарними ССЗ. При цьому необхідно враховувати той факт, що основними перевагами низькоорбітальних ССЗ у порівнянні із системами, супутники яких знаходяться на геостаціонарній орбіті, є невелика затримка у проходженні сигналу та можливість покриття у глобальному масштабі.

У відомій системі *Iridium* функціонують понад 70 супутників, 66 з яких є активними, вони розміщуються на 6-ти приполярних орбітах. Розроблений для цієї мережі механізм між супутникових зв'язків дозволяє передавати сигнал з одного супутника на інший без ретрансляції цього сигналу на Землю. У наземний сегмент входять дві центральні станції управління і контролю. Вони здійснюють управління орбітальним угрупованням космічних апаратів, забезпечують синхронізацію ССЗ, організують групові тракти передачі. Всього наземний сегмент включає 20 базових станцій сполучення і управління зв'язком. Супутники *Iridium* перебувають на висоті 780 км над поверхнею Землі. Їх термін служби становить 7-10 років [1, 2].

Останній запуск для поповнення угруповання системі *Iridium* відбувся 11.01.2019 року з космодрому База Ванденберг. За допомогою ракети-носія *Falcon 9* було виведено десять супутників *Iridium NEXT*, вагою 860 кг кожен. Всього протягом 2017- 2019 років відбулось вісім запусків *Falcon 9*, що дозволило здійснити виведення 75 апаратів. Таким чином, обіцянка компанії

*Iridium Communications Inc* про повне оновлення космічного сегменту, про яку було заявлено ще 2010 року, виконана. Остаточна вартість супутника *Iridium NEXT* не розголошується, але за даними [3] вона складає близько 31 млн. доларів.

Антенні системи космічних апаратів *Iridium NEXT* формують 48 парціальних променів, які створюють загальну зону покриття діаметром понад 4000 км. Одна зона має діаметр близько 700 км [4].

Для виключення дублювання від сусідніх космічних апаратів частина променів виводиться з активного режиму роботи. Так, із загальної кількості 3168 променів в поточний момент часу активні лише 2150, тобто в середньому кожен апарат створює близько 32 парціальних променів (сот). При цьому потужність, що споживається одним апаратом становить близько 2,2 кВт [4, 5].

Середня пропускна здатність при використанні смуги частот 10,5 МГц для зв'язку між мобільним терміналом і супутником становить понад 110 каналів на одну соту поверхні Землі [5]. Для обслуговування абонентів можливості апарата дозволяють створити до 5700 телефонних каналів, але їх реальна кількість становить близько 3840. Враховуючи таке обмеження, в мережі на супутниках *Iridium NEXT* можливе одночасне обслуговування 253440 абонентів.

Для порівняння, система *Inmarsat* має парк з одинадцяти супутників (два з яких є резервними) на геостационарній орбіті на відстані близько 36000 кілометрів від Землі і включає супутники нового покоління, які являють собою певний еталон для систем мобільного супутникового зв'язку з точки зору їх енергетичних можливостей, пропускної спроможності і універсальності. Виведені на орбіту супутники забезпечують глобальне охоплення широкосмуговим зв'язком 98% земної поверхні, за винятком самих крайніх полярних регіонів [1, 2].

Останній запуск апаратів системи *Inmarsat* відбувся 15.05.2017 року з космодрому Мис Канаверал, також за допомогою ракети-носія *Falcon 9*. При цьому був виведений лише один супутник *Inmarsat 5-F4* вагою 6070 кг. Заявлена вартість супутника складає 235 млн. доларів (для супутників попереднього покоління *Inmarsat 4A-F4* вона складала 350 млн. доларів) [3].

Кожен із супутників *Inmarsat 5-F4* генерує 89 фіксованих точкових сфокусованих променів, які можуть бути оперативно сконфігуровані для забезпечення необхідної пропускної здатності мережі в районах підвищеного попиту на послуги.

З'єднання всередині мережі в межах зони покриття здійснюється без використання наземних станцій. Для з'єднання абонентських терміналів із іншими мережами передбачено три наземних станції. Термін служби супутників розрахований на 12-15 років [1].

Виділений для системи *Inmarsat* частотний діапазон із смугою 68 МГц дає можливість здійснити підключення до супутника *Inmarsat 5-F4* майже 35000 телефонних каналів, але фактично їх кількість не перевищує 32000. Живлення супутника здійснюється від сонячних батарей, потужність яких становить в середньому 14,5 кВт [1].

Мережа, що побудована на супутниках *Inmarsat 5-F4*, із урахуванням їх реальних характеристик, може забезпечити одночасне обслуговування до 288000 абонентів.

Ефективність супутникового сегменту систем *Iridium* та *Inmarsat* може бути оцінена за допомогою показника, що являє собою витрати на створення підключення для обслуговування одного абонента, які враховують як вартість космічного апарату, так і вартість його запуску:

$$E = C/V \quad (1)$$

де  $C$  – вартість супутника з урахуванням витрат на його запуск;  $V$  – кількість одночасних підключень до супутника.

За останні роки пуск ракети-носія *Falcon 9* в середньому обходився замовнику майже в 100 млн. доларів [3].

Оскільки ракетою носієм одразу було виведено десять супутників, то вартість одного супутника з урахуванням витрат на його запуск становить:  $C_{Iridium} = 31 + 10 = 41$  млн. доларів. Попередній аналіз, наведений вище, дає можливість визначити кількість одночасних підключень до супутника *Iridium NEXT*:  $V_{Iridium} = 3840$ .

Для супутників *Inmarsat 5-F4* відповідні характеристики, з урахуванням того, що при запуску ракети-носія *Falcon 9* здійснюється виведення лише одного апарату, приймуть значення:  $C_{Inmarsat} = 235 + 100 = 335$  млн. доларів,  $V_{Inmarsat} = 32000$ .

Запропонований показник, розрахований за формулою (1), для супутника *Iridium NEXT* становитиме  $E_{Iridium} = 10677$  доларів за підключення, а для супутників *Inmarsat 5-F4*:  $E_{Inmarsat} = 10469$  доларів за підключення. Звичайно ж меншому значенню показника  $E$  відповідає більша ефективність.

Незважаючи на майже однаковий показник ефективності, за рахунок таких основних недоліків систем геостационарного базування, як: значна затримка в проходженні сигналу, його високе загасання, перенасиченість геостационарної орбіти на багатьох ділянках та неможливість обслуговування приполярних областей [2], в перспективі перевага віддається низькоорбітальним ССЗ.

Створення будь якої ССЗ вимагає значних інвестицій. Тому для оператора супутникового зв'язку звичайним є прагнення до зменшення вартості як наземного, так і на космічного сегментів системи. Зазначимо, що для останнього основні витрати пов'язані із виведенням космічного апарату на задану орбіту та його створенням.

Для першої складової витрат на космічний сегмент суттєве значення має висота орбіти, на яку виводиться супутник – із збільшенням висоти вартість пуску при перерахунку на корисне навантаження (КН), що виводиться носієм, зростає. Так, маса КН для *Falcon 9* при виведенні на низьку опорну орбіту з висотою близько 200 км становить 22800кг, а маса КН при виведенні на геоперехідну орбіту – 8300 кг [3].

Крім того, на вартість пуску впливає принцип побудови ракети-носія. Тобто, якщо конструкція передбачає її багаторазове використання – вона може бути зменшена. Так, вартість пуску для *Falcon 9* за рахунок повернення першої ступені може бути знижена майже на 24 млн. доларів [6]. Якщо врахувати той факт, що вартість першої ступені складає майже 50% вартості всієї *Falcon 9*, то багаторазова перша ступень дозволить проводити запуски за 50 млн. доларів. Однак при цьому маса КН с посадкою першої ступені для *Falcon 9* при виведенні, наприклад, на геоперехідну орбіту знизиться до 5500 кг [3].

Альтернативний спосіб виведення супутників на орбіту – повітряний старт, який передбачає запуск космічних апаратів з повітряних суден горизонтального зльоту. Такі переваги, як зменшення маси, сили протидії та вартості ракети-носія, дозволяють у кілька разів знизити витрати на запуск. На сьогодні саме українські літаки АН-124-100 «Руслан» та АН-225 «Мрія» можуть бути задіяні для виконання цієї місії) (див. рис. 1, 2, 3) [7].

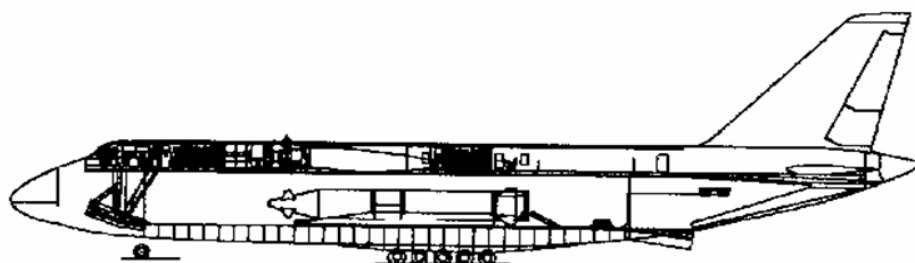


Рис. 1. Аерокосмічна система «Оріль» на базі літака АН-124-100 «Руслан»

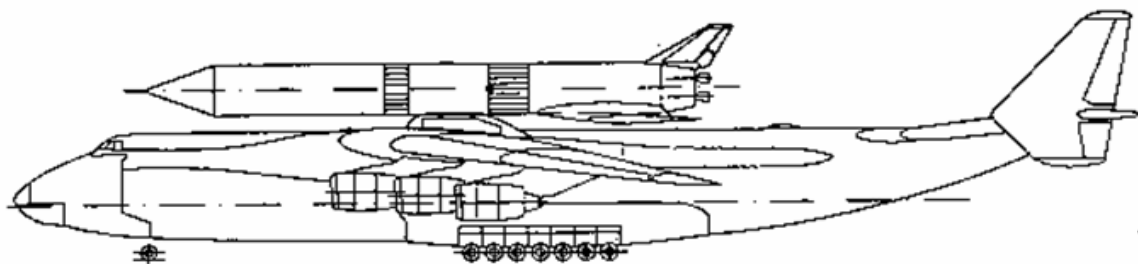


Рис. 2. Аерокосмічна система «Світязь» на базі літака АН-225 «Мрія»

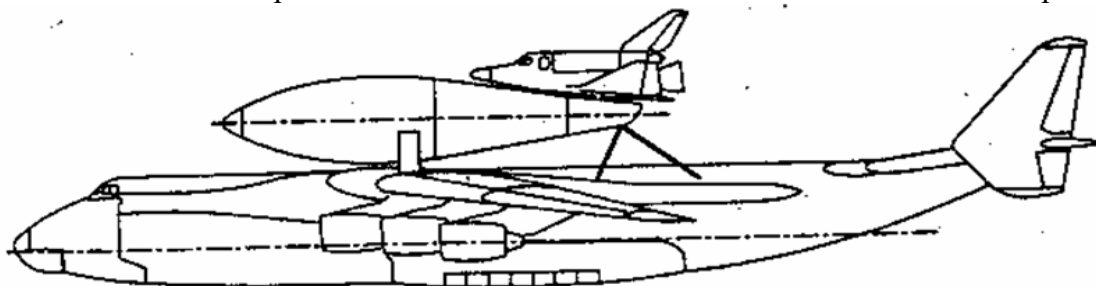


Рис. 3. Аерокосмічна система «МАКС» на базі літака АН-225 «Мрія».

Зменшення другої складової витрат на космічний сегмент, тобто вартості супутників зв'язку, можливе при їх масовому серійному виробництві. Саме з погляду на це досить привабливою є ідея використання НС формату *CubeSat* (див. рис. 4).

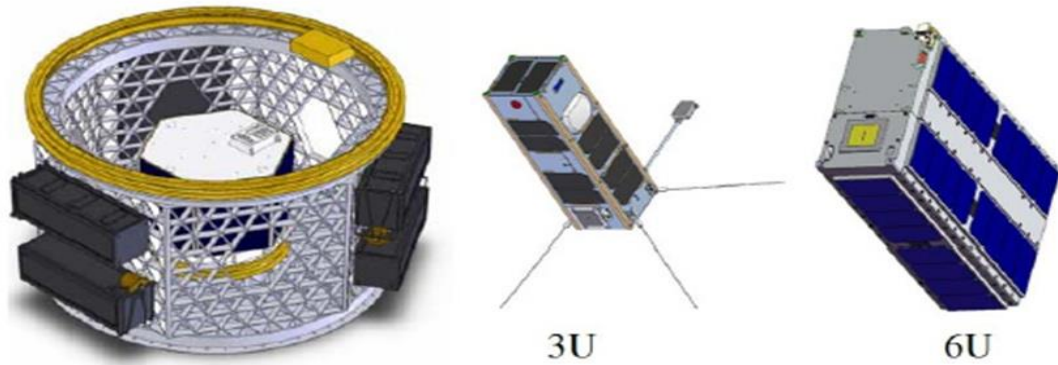


Рис. 4. Наносупутники компоновки CubeSAT 3U и 6U.

Таким чином, на сьогодні, ефективність супутникового сегменту системи зв'язку на НС виявляється значно вищою у порівнянні із існуючими ССЗ. Окрім того, запропоноване рішення в цілому підвищує надійність усієї системи, оскільки втрата або вихід з ладу окремих НС незначним чином вплине на характеристики угруповання, а у випадку часткового резервування НС в кластері такі події можуть бути повністю нівельовані. Немаловажним є і той факт, що використання НС вирішить проблему космічного сміття, оскільки НС будуть знаходитись на низькій орбіті та по закінченні своєї місії будуть повністю згорати в земній атмосфері.

### Література

1. Satcom D. V. Информация о системах спутниковой связи. /Электронный ресурс/ [http://www.satcomdv.ru/informaciya\\_o\\_sistemah\\_sputnikovoj\\_sa](http://www.satcomdv.ru/informaciya_o_sistemah_sputnikovoj_sa).
2. Явіся В.С., Вакуленко О.В. Аналіз способів побудови систем супутникового зв'язку //X 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 связи. Каталог. /Электронный ресурс/ <http://ecoruspace.me>.
4. Wind-sail, сайт компании. Космический сегмент спутниковой связи Иридиум. /Электронный ресурс/ <https://wind-sail.ru/equipment/svyaz/sistema-mobilnoj-sputnikovoj-svjazi-iridium/>
5. Satlink. Технические характеристики спутниковой системы связи Iridium /Электронный ресурс/ [http://www.satlink.ru/Spytnikovaia\\_sviaz/Iridium/Tehnicheskie\\_harakteristiki.html](http://www.satlink.ru/Spytnikovaia_sviaz/Iridium/Tehnicheskie_harakteristiki.html).
6. Космос Я. Расчет стоимости производства, обслуживания и запуска ракет Falcon 9 и Falcon Heavy компании Space X Электронный ресурс/ <http://www.astronews.space/spacescrafts-2/252>.
7. Tachinina O., Chekanova I., Lysenko O., Alekseeva I., Chumachenko S. The system of injection of subminiature satellites (NANOSATELLITES) to NEAR-EARTH orbit on the basis of AN-124-100 airplane. Десята міжнародна науково-технічна конференція: „Проблеми телекомунікацій”, Київ, 19-22 квітня 2016, С. 477-479