

DOI: 10.18372/2310-5461.44.14315

УДК 004.942

**О. М. Зудов**, канд. техн. наук

Національний авіаційний університет

orcid.org/0000-0003-3313-1659

e-mail: o\_zudov@mail.ru;

**Н. О. Рибасова**

Національний авіаційний університет

orcid.org/0000-0002-0778-072X

e-mail: nrybasova@gmail.com;

**В. В. Горіна**

Національний авіаційний університет

orcid.org/0000-0002-0052-0466

e-mail: vikulek88@ukr.net

## СИСТЕМА МОБІЛЬНОГО СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ З ПАСИВНИМИ ТЕРМІНАЛАМИ НА ОСНОВІ МОДУЛЮЮЧИХ РЕТРОРЕФЛЕКТОРІВ

### Вступ

Сучасні телекомунікаційні системи неможливо уявити без супутникового зв'язку, оскільки космічний сегмент пропонує користувачам максимальну мобільність. Віддалені райони світу, такі як пустелі, тайга, джунглі, Антарктида, а також океани можуть з'єднуватися з іншим світом шляхом ретрансляції через космічні апарати (КА). Розробка нових концепцій супутникових систем мобільної передачі даних є актуальною проблемою, оскільки існуючі телекомунікації не завжди задовольняють сучасним вимогам користувача. У першу чергу мова йде про швидкість передачі даних, яка для космічного зв'язку обмежена дуже низьким співвідношенням сигнал/шум, яке у свою чергу зумовлене енергозатратами передавачів. Особливо це стосується користувацьких терміналів, які, виходячи із особливостей сегменту використання, повинні мати мобільність і автономність у сенсі низьких енергозатрат.

### Постановка проблеми

Під час проектування систем космічного зв'язку необхідно приймати до уваги існуючу ситуацію з розповсюдженням КА і їхньою щільністю розташування у космосі. За останні десятиріччя у космос було виведено тисячі об'єктів, деякі з яких (або їх фрагменти) перетворилися у космічне сміття. Небезпека зіткнення КА між собою і з космічним сміттям стала реальністю, про що свідчить відомий інцидент 10 лютого 2009, коли у космосі зіткнулися російський супутник Космос-2251 і американський КА Iridium-33 [1].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Навколоземний простір заповнений нерівномірно: найбільш щільно об'єкти скупчені на низьких орбітах поблизу (сотні кілометрів), а також на геостационарній орбіті. На ресурсі *stuffin.space* [2] надано візуалізацію цього розподілу (рис. 1).

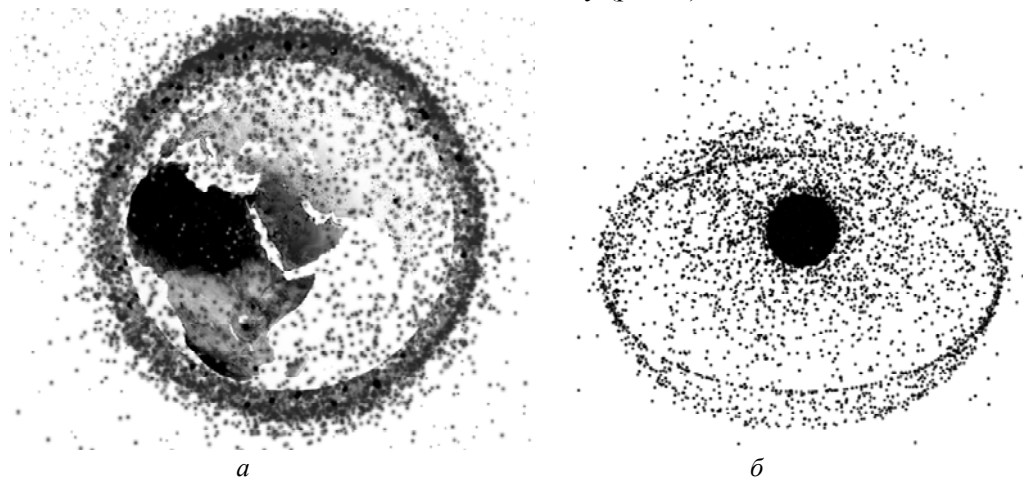


Рис. 1. Візуалізація щільності КА і космічного сміття:

*a* — на низьких орбітах; *б* — на геостационарній орбіті. Зображення взято з сайту *stuffin.space*

З погляду на цей розподіл середні орбіти (декілька тисяч кілометрів) є недостатньо освоєними, що можна пояснити тим що вони поєднують недоліки обох типів — геостаціонарних і низьких. До недоліків низьких орбіт можна віднести дуже малу зону покриття (або, що еквівалентно, малий час перебування у зоні видимості) і, як наслідок, необхідність дуже великої кількості КА для забезпечення глобального покриття. Наприклад, в амбіційному проекті компанії *SpaceXStarlink*, який передбачає глобальне покриття всієї земної поверхні до середини 20-х років, планується використовувати тисячі супутників на низьких орбітах декілька сотень кілометрів [3]. Іншими недоліками телекомунікаційних систем на основі КА на низьких орбітах можна вважати невеликий строк експлуатації таких супутників (декілька років), а також необхідність врахування ефекту Доплера через високу відносну швидкість КА і наземного терміналу. До недоліків геостаціонарних орбіт зазвичай відносять необхідність частого коригування руху супутників, погане покриття приполярних областей у наслідок низького кута видимості КА над горизонтом. Також системи з КА на геостаціонарних орбітах мають велику (сотні мілісекунд) затримку сигналу, що може бути критичним для деяких випадків.

Але головним недоліком таких систем є дуже велика відстань до КА, і, як наслідок, малий рівень сигналу.

Теорема Шенона про канал із шумами співвідношення енергії біта до спектральної щільності шуму задає границю швидкості передачі інформації, отже системи з КА на геостаціонарних орбітах мають невисоку пропускну здатність. Наприклад оператор супутникового мобільного зв'язку *Thuraya* пропонує користувачам передачу даних на швидкостях усього 15 кілобіт за се-

кунду на терміналах розміром із смартфон, і декілька сотень кілобіт за секунду на терміналах із великими антенами, розміром трохи більше ноутбука [4].

### Мета

Розробити концепцію системи супутникового мобільного зв'язку, що використовує КА на середніх орбітах, у якій проблема низького енергоживлення наземних мобільних терміналах пропонується вирішити шляхом використання пасивних пристроїв з ретрорефлекторами, що модулюють відбитий сигнал.

### Порівняння систем із різною висотою КА

У праці [5] проведено дослідження умов знаходження КА у зоні видимості наземного терміналу. Зокрема, умову видимості можна отримати з географічних координат терміналу і супутника (у проекції на земну поверхню), а також його висоти над поверхнею Землі.

З рис. 2 можна отримати геометричну ймовірність знаходження КА у зоні видимості, яка дорівнює відношенню тілесного кута видимої частини небесної сфери до повного тілесного кута. Після перетворень отримуємо вираз для цієї ймовірності:

$$p = \frac{0,5h}{R+h},$$

де  $h$  — висота КА;  $R$  — радіус Землі.

Якщо система працює із КА з різними радіусами і різним нахилом орбіт, то наближено можна вважати рух супутників на орбіті випадковим, оскільки від першого параметру залежить період обертання супутника, а від другого частота прецесії. Якщо припустити високі значення нахилу орбіт, можна також вважати розподіл на поверхні Землі наближено рівномірним.

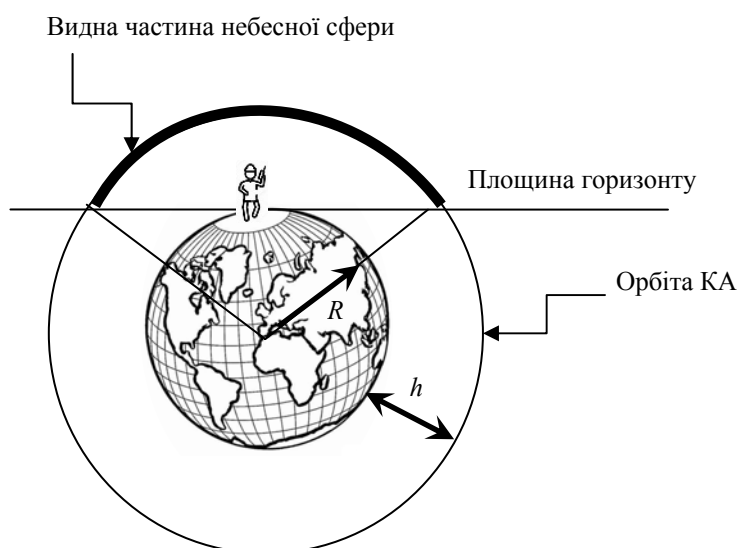


Рис. 2. Визначення геометричної ймовірності знаходження КА у зоні видимості

Було проведено комп'ютерне моделювання роботи супутникової телекомунікаційної системи для різної кількості космічних апаратів і різних параметрів їхніх орбіт з метою визначення умов досягнення глобального покриття. Для цього було розроблено і протестовано комп'ютерну 3D модель руху штучних супутників Землі, яка дозволяє візуалізувати траєкторію руху космічного апарату, а також побудувати центральну проекцію його положення на поверхню Землі. Також розроблена модель дозволяє відображати максимальну зону покриття (зону видимості) супутника, що є корисним інструментом при проектуванні телекомунікаційних і навігаційних систем, які містять космічний сегмент. У моделі можливо задавати різноманітні параметри орбіти (ефемериди), зокрема радіус орбіти (або параметри еліптичної орбіти в більш складному варіанті), нахил площини орбіти до екваторіальної площини, орієнтацію орбіти відносно нульового меридіану, а також початкове положення і напрямку руху супутника на орбіті. Можливо також додатково задавати параметри прецесії і нутації орбіти.

Період обертання супутника розраховується за третім законом Кеплера.

Рівняння для кругової орбіти супутника задається параметрично; для симуляції обертання використовуються відповідні матриці повороту. Трек (проекція) супутника на поверхню Землі являє собою просторову криву Келлі.

Модель реалізовано у двох системах відліку: у нерухомій системі (пов'язаній із космосом) — у ній орбіта стала, а Земля обертається, та у системі відліку, пов'язаною із Землею — у ній площина орбіти обертається, а Земля нерухома. Було реалізовано комп'ютерну симуляцію у вигляді 3D анімації, що містить синхронізовані моделі в обох цих системах відліку.

Зона покриття (видимості) для кожного супутника розраховувалась за методикою, описаною у праці [5].

Дане моделювання підтверджує зроблені висновки щодо доцільності використання середніх орбіт.

На рис. 3 наведено результат моделювання руху КА з періодом обертання 4 год і нахилом орбіти  $60^\circ$ .

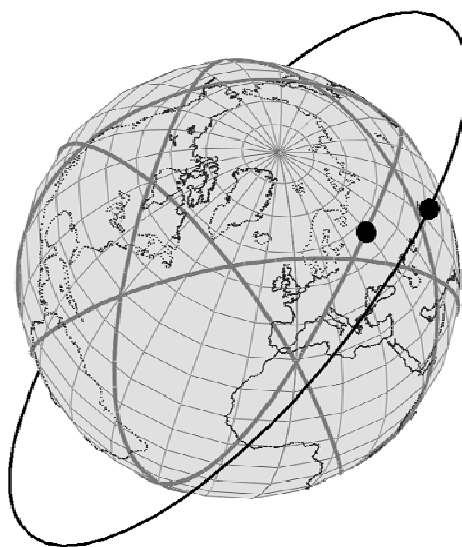


Рис. 3. Приклад моделювання руху КА для визначення зон покриття. Показано проекцію КА на поверхню Землі і трек цієї проекції у процесі обертання Землі і руху КА по орбіті

Виходячи з припущення рівномірного випадкового розміщення КА на небесній сфері, можна задати критичну ймовірність, за якою хоча б один супутник потрапляє у зону видимості. Тоді мінімальна кількість супутників, що задовольняє цій ймовірності, дорівнює:

$$n = \frac{\log(1 - P_k)}{\log\left(1 - \frac{0,5h}{R + h}\right)},$$

де  $h$  — висота КА;  $R$  — радіус Землі;  $P_k$  — критична (мінімальна припустима) ймовірність потрапляння КА у зону видимості.

На рис. 4 наведено залежності мінімальної необхідної кількості КА від критичної ймовірності для різних висот орбіт. Видно, що середні орбіти вимагають значно меншої кількості КА. Наприклад, для покриття всієї земної поверхні із надійністю 0,9999 необхідно майже 250 КА для висоти 500 км і тільки 28 КА для висоти 8000 км.

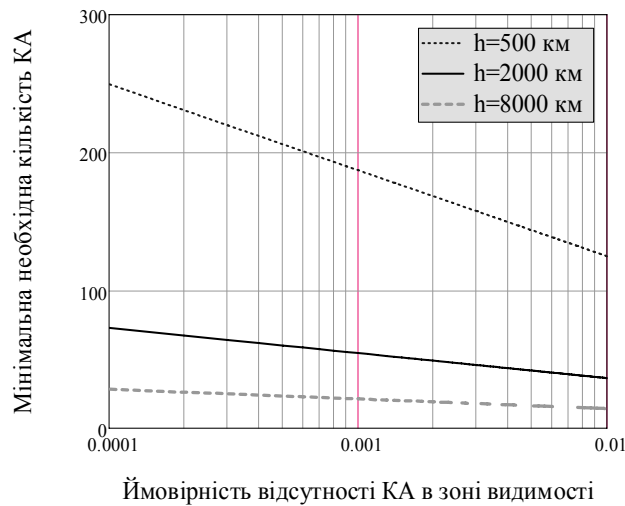


Рис. 4. Відповідність між кількістю супутників і критичною ймовірністю для різних значень висоти орбіти

Час перебування у зоні видимості КА залежно від висоти можна оцінити із співвідношення:

$$t(h) = \frac{2(R+h)^2 \arccos\left(\frac{R}{R+h}\right)}{\sqrt{GM}},$$

де  $h$  — висота КА;  $R$  — радіус Землі;  $G$  — гравітаційна стала;  $M$  — маса Землі.

Із рис. 5, що відображає цю залежність, видно, що цей час нелінійно зростає із збільшенням ви-

соти, що є іншою ілюстрацією суттєвого зменшення необхідної кількості КА для середніх орбіт порівняно із низькими.

Дана залежність не враховує рух земної поверхні внаслідок добового обертання Землі, тож час видимості буде зростати швидше для орбіт з низьким нахилом, на яких КА обертаються за напрямком обертання Землі. В граничному випадку для геостаціонарної орбіти він прямує до нескінченості.

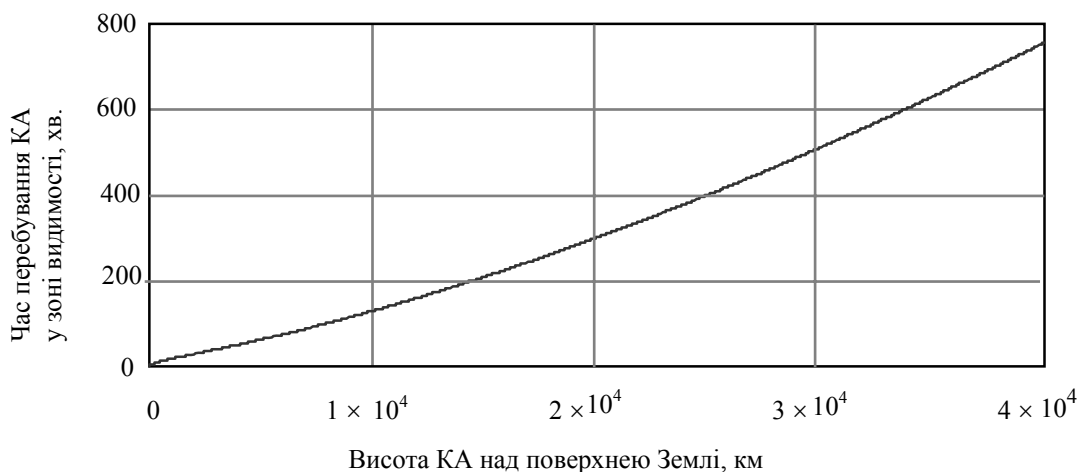


Рис. 5. Час перебування у зоні видимості КА залежно від висоти

### Концепція використання пасивних терміналів

З точки зору мобільності термінальних пристроїв одним з головних їх параметрів є низьке енергоспоживання. Його дуже важко досягти, особливо якщо необхідно надсилати сигнал до супутників на середніх і високих орбітах. Для забезпечення необхідного співвідношення енергії біта до спектральної щільності шуму зазвичай

або підвищують потужність сигналу або тривалість одного біту. Перше веде до підвищення енергоспоживання, а друге до зменшення швидкості передачі інформації. Але енергоспоживання критичне тільки для термінальних пристроїв, але не для КА. Тому було розроблено концепцію пасивних терміналів, що використовують модулюючі ретрорефлектори, які відбивають сигнал у напрямку, із якого він прийшов.

Найпростішим ретрорефлектором є кутовий відбивач з трьома взаємно перпендикулярними площинами. Якщо ретрорефлектор модулює відбитий сигнал, то це дає можливість передавати

інформацію від терміналу без використання енергії на випромінювання, а тільки для модуляції відбитого сигналу. На рис. 6 проілюстровано вигляд такої системи.

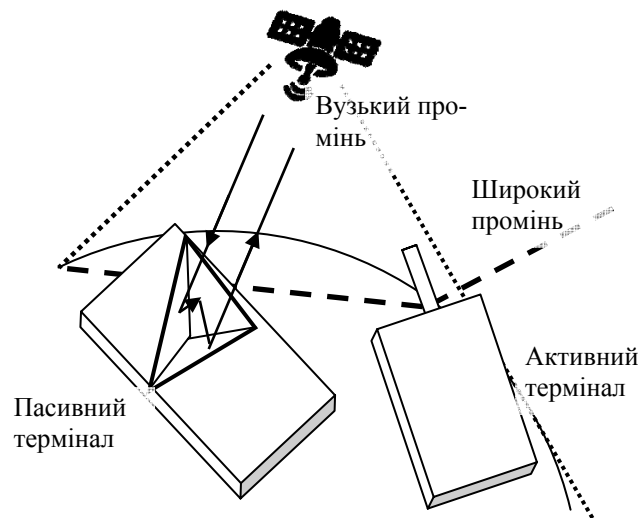


Рис. 6. Співвідношення променів КА і звичайного (активного) наземного терміналу

Модуляція відбитого сигналу може бути здійснена за допомогою різних фізичних явищ. Одним із підходів може бути використання рідких кристалів (РК). Електричне керування діелектричної проникності може бути використане для фазової модуляції відбитого променя. Відомі РК, що працюють у мікрохвильовому діапазоні, який зазвичай використовується у космічних системах зв'язку. Наприклад, у праці [6] дослідження поведінки РК у мікрохвильовому діапазоні частоті показано можливість електричного керування фазовим зсувом відбитої хвилі.

Іншою технологією модуляції відбитого сигналу може бути використання метаматеріалів. Метаматеріали складаються із збірок з декількох елементів, виготовлених із композитних матеріалів, таких як метали та пластик. Комірки, зазвичай розташовані у повторюваних патернах, у масштабах, менших за довжину хвиль явищ, на які вони впливають. Метаматеріали отримують свої властивості не від властивостей основних матеріалів, а від сконструйованих структур. Їх точна форма, геометрія, розмір, орієнтація та розташування надають їм унікальні властивості, здатні маніпулювати електромагнітними хвилями: поглинаючи, посилюючи або повертаючи площину поляризації хвилі, щоб досягти переваг, що виходять за рамки можливих із звичайними матеріалами. У праці [7], наприклад, було досліджено можливість зміни площини поляризації відбитої електромагнітної хвилі у діапазоні 2,75–4 ГГц. Очевидно, що витрати енергії на модуляцію відбитого сигналу будуть значно нижчі, ніж на повноцінне випромінювання радіохвилі.

Таким чином, за допомогою РК або мета матеріалів можна здійснювати фазову та/або поляризаційну модуляцію відбитого сигналу, що може бути основою пасивного мобільного термінального пристрою із низьким енергоспоживанням.

Кількісні розрахунки показують, що використання таких пасивних пристроїв має перевагу в енергетичному відношенні порівняно із активними терміналами. Дійсно, хоча площа апертури антени на КА може відрізнятись на 4 порядки від площі апертури мобільного пристрою (5×5 метрів для КА проти 5×5 сантиметрів для терміналу), цей вигравш менше ніж відношення потужностей цих сегментів. Якщо мобільний пристрій має типову потужність випромінювання 1 Вт, то потужність передавача КА може скласти 10 кВт. Треба також прийняти до уваги той факт, що ширина променя випромінювання антени наземного мобільного терміналу значно ширша за аналогічну ширину променя КА, що націлений на певну зону покриття і традиційно виконується у вигляді цифрової антенної решітки (ЦАР).

Рис. 6. ілюструє цю перевагу. Зазвичай дана оцінка не враховує втрати електромагнітної енергії під час відбиття хвилі від ретрорефлектора. Для більш точної оцінки необхідно провести додаткові розрахунки після вибору типу і розробки конструкції даних ретрорефлекторів. Ще однією перевагою підходу з використанням модулюючих ретрорефлекторів є автоматичне часове розділення каналів (TDMA) між зонами із різною часовою затримкою відбитого сигналу. Такі зони мають форму кілець різного радіусу (рис. 7). У межах однієї зони можна використовувати кодове (CDMA) і поляризаційне розділення каналів.

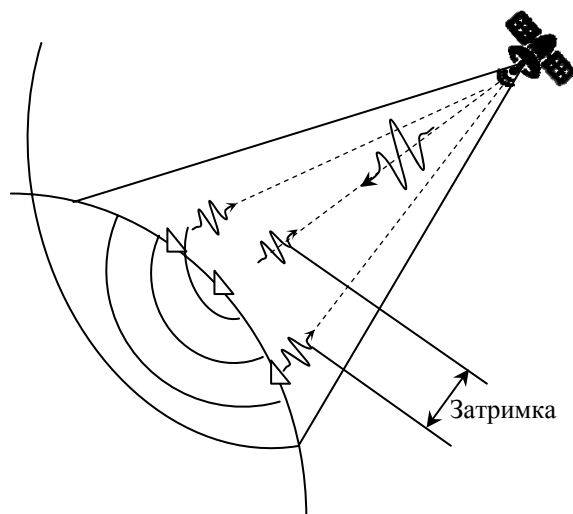


Рис. 7. Кільцеві зони із різною затримкою відбиття внаслідок різної довжини променів

### Висновки

У даній роботі проведено якісне і кількісне порівняння систем супутникового мобільного зв'язку із різними висотами орбіт КА. Показано перспективність розробки таких систем для орбіт із середньою висотою (кілька тисяч кілометрів). Можна стверджувати, що майже 100 % покриття земної поверхні може бути досягнуто усього декількома десятками супутників, при цьому відстань до поверхні Землі буде достатньо малою, що забезпечить високе співвідношення сигнал/шум і, як наслідок, високу швидкість передачі інформації.

Було проведено комп'ютерне моделювання роботи супутникової телекомунікаційної системи для різної кількості космічних апаратів і різних параметрів їхніх орбіт з метою визначення умов досягнення глобального покриття. Дане моделювання підтверджує зроблені висновки щодо доцільності використання середніх орбіт.

Була запропонована концепція використання пасивних терміналів на основі модулюючих ретрорефлекторів, тобто відбиття сигналу супутників наземним терміналом без випромінювання власної електромагнітної енергії. При цьому енергія терміналів витрачається тільки на модуляцію сигналу, що відбивається. Крім того, на відміну від традиційних (активних) терміналів, які у мобільному варіанті не можуть спрямувати вузький промінь радіохвиль точно у напрямку КА, термінали із ретрорефлекторами забезпечують надвузький, напрямлений точно на КА, промінь. Даний підхід дозволить значно знизити енергоспоживання наземних терміналів і підвищити тим самим мобільність.

Ще однією перевагою використання пасивних терміналів є автоматичне формування кільцевих зон із рівною затримкою відбитого сигналу. Цей ефект дає можливість використовувати часове розділення каналів, додатково збільшуючи кількість терміналів, що можуть працювати одночасно. Фазову та поляризаційну модуляцію сигналу запропоновано здійснювати за допомогою рідких кристалів або метаматеріалів.

### ЛІТЕРАТУРА

1. **Ram S. Jakhu.** Iridium-Cosmoscol lisionan ditsimplications for spaceoperations. Yearbookon Space Policy. Springer, Vienna, 2008/2009. P. 254–275.
2. **Stuff in space.** URL: <http://stuffin.space> (data access 13.11.2019).
3. **SpaceX** — офіційний сайт. URL: <https://www.spacex.com>(dataaccess 11.11.2019).
4. **Thuraya** — офіційний сайт. URL: <https://www.thuraya.com> (dataaccess 08.11.2019).
5. **Муригін С. Ю.,** Зудов О. М., Горіна В. В. Комп'ютерне моделювання глобальних навігаційних супутникових систем. *Проблеми інформатизації та управління.* 2015. №4(52). С. 99–105.
6. **Kuki T., Fujikake H., Nomoto T.** Microwave variable delay line using dual-frequency switching-mode liquid crystal. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* Nov 2002. Vol. 50, Issue 11. 2604-2609.
7. **BoZhu, YijunFeng, JunmingZhao, CiHuang, ZhengbinWang, TianJiang.** Polarization modulation by tunable electromagnetic metamaterial reflector/absorber. *Optics Express.*2010.Vol. 18.No. 22. Pp. 23196-23203.

**Зудов О. М., Рибасова Н. О., Горіна В. В.**

## **СИСТЕМА МОБІЛЬНОГО СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ З ПАСИВНИМИ ТЕРМІНАЛАМИ НА ОСНОВІ МОДУЛЮЮЧИХ РЕТРОРЕФЛЕКТОРІВ**

*У роботі проведено якісне і кількісне порівняння систем супутникового мобільного зв'язку із різними висотами орбіт космічних апаратів. Проведено дослідження умов знаходження космічного апарата у зоні видимості наземного терміналу і аналіз часу перебування супутника у зоні видимості залежно від висоти орбіти. За результатами цього аналізу, а також приймаючи до уваги той факт, що зона низьких орбіт навколо Землі дуже щільно заповнена штучними супутниками і космічним сміттям, можна зробити висновок про доцільність збільшення радіусу орбіти телекомунікаційних супутників. В той же час геостаціонарна орбіта, яка має очевидні переваги з точки зору покриття, також досить щільно заповнена космічними апаратами, і крім того є дуже високою для ефективної роботи малопотужних мобільних наземних терміналів. Приймаючи до уваги ці особливості, зроблено висновок про перспективність використання середніх орбіт для телекомунікаційних супутникових систем, для яких глобальне покриття земної поверхні може бути досягнуто за допомогою декількох десятків супутників. При цьому відстань до поверхні Землі буде достатньо малою, щоб забезпечити високе співвідношення сигнал/шум і, як наслідок, система зможе забезпечити високу швидкість передачі інформації. Було проведено комп'ютерне моделювання роботи супутникової телекомунікаційної системи для різної кількості космічних апаратів і різних параметрів їхніх орбіт з метою визначення умов досягнення глобального покриття. Дане моделювання підтверджує зроблені висновки щодо доцільності використання середніх орбіт. У роботі була запропонована концепція використання пасивних терміналів на основі модулюючих ретрорефлекторів, тобто відбиття сигналу супутників наземним терміналом без випромінювання власної електромагнітної енергії. При цьому енергія терміналів витрачається тільки на модуляцію сигналу, що відбивається. Даний підхід дозволить значно знизити енергоспоживання наземних терміналів і підвищити тим самим мобільність. Фазову та поляризаційну модуляцію сигналу запропоновано здійснювати за допомогою рідких кристалів або метаматеріалів.*

**Ключові слова:** супутниковий зв'язок; глобальне покриття; ретрорефлектор; пасивний термінал.

**Zudov O. M., Rybasova N. O., Gorina V. V.**

## **MOBILE SATELLITE COMMUNICATION SYSTEM WITH PASSIVE TERMINALS BASED ON MODULATING RETRO-REFLECTORS**

*In this work, a qualitative and quantitative comparison of satellite mobile communications systems with various altitudes of the orbits of spacecraft was carried out. A study of the conditions for the spacecraft to be located in the visibility range of the ground terminal and an analysis of the time spent by the satellite in the visibility zone depending on the height of the orbit was made. According to the results of this analysis and taking into account the fact that the low orbit area around the Earth is very densely filled with artificial satellites and space debris, it can be concluded that it is advisable to increase the radius of the orbit of telecommunication satellites. At the same time the geostationary orbit, which has obvious advantages in terms of coverage, is also quite densely filled with spacecraft, and is very high for the efficient operation of low-power mobile ground terminals. Taking into account these features, it is concluded that the use of medium-height orbits for telecommunication satellite systems is promising for which global coverage of the Earth's surface can be achieved using several dozen satellites. In addition, the distance to the Earth's surface will be small enough to provide a high signal-to-noise ratio and, as a result, the system will provide a high bitrate. A computer simulation of the operation of a satellite telecommunication system was carried out for a different number of spacecraft and various parameters of their orbits in order to determine the conditions for achieving global coverage. This simulation confirms the conclusions regarding the feasibility of using medium orbits. The concept of using passive terminals based on modulating retroreflectors was proposed. It means the reflection of a satellite signal by a ground terminal without emitting its own electromagnetic energy. The energy of the terminals is spent only on the modulation of the reflected signal. This approach will significantly reduce the energy consumption of ground terminals and thereby increase mobility. It is proposed to carry out phase and polarization modulation of the signal using liquid crystals or metamaterials.*

**Keywords:** satellite communications; global coverage; retroreflector; passive terminal.

Зудов О. Н., Рибасова Н. А., Горина В. В.

## СИСТЕМА МОБИЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ С ПАССИВНЫМИ ТЕРМИНАЛАМИ НА ОСНОВЕ МОДУЛИРУЮЩИХ РЕТРОРЕФЛЕКТОРОВ

*В работе проведено качественное и количественное сравнение систем спутниковой мобильной связи с различными высотами орбит космических аппаратов. Проведено исследование условий нахождения космического аппарата в зоне видимости наземного терминала и анализ времени пребывания спутника в зоне видимости в зависимости от высоты орбиты. По результатам этого анализа, а также принимая во внимание тот факт, что зона низких орбит вокруг Земли очень плотно заполнена искусственными спутниками и космическим мусором, можно сделать вывод о целесообразности увеличения радиуса орбиты телекоммуникационных спутников. В то же время геостационарная орбита, которая имеет очевидные преимущества с точки зрения покрытия, также достаточно плотно заполнена космическими аппаратами, и кроме того очень высока для эффективной работы маломощных мобильных наземных терминалов. Принимая во внимание эти особенности, сделан вывод о перспективности использования средних орбит для телекоммуникационных спутниковых систем, для которых глобальное покрытие земной поверхности может быть достигнуто с помощью нескольких десятков спутников. При этом расстояние до поверхности Земли будет достаточно малым, чтобы обеспечить высокое соотношение сигнал / шум и, как следствие, система обеспечит высокую скорость передачи информации. Было проведено компьютерное моделирование работы спутниковой телекоммуникационной системы для различного количества космических аппаратов и различных параметров их орбит с целью определения условий достижения глобального покрытия. Данное моделирование подтверждает сделанные выводы относительно целесообразности использования средних орбит. В работе была предложена концепция использования пассивных терминалов, на основе модулирующих ретроорефлектора, то есть отражение сигнала спутников наземным терминалом без излучения собственной электромагнитной энергии. При этом энергия терминалов расходуется только на модуляцию сигнала отражается. Данный подход позволит значительно снизить энергопотребление наземных терминалов и повысить тем самым мобильность. Фазовую и поляризационную модуляцию сигнала предложено осуществлять с помощью жидких кристаллов или метаматериалов.*

**Ключевые слова:** спутниковая связь; глобальное покрытие; ретро рефлектор; пассивный терминал.

Стаття надійшла до редакції 27.10.2019 р.

Прийнято до друку 01.12.2019 р.