

СИСТЕМИ НАВИГАЦІЇ, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ ТА ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

УДК 621.375

Г.В. Альошин¹, О.В. Коломійцев², Д.В.Карлов²¹ Українська державна академія залізничного транспорту, Україна, Харків² Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Україна, Харків

ШЛЯХИ ЗБІЛЬШЕННЯ ОБ'ЄМІВ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ В СИСТЕМАХ СУПУТНИКОВОГО КОСМІЧНОГО ЛАЗЕРНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Запропоновано для системи супутникового космічного лазерного зв'язку використання подовжніх мод (несучих частот) єдиного лазера-передавача. Селекція подовжніх мод зі спектру одномодового багаточастотного з синхронізацією подовжніх мод лазерного випромінювання (ЛВ) дозволить створити багатоканальний взаємозв'язок між супутниками і тощо. Запропонована блок-схема селектору подовжніх мод (СПМ). Розкрита сутність роботи СПМ. Отримані аналітичні вирази для розрахунку інтенсивності ЛВ з виходів інформаційних каналів СПМ.

Ключові слова: система супутникового (космічного) лазерного зв'язку, інформація, лазерне випромінювання, селектор подовжніх мод

Вступ. Супутники першого покоління для обміну даними використовували радіо хвилі. Їх можливості були обмежені. Проте, час йде і сучасні технології зробили крок далеко уперед. Супутниковий зв'язок розвивається і останні досягнення в цій області говорять про величезний потенціал в розширенні пропускної спроможності каналів передачі інформації.

Двосторонній супутниковий інтернет, телефонія, корпоративна супутникова мережа, мобільний супутниковий зв'язок, відео-конференц-зв'язок, аудіо-конференц-зв'язок, передача даних різного об'єму, супутникові канали зв'язку – ось не повний список можливостей супутникового зв'язку. Показник даних в стократ підвищений за рахунок використання сучасних лазерних джерел випромінювання. Створення лазера дозволило вирішити широке коло завдань, які сприяли значному розвитку науки і техніки. Це дозволило отримати такі розробки як: волоконно-оптичні лінії зв'язку, лазерне наведення і цілевказівку, а також лазерний зв'язок.

Постановка проблеми. Одним з перспективних напрямів розвитку систем супутникового космічного зв'язку, є системи, що засновані на передачі інформації по лазерному каналу, оскільки ці системи можуть забезпечити велику пропускну спроможність, при меншому енергоспоживанні, габаритних розмірах і масі приймально-передавальної апаратури, чим системи радіозв'язку (супутники першого покоління), що використовуються в даний момент.

Потенційно системи космічного лазерного зв'язку можуть забезпечувати високу швидкість передачі інформації (інформаційного потоку) – від 10-100 Мбіт/с до 1-10 Гбіт/с і вище. Експерименти по реалізації систем лазерного зв'язку для передачі великих масивів інформації ведуть усі високо-технічно розвинені країни світу.

Таким чином, збільшення об'ємів передачі

інформації в системах супутникового (космічного) лазерного зв'язку є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз літератури. Аналіз існуючих робіт [1] та результатів експериментальних даних [2] тощо, які присвячені також питанням створення систем супутникового космічного лазерного зв'язку та оптичних систем зв'язку з частотним ущільненням каналів показує, що можливе з'єднання несучих для системи з частотним ущільненням каналів, але неможливе виділення несучих частот (подовжніх мод) для формування інформаційних каналів.

Мета статті. Розробка шляхів збільшення об'ємів передачі інформації в системах супутникового космічного лазерного зв'язку та пропозиції щодо використання селекції подовжніх мод єдиного лазера-передавача для створення багатоканального взаємозв'язку між супутниками і тощо.

Основний матеріал. Сучасні міжсупутникові лазерні системи зв'язку дозволяють передавати інформацію зі швидкістю до 600 Мбіт/с і дальністю дії від 1 до 6 тис. км (лінії низькоорбітальний космічний апарат (КА) – НКА) від 30 до 46 тис. км (лінії НКА – геостационарний КА). Приклад такої системи Росії представлений на рисунку 1.



Рис. 1. – Система супутникового зв'язку

Американське космічне агентство NASA розгорнуло лазерну систему OPALS (Optical Payload for Lasercomm Science), яка є експериментальним майданчиком для розробки технологій лазерних космічних комунікацій (зв'язку), що забезпечує обмін великими об'ємами інформації. Технологія космічного лазерного зв'язку (LLCD) вже, у 2017 році, показала дуже високу ефективність передачі даних на відстані близько 400 тис. км. Система LLCD здатна працювати краще за звичайні радіопередавачі і забезпечити передачу даних на Землю із швидкістю 622 Мб/с та отримувати із швидкістю 20 Мб/с (рис. 2).



Рис. 2. – Система космічного лазерного зв'язку

Крім того, LLCD здатна перемикається від однієї наземної станції до іншої, фіксуючись на певній станції без необхідності використання радіосигналу.

Європейська система передачі даних European Data Relay System (EDRS) – угруповання сучасних геостационарних супутників (у кількості 3-х), які здійснюватимуть передачу інформації між супутниками, КА, безпілотними літальними апаратами і наземними станціями, які забезпечують швидшу в порівнянні з традиційними методами передачі даних швидкість, навіть в умовах природних і техногенних катастроф. EDRS використовує нову технологію лазерного зв'язку Laser Communication Terminal (LCT).

Лазерний термінал дозволяє передавати інформацію із швидкістю 1,8 Гбіт/с. Технологія LCT надає можливість супутникам системи EDRS передавати і отримувати близько 50 терабайт даних в день практично у режимі реального часу (рис. 3).

До переваг лазерного зв'язку, в порівнянні з радіозв'язком, можливо віднести наступні:

- передача інформації на великі відстані;
- висока швидкість передачі інформації;
- компактність і легкість пристроїв для передачі інформації (даних);
- енергоефективність.

До недоліків лазерного зв'язку можливо віднести наступні:

- необхідність точного наведення приймальних і передавальних пристроїв;
- атмосферні проблеми (хмарність, пилю, турбулентність і тощо).

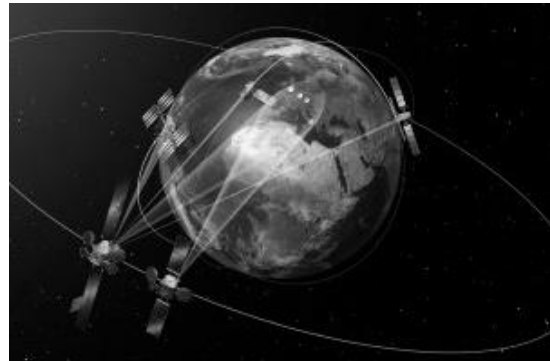


Рис. 3. – Система European Data Relay System

Отже, лазерний зв'язок дозволяє передавати дані на набагато більші відносно радіозв'язку відстані, швидкість передачі завдяки високій концентрації енергії і набагато більш високій несучій частоті (на порядки) також вище. Енергоефективність, низька вага і компактність також на порядки краще.

Ускладнення у вигляді необхідності точного наведення приймальних і передавальних пристроїв можна вирішити сучасними технічними засобами. Крім того, приймальні наземні пристрої можна розташовувати в районах Землі, де кількість хмарних днів мінімальна.

Як відомо, безпроводний лазерний зв'язок – це вид оптичного зв'язку, що використовує електромагнітні хвилі оптичного діапазону (світло), що передаються через вакуум (атмосферу).

Лазерний зв'язок двох об'єктів здійснюється тільки за допомогою з'єднання типу «точка-точка». Технологія ґрунтується на передачі даних модульованим випромінюванням в інфрачервоній частині спектру через вакуум (атмосферу).

Передавачем служить потужний лазер-передавач. Інформація поступає у приймально-передавальний модуль, в якому кодується різними завадостійкими кодами, модулюються оптичним лазерним випромінювачем і фокусується оптичною системою передавача у вузьке колімоване ЛВ і передається у вакуум (атмосферу).

На приймаючій стороні оптична система фокусує оптичний сигнал на високочутливий фотодіод (лавинний фотодіод), який перетворює оптичний пучок в електричний сигнал. При цьому чим вище частота (до 1,5 ГГц), тим більше об'єм інформації, що передається. Далі сигнал демодулюється і перетворюється у сигнали вихідного інтерфейсу.

Довжина хвилі варіюється у межах 700-950 нм (1550 нм), залежно від лазерного діода, що використовується.

Отже, ключовими елементами для здійснення

лазерного зв'язку є лазер-передавач та високочутливий фотодіод (лавинний фотодіод).

Однак, при цьому не звертається увага на багаточастотність спектру ЛВ. Тому, одним з шляхів вирішення задачі збільшення об'ємів передачі інформації в системах супутникового космічного лазерного зв'язку є частотна селекція «інформаційних» каналів ЛВ. Спектр одномодового багаточастотного лазера-передавача має набір подовжніх мод (частот). Причому, рознесення цих частот на відстані міжмодових биттів, достатньо велике для їх селекції.

Зі спектру такого ЛВ за допомогою селектора подовжніх мод [2] можливо виділити необхідні подовжні моди (несучі частоти), які відповідають кожному з «інформаційних» каналів (рис. 4).

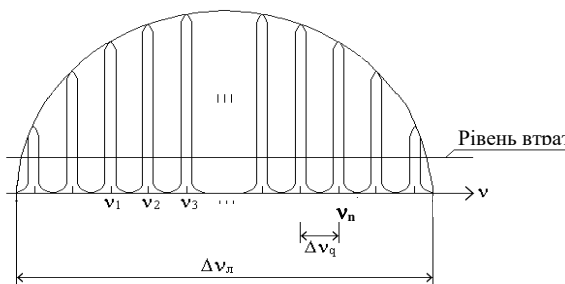


Рис. 4. – Спектр одномодового багаточастотного із синхронізацією подовжніх мод ЛВ

При цьому розширюються можливості системи зв'язку для будь-якої модуляції інформаційного каналу модуляцією подовжньої моди. Причому набір несучих частот береться з того ж єдиного лазера-передавача.

Лазерні сигнали N інформаційних каналів для зв'язку з КА (супутниками) використовують окремі несучі частоти (подовжні моди). При цьому, частотна розв'язка повинна задовольняти необхідну якість.

Відомо, що багаточастотна генерація подовжніх мод з спектральною шириною, близькою до дійсної ширини емісійної лінії цього лазерного переходу, найбільш зручна для синхронізації мод, оскільки ефективність такого режиму зростає із збільшенням числа N генерованих подовжніх мод. Тому дослідження особливостей синхронізації подовжніх мод корисно проводити за результатами напівкласичної теорії Лемба [4].

У запропонованій Лембом теоретичної моделі багаточастотного лазера електричне поле у резонаторі, що описується у рамках класичної теорії електромагнітного поля, викликає появу макроскопічної поляризації активного середовища, що обчислюється на основі квантово-механічних представлень.

Цей факт, з урахуванням відомих рівнянь Максвелла, дозволяє отримати замкнуту систему рівнянь для амплітуд, частот і фаз, генерованих

оптичних коливань. Напівкласична теорія дозволяє розглянути такі явища, як: затягування, насичення, відхід і конкуренцію мод, а також синхронізацію подовжніх мод.

Аналітичні вирази для розрахунку електричного поля $E(t)$ кожної моди, що знаходиться у спектрі такого ЛВ можливо отримати з відомого [4]:

$$E_n(t) = A_n(1 + \delta \cos \Delta v' t) \cos v_n t + \varphi_n \quad (1)$$

де A_n – амплітуда n -ої моди; δ – глибина модуляції; φ_n – фаза n -ої моди; v_n – частота n -ої моди; $\Delta v'$ – частота міжмодових биттів; t – час.

Таким чином, для подовжніх мод, які будуть виділені СПМ, маємо:

$$\begin{aligned} E_2(t) &= A_2(1 + \delta \cos \Delta v' t) \cos v_2 t + \varphi_2 \\ E_3(t) &= A_3(1 + \delta \cos \Delta v' t) \cos v_3 t + \varphi_3 \\ E_4(t) &= A_4(1 + \delta \cos \Delta v' t) \cos v_4 t + \varphi_4 \end{aligned} \quad (2)$$

Враховуємо, що у вираз (2) входять складові:

$$\begin{aligned} A_n \delta \cos \Delta v' t \cos(v_n t + \varphi_n) &= \\ = \left(\frac{A_n \delta}{2} \right) \left\{ \cos[(v_n + \Delta v') + \varphi_n] + \right. & \\ \left. + \cos[(v_n - \Delta v') + \varphi_n] \right\} & \end{aligned} \quad (3)$$

тоді, для подовжніх мод, що виділяються СПМ, буде справедливо записати наступне:

$$\begin{aligned} A_2 \delta \cos \Delta v' t \cos(v_2 t + \varphi_2) &= \\ = \left(\frac{A_2 \delta}{2} \right) \left\{ \cos[(v_2 + \Delta v') + \varphi_2] + \right. & \\ \left. + \cos[(v_2 - \Delta v') + \varphi_2] \right\} & \\ A_3 \delta \cos \Delta v' t \cos(v_3 t + \varphi_3) &= \\ = \left(\frac{A_3 \delta}{2} \right) \left\{ \cos[(v_3 + \Delta v') + \varphi_3] + \right. & \\ \left. + \cos[(v_3 - \Delta v') + \varphi_3] \right\} & \\ A_4 \delta \cos \Delta v' t \cos(v_4 t + \varphi_4) &= \\ = \left(\frac{A_4 \delta}{2} \right) \left\{ \cos[(v_4 + \Delta v') + \varphi_4] + \right. & \\ \left. + \cos[(v_4 - \Delta v') + \varphi_4] \right\} & \end{aligned} \quad (4)$$

Аналітичні вирази для розрахунку інтенсивності ЛВ з виходів кожного з каналів СПМ можливо записати у наступному вигляді [5]:

$$I_{i+4,i} \approx T_0 * (1 - T_0 J(\gamma_{i+3,i})) * \dots * (1 - T_0 J(\gamma_{4,i})) * \\ * (1 - T_0 J(\gamma_{3,i})) * (1 - T_0 J(\gamma_{2,i})) * (1 - T_0 J(\gamma_{1,i})) \quad (5)$$

де i – номер каналу СПМ; $i=4$ – номер подовжньої моди, яка виділяється (випромінюється) каналом

СПМ; $T_0 = \left(\frac{1 - Re i \delta - \varepsilon}{1 - Re i \delta} \right)^2$ – абсолютне значення максимуму пропускання (при різниці оптичного ходу кратної половині λ); $Re i \delta = \sqrt{\eta_1 \eta_2}$; η_1, η_2 –

коефіцієнти відбиття кожного з дзеркал ІФП;

$$\gamma = \frac{2t}{\lambda} - E\left(\frac{2t}{\lambda}\right)$$
 – доли порядку інтерференції;

$$\gamma = E\left(\frac{2t}{\lambda}\right)$$
 – символ цілої частини; $2t$ – оптична різниця ходу;

З виразу (5) зрозуміло, що інтенсивність відселектованих СПМ подовжніх мод істотно зменшується у кожному подальшому каналі, накладаючись на початкову нерівномірність спектральних складових ЛВ. Подальше підсилення відселектованих спектральних складових оптичним квантовим підсилювачем (ОКП) в кожному окремому каналі СПМ дозволить усунути цю нерівномірність, а також забезпечити необхідну потужність ЛВ залежно від призначення і тактико-технічних характеристик системи зв'язку.

За результатами проведених теоретичних досліджень розроблена блок-схема СПМ, яка наведена на рисунку 5.

СПМ складається із N каналів, кожен з яких містять: оптичний поляризатор (Оп) випромінювання, пасивну фазову пластинку $\lambda/4$, що повертає вектор E ЛВ на кут 45° за один прохід скрізь неї, вузькосмуговий інтерферометр Фабрі-Перо (ІФП), що настроєний на прохід визначеної подовжньої моди (несучої частоти), оптичний квантовий підсилювач для підсилення вихідного ЛВ та допоміжні дзеркала для каналізації ЛВ з каналу в канал.

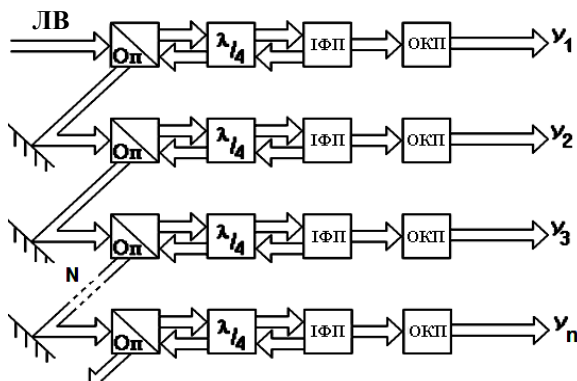


Рис. 5. – Селектор подовжніх мод

Принцип роботи СПМ полягає у наступному.

На вхід СПМ надходить одномодове багаточастотне із синхронізацією подовжніх мод ЛВ від лазера-передавача.

Груповий сигнал, що складений з подовжніх мод (несучих частот) проходить через Оп випромінювання і пасивну фазову пластинку $\lambda/4$, що повертає вектор E минаючого ЛВ на кут 45° за один прохід. Надходить на вузькосмуговий ІФП, що пропускає першу несучу частоту ν_1 , яка підсилюється ОКП. Таким чином здійснюється

виділення першої подовжньої моди (частоти ν_1), яка необхідна для формування першого інформаційного каналу.

Частина групового сигналу, що залишилась, відбивається дзеркалом вузькосмугового ІФП, повертається та довертається фазовою пластинкою ще на кут 45° . Виходить через бічну грань Оп випромінювання та направляються допоміжним дзеркалом у другий (наступний) канал. У цьому каналі відбувається виділення другої подовжньої моди таким же чином, як і для ν_1 . Для останніх N каналів відбувається виділення необхідних подовжніх мод (частот ν_n) таким же чином, як і для першого каналу. Таким чином здійснюється виділення необхідних подовжніх мод (несучих частот) зі спектру випромінювання єдиного лазера-передавача для подальшого формування N інформаційних каналів. Частина ЛВ, що залишилась після виділення необхідних подовжніх мод (несучих частот) через допоміжне дзеркало направляється у «ловушку». Кількість каналів СПМ залежить від того скільки знаходиться несучих частот вище рівня втрат у спектрі ЛВ (рис. 4).

Втратами ЛВ в оптичних елементах кожного каналу СПМ можна нехтувати [4]. Для інформаційних каналів системи зв'язку проблеми електромагнітної сумісності не існує, тому що смуги каналів після багатократного перетворення несучої (міжмодової) частоти дуже малі.

Недоліком виділення подовжніх мод може бути те, що потужність ЛВ повинна зростати майже пропорційно числу каналів і те, що динамічний діапазон фотодіода повинен відповідати додатній потужності сигналу, в залежності від числа каналів.

Висновки. Таким чином, найважливіші переваги лазерів над радіопередавачами полягають у тому, що вони пропонують набагато більш високу пропускну спроможність і, крім того, можливість передавати інформацію короткочасними імпульсами, що в перспективі дозволить понизити загальні витрати споживання живлення при передачі інформації на великі відстані.

Використання селекції подовжніх мод єдиного лазера-передавача для суміщення інформаційних каналів дозволить побудувати сучасну систему супутникового космічного лазерного зв'язку.

Селектор подовжніх мод, дозволяє виділити з одномодового багаточастотного із синхронізацією подовжніх мод ЛВ необхідні подовжні моди (несучі частоти ν_n) для подальшого формування N інформаційних каналів зв'язку.

Кількість інформаційних каналів (N) залежить від кількості подовжніх мод (ν_n), які мають необхідні вихідні характеристики для використання.

Список літератури:

1. Деланж. Широкополосные оптические системы связи. Часть II. Частотное уплотнение каналов. М.: «Мир». //Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. - Том 8. Вып. 10. - 1970. - С. 296-304.
2. Kudriashov V. 'Experimental Evaluation of Opportunity to Improve the Resolution of the Acoustic Maps'. In: Kountchev R. and Nakamatsu K. (eds.), *New Approaches in Intelligent Image Analysis, Intelligent Systems Reference Library 108*, - P. 353-373. Springer International Publishing Switzerland 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-32192-9_11, SJR: 0.154
3. Патент України на корисну модель № 35477, Україна, Н04 Q 1/453. Селектор подовжніх мод для багатоканальної передачі інформації / О.В. Коломійцев, Г.В. Альошин та ін. - № u200803492; заяв. 18.03.2008; опубл. 25.09.2008; Бюл. № 18. - 6 с.
4. Лэмб У. Теория оптических лазеров. "Квантовая электроника и квантовая радиофизика" / У. Лэмб, О. Богданович, О. Крохин. - М.: Мир. - 1966. - 436 с.
5. Коломійцев О.В. Приймально-передавальна частка лазерної інформаційно-вимірювальної системи з МЧЧМВ / О.В. Коломійцев, О.О. Копилов, С.І. Клівець, В.С. Кімов, Д.В. Руденко // Системи управління, навігації та зв'язку. - К.: ЦНДІ НiУ. - 2009. - Вип. 1(9). - С. 41-46.

References:

1. Delange. *Broadband optical communication systems. Part II. Frequency division multiplexing of channels. M.: "The World". // Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers. - Volume 8. Issue. 10. - 1970. - P. 296-304.*
2. Kudriashov V. 'The Experimental Evaluation of the Opportunity to Improve the Resolution of the Acoustic Maps'. In: Kountchev R. and Nakamatsu K. (eds.), *New Approaches in Intelligent Image Analysis, Intelligent Systems Reference Library 108*, pp. 353-373. Springer International Publishing Switzerland 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-32192-9_11, SJR: 0.154
3. The patent of Ukraine on corsna model № 35477, Ukraine, H04 Q 1/453. The selector of sub-modes for the bagatocannel gears / O.V. Kolomitsev, G.V. Al'oshin ta in. - No. u200803492; claiming. 18.03.2008; publ. 25.09.2008; Bul. №18. - 6 p.
4. Lamb W. Theory of optical masers. "Quantum Electronics and Quantum Radiophysics" / U. Lamb, O. Bogdanovich, O. Krokhin. - Moscow: Mir. - 1966. - 436 p.
5. Kolomitsev O.V. Priimalno-transpationary part of laser-informational-vimyryvalnoy system of MCHMMV / O.V. Kolomitsev, O.O. Kopilov, S.I. Klivets, V.S. Kimov, D.V. Rudenko // Sistemi upravleniya, navigatsii ta zv'yazku. - K.: ЦНДІ НiУ. - 2009. - Vip. 1 (9). - P. 41-46.

ПУТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ОБЪЕМОВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ СПУТНИКОВОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВЯЗИ

Г.В. Альошин, О.В. Коломійцев, Д.В.Карлов.

Предложено для системы спутниковой космической лазерной связи использование продольных мод (несущих частот) единственного лазера-передатчика. Селекция продольных мод из спектра одномодового многочастотного с синхронизацией продольных мод лазерного излучения (ЛИ) позволит создать многоканальную взаимосвязь между спутниками и т.д. Предложена блок-схема селектора продольных мод (СПМ). Раскрыта суть работы СПМ. Получены аналитические выражения для расчета интенсивности ЛИ с выходов информационных каналов СПМ.

Ключевые слова: система спутниковой космической лазерной связи, информация, лазерное излучение, селектор продольных мод

WAYS OF INCREASE VOLUMES OF INFORMATION TRANSFER IN THE SATELLITE LASER COMMUNICATION NETWORKS

G.V. Aloshin, O.V. Kolomiitsev, D.V. Karlov

The use of longitudinal modes (bearing frequencies) of only laser-transmitter is offered for a satellite space laser communication network. Selection of longitudinal modes from the spectrum of one-mode multifrequency with synchronization of longitudinal frequency of laser radiation (LR) will allow creating multichannel communication between satellites et cetera. The flow-chart of selector of longitudinal frequency (SLF) is offered. Essence of work of SLF is exposed. Analytical data was received for the calculation of LR intensity from the exits of informational channels of SLF.

Keywords: satellite space laser communication network, information, laser radiation, selector of longitudinal frequency