

УДК 621.396.4

DOI: 10.31673/2412-9070.2021.053439

Я. А. КРЕМЕНЕЦЬКА, доктор техн. наук;

А. О. МАКАРЕНКО, доктор техн. наук, професор;

С. Г. ЛАЗЕБНИЙ, канд. техн. наук;

В. І. КРАВЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент;

К. Д. БУТОЛІН, студент,

Державний університет телекомунікацій, Київ

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЄМНОСТІ СИГНАЛІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ЕФЕКТІВ ДЛЯ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ В РАДІО- ТА ОПТИЧНОМУ ДІАПАЗОНАХ

Перспективні системи зв'язку розвиваються в напрямку ускладнення конфігурації мереж, розширення спектра сигналів, інтеграції наземних, супутникових, волоконних, відкритих оптичних технологій. Поляризаційні методи оброблення сигналів, конвертація радіосигналів в оптичні домени є перспективними методами збільшення спектральної ефективності, а також зменшення впливу атмосфери. У статті проаналізовано способи зростання інформаційної ємності сигналів, принципові схеми волоконно-ефірного передавання в радіо- та оптичному діапазонах, зокрема в міліметровому діапазоні, з використанням поляризаційних ефектів для просторової модуляції інформаційних сигналів. Подібні схеми із застосуванням безпроводових ділянок мереж в оптичному і високочастотному радіодіапазонах та волоконних лініях можуть бути використані як у невеликих масштабах наземних мереж, так і в глобальному покритті.

Ключові слова: просторова модуляція; інформаційна ємність; поляризаційний сигнал; radio-over-fiber; міліметрові хвилі; телекомунікаційні системи.

ВСТУП

Основними вимогами до розвитку телекомунікаційних систем є зростання швидкості передавання, збільшення інформаційної ємності і навіть ефективність використання високих частот. Передовими вирішеннями таких проблем сьогодні є розробки технології множинного доступу (англ. *multiple input multiple output*, MIMO) з ортогональним частотним поділом каналів (англ. *orthogonal frequency-division multiple access*, OFDMA). Так, для стільникових систем 5G покоління технологія масивного MIMO вважається ефективним методом збільшення пропускної здатності системи завдяки формуванню кількох променів для спільного використання простору. Однак традиційним для зв'язку є застосування модуляції інформаційних сигналів, що ґрунтуються на зміні параметрів у часовому діапазоні, зокрема амплітуди, частоти та фази. Формування та оброблення таких сигналів потребують енергоємних та складних методів цифрового оброблення, а також нарощення вихідної потужності OFDMA сигналів внаслідок збільшення пік-фактора (англ. *peak-to-average power ratio*, PAPR). Амплітудні та фазові шуми електронних пристроїв також обмежують вихідну потужність сигналів, модульованих QAM методом високого порядку. Наприклад, квадратурна модуляція в безпроводовій ділянці в міліметровому діапазоні (ММД) на гігабітних швидкостях становить кілька метрів, оскільки фазовий шум обмежує вихідну потужність сигналу. Для майбутніх систем зв'язку передбачається IoT/ІоЕ, коли до мереж під'єднується безліч різних пристроїв через наземні та космічні лінії зв'язку, в яких задіюватимуться міліметровий діапазон та оптичний спектр сигналів. Для таких систем будуть потрібні вдосконалені і водночас прості схеми підімкнення, антени та інше високопродуктивне обладнання налаштування безпроводових модулів. Крім того, до майбутніх вузьконаправлених систем зв'язку паралельно буде долучено технології радіолокації та безпроводове передавання енергії. Однак реальні електромагнітні хвилі є векторною величиною, і вони мають просторові параметри, зокрема поляризацію та напрям поширення. Адже методи просторової модуляції сигналів не достатньо ефективно використовувалися в традиційних системах безпроводового зв'язку.

Останні удосконалені системи безпроводового зв'язку послуговуються частиною цих просторових ефектів. Прикладами використання просторової модуляції (*spatial modulation*, SM) є MIMO технологія з поляризаційним мультиплексуванням із застосуванням поляризаційно-чутливих компонент. У системах безпроводового зв'язку наступного покоління використання просторових параметрів потрібне для досягнення вищих швидкостей передавання даних, більшої ємності та ефективності застосування більш високих радіочастот, а також оптичного спектра. У волоконно-оптичних системах зв'язку використовують ущільнення за поляризацією (англ. *polarization division multiplexing*, PDM), а отже, поляризаційні ефекти активно застосовують у методах оброблення оптичних сигналів із залученням таких

компонентів, як оптичні поляризатори, волоконні дзеркала, обертачі і рефлектори зі збереженням поляризації. До таких самих технологій можна звертатись й у разі безпроводових оптичних систем.

Оптоелектронні методи є ключовим вирішенням для реалізації систем безпроводового зв'язку в міліметровому та терагерцовому діапазонах. Оптичні технології пропонуються для з'єднань між наземними станціями, безпілотними літальними апаратами, у космічних системах зв'язку та інших унікальних застосунках. Концепції повністю оптичного зв'язку висвітлюються у проєктах HydRON, «Fibre in the Sky» [1]. Оптоелектронні (фотонні) методи ефективно використовуються для формування та передавання радіосигналів міліметрового та терагерцового діапазонів, а також створення вузьконапрявленого випромінювання у фазованих антенних решітках. Методи оптичного гетеродинування та поляризаційного мультиплексування з успіхом використовуються у формуванні та передаванні радіосигналів у гібридних волоконно-ефірних системах [2; 3].

Однак привабливий оптичний спектральний потенціал для використання у відкритому просторі має істотні недоліки, зокрема поглинання, спотворення форми сигналу, завмирання, фазові флуктуації тощо, спричинені турбулентністю атмосфери. Показано, що найменше турбулентність атмосфери впливає на імпульсні методи модуляції [4; 5]. До того ж стани поляризації сигналу мають найбільш стабільні властивості порівняно з амплітудою [6; 7]. Амплітудний і особливо фазовий шум електронних пристроїв теж обмежує вихідну потужність височастотних сигналів, що лімітує відстань передавання. Тому дослідження ефективних методів модуляції для забезпечення високої спектральної та енергетичної ефективності на основі імпульсних методів модуляції, а також використання поляризаційних ефектів є перспективним і вважається довгостроковим напрямком досліджень. У височастотних діапазонах міліметрового та оптичного спектрів сигналів застосування оптоелектронних методів є ефективним, і навіть у деяких випадках єдиним можливим способом [8-10].

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Інформаційна ємність сигналів і теоретична обґрунтованість ефективності просторових параметрів модуляції

Як відомо, у теорії інформації для каналів передавання дискретних сигналів (дискретні канали зв'язку) використовуються поняття технічної та інформаційної швидкості передавання даних [11].

Під технічною швидкістю передавання V_t розуміють кількість елементарних сигналів (символів), що передаються каналом за одиницю часу. Прикладом елементарного символу є однополярний електричний імпульс тривалістю t_s на тактовому інтервалі T . Швидкість передавання інформації вимірюється в бітах за секунду і визначається співвідношенням: $V_h = V_t H(s)$, де $H(s)$ є ентропією символу. Для двійкових дискретних символів $[0, 1]$ із постійною амплітудою імпульсів значення $H(s)$ дорівнює 1. При кількості L можливих рівномірних рівнів амплітуди імпульсів (рівень завад менший за різницю рівнів амплітуд імпульсів) значення $H(s)$ дорівнює $\log L$:

$$I(S) = N \log L = (t/T) \log L. \quad (1)$$

Як впливає з (1), збільшення кількості L рівнів підвищує пропускну здатність каналів зв'язку.

Котельниковим і Шенноном встановлено [11], що й аналоговий сигнал має обмежений спектр, він може бути відновлений однозначно і без втрат за своїми дискретними відліками, взятими з частотою строго більшою за подвоєну максимальну частоту F_{\max} спектра сигналу:

$$N = T_s / \Delta t = 2F_{\max} T_s. \quad (2)$$

З (2) дістаємо

$$I(S) = 2F_{\max} T_s \log L. \quad (3)$$

Отже, як унаочнює рівняння (3), інформаційна ефективність сигналу зростає з розширенням його спектра та складності уявлення сигналу. Із загальної теорії інформаційних сигналів L є безліччю сигналів, об'єднаних будь-якою властивістю, характерною для всіх і кожного із сигналів даної множини. Безліч L під час аналізу сигналів і систем може розглядатися як у спеціальний спосіб сконструйований багатовимірний (у межі — нескінченновимірний) геометричний простір. Для багаторівневої амплітудної модуляції кількість L можливих рівномірних рівнів амплітуди імпульсів (рівень завад $P_n = \delta^2$ менший за різницю рівнів амплітуд імпульсів), взяту із середньою потужністю сигналу $P_s = s^2$, можна подати у вигляді

$$L = \sqrt{\frac{s^2 + \delta^2}{\delta^2}} = \sqrt{1 + \frac{s^2}{\delta^2}}. \quad (4)$$

Пропускна здатність каналу, схильного до адитивного білого гауссівського шуму P_n , для двійкової системи числення розраховується за теоремою Шеннона–Хартлі так:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{P_n} \right). \tag{5}$$

Смуга пропускання каналу зв'язку B обмежується граничною частотою за рівнем загасання сигналу рівня статистичних завад, при цьому значення $F_{\max} \leq 2B$.

Аналізуючи рівняння (1)–(5) і повніший математичний аналіз, викладений в [11], можна припустити, що ефективними методами підвищення інформаційної ємності сигналу можуть бути методи простої модуляції сигналів, зокрема з використанням поляризаційних ефектів.

Поляризаційна модуляція інформаційних сигналів

Електричне поле електромагнітної хвилі визначається за виразом

$$E(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 \sin(2\pi ft - \vec{k}\vec{r} + \varphi), \tag{6}$$

де \vec{E}_0 — векторна амплітуда, яка показує напрям електричного поля хвилі, тобто поляризацію; \vec{k} — хвильовий вектор, який показує напрямок поширення хвилі; f і φ — відповідно частота і фаза несучої хвилі; \vec{r} — радіус-вектор цієї точки.

Усі види поляризації можна подати як суму двох ортогональних поляризацій. Якщо електричне поле сигналу поширюється вздовж осі z , то ортогональні складові сигналу визначатимуться за формулою

$$\vec{E}(z, t) = \vec{i}_x E_x \sin(2\pi ft - kz) + \vec{i}_y E_y \sin(2\pi ft - kz + \varphi), \tag{7}$$

де \vec{i}_x, \vec{i}_y — поодинокі вектори напрямів відповідно x та y ; E_x, E_y — амплітуда компонент електричного поля вздовж осей відповідно x та y ; φ — різниця фаз між компонентами. Рівняння (7) виражає еліптичні хвилі з коловою поляризацією. Якщо $\varphi = 0$ або π , то радіохвиля стає лінійно поляризованою, при $\varphi = \pm \pi/2$ і $E_x = E_y$ хвиля стає коловою поляризацією (рис. 1).

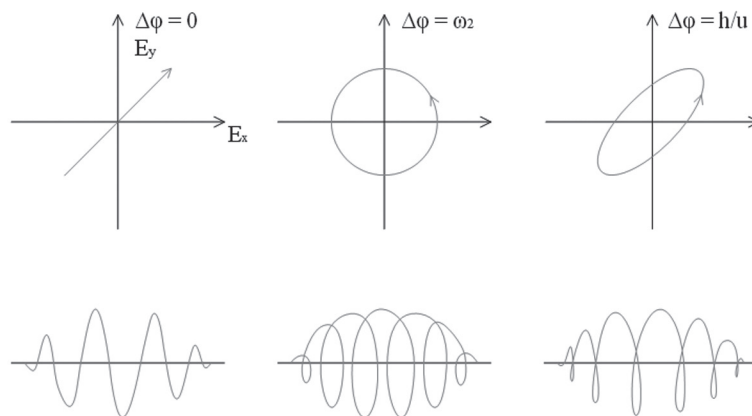


Рис. 1. Принцип формування поляризаційної модуляції

Поляризаційні ефекти вже використовуються в поляризаційних активних антенних решітках, у методах бінарної поляризаційної маніпуляції (*Polarization Shift Keying, PolSK*), що застосовуються в безпроводових радіосистемах для оптичних ліній зв'язку у вільному просторі (FSO), для оптоелектронних методів генерації СВ кількості ММД, на основі PolSK оптичної несучої, з форматами модуляції ASK, FSK і PSK для радіочастотного сигналу. Більш широкі пропозиції знаходять методи на основі поляризації для збільшення коефіцієнта мультиплексування, і в бінарних системах передавання інформації застосовні два стани лінійної поляризації зі зсувом $\pi/2$. В експериментальних результатах зазначається, що використання поляризаційних ефектів під час передавання сигналів у безпроводовому середовищі зменшує чутливість каналів до турбулентності атмосфери, а також підвищує спектральну ефективність [12; 13].

Як уже було підкреслено, для телекомунікаційних технологій наступних поколінь пропонується використовувати високочастотні діапазони міліметрового та терагерцового діапазонів, а також відкриті оптичні системи зв'язку. Ці діапазони передбачаються і вже реалізуються в наземних, супутникових системах зв'язку. Об'єднання таких технологій із використанням ММД (45...75 ГГц, 75...110 ГГц) та оптичного спектра (ОС) зможе забезпечити високу пропускну здатність та широке географічне охоплення.

Доставляння сигналів на таких високих частотах може здійснюватися за допомогою технології радіозв'язку з використанням технології *Radio-over-Fiber (RoF)*, яка відрізняється гібридною волоконно-ефірною топологією мереж із можливостями віддаленого радіопристрою на високих частотах.

У цій статті пропонується застосування складних схем поляризаційної модуляції в безпроводових та гібридних волоконно-ефірних системах зв'язку з конвертацією радіодіапазону за допомогою оптичних доменів. Можливість модуляції стану поляризації складних схем останнім часом стає здійсненою завдяки розробленню поляризаційно-чутливих квантових матеріалів із нетривіальними спіновими, долинними або хіральними властивостями, які чутливі до світлової спіральності. Пропонуються інтегровані активні антенні решітки з рухомою поляризацією лінійних і циклічних видів [12; 13].

Принципові схеми волоконно-ефірного передавання сигналів і просторової модуляції сигналів

Принципові схеми, які можуть працювати в оптичному та ММД, з використанням просторової модуляції сигналів зображено на рис. 2 і рис. 3. На рис. 2 система має конфігурацію безпроводових систем в оптичному діапазоні і волоконно-оптичну частину, яка формує інформаційні оптичні сигнали з поляризаційним мультиплексуванням. У приймачі FSO методом оптичного гетеродина (частота биття f_{RF} відповідає різниці частот Laser1 і Laser2) сформовані оптичні домени у фотодетекторі перетворюються на електричні сигнали. Поляризаційний світлоподільник PBS використовується для отримання поляризованих когерентних радіосигналів у напрямках X та Y. У частині безпроводового з'єднання з кожного боку є дві антени для формування MIMO 2×2 . Така система може створювати сигнали високочастотної ділянки ММД (див. рис. 2).

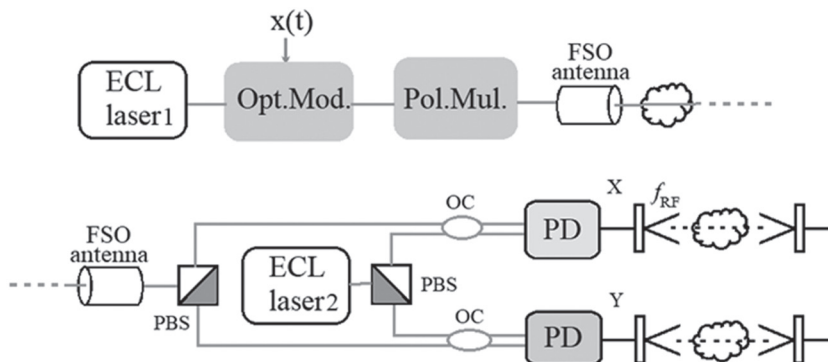


Рис. 2. Принципова схема волоконно-ефірного передавання сигналів з оптичним поляризаційним мультиплексуванням у поєднанні з MIMO:

ECL laser — одночастотний лазер із зовнішнім резонатором; Opt.Mod. — оптичний модулятор; Pol.Mul. — поляризаційний мультиплексор; PBS (англ. *polarizing beam combiner*) — поляризаційний світлоподільник; OC (англ. *optical coupler*) — оптичний з'єднувач; PD — фотодетектор, f_{RF}

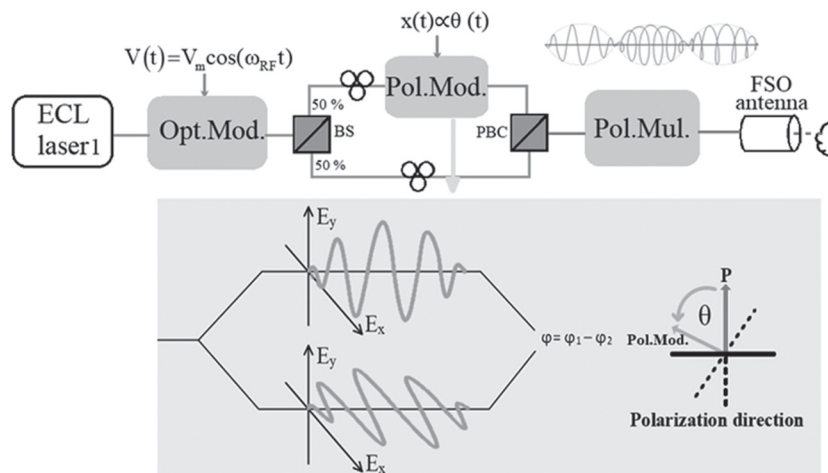


Рис. 3. Принципова схема оптоелектронного формування радіочастотних імпульсів в оптичному діапазоні з просторовою модуляцією та передавання по каналу FSO:

PBC (англ. *polarizing beam combiner*) — суматор поляризаційних променів; BS — світлоподільник (інші позначення такі самі, як на рис. 2)

Принципові системи можуть бути застосовні в гібридних волоконно-ефірних конфігураціях мереж, де безпроводова оптична система може працювати на невеликих площах покриття, всередині приміщень. Однак подібні системи також можуть бути задіяні в глобальному масштабі супутникових систем зв'язку, але з пристроями, що формують потоки потужнішого оптичного випромінювання.

ВИСНОВКИ

Дослідження методів просторової модуляції сигналів із використанням поляризаційних ефектів є далекосяжним напрямком для збільшення спектральної та енергетичної ефективності, стійкості зв'язку. Принципова схема волоконно-эфірного передавання із застосуванням поляризаційних ефектів в оптичному та високочастотних радіодіапазонах, що охоплює волоконні та безпроводові лінії передавання, можуть бути використані як у невеликих масштабах наземних мереж, так і в глобальному покритті. Подальше вивчення різних видів поляризаційної модуляції сигналів в імпульсному режимі, методів їх технічної реалізації для передавання, оброблення та керування активними антенними решітками є досить перспективним.

Список використаної літератури

1. *Karafolas N. Near-Earth Laser Communications, CRC Press, 2nd Edition, 2020.*
2. *Morant M., Llorente R. Performance Analysis of Carrier-Aggregated Miantenna 4 × 4 MIMO LTE-A Fronthaul by Spatial Multiplexing on Multicore Fiber // J. Lightw. Technol. Jan. 2018. Vol. 36, no. 2. P. 594–600.*
3. *Kremenetskaya Y. A., Markov S. E., Melnyk Yu. V. Structural optimization of optoelectronic components in millimeter-wave radio-transmitting modules // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. 2020. Vol. 23, no. 4. P. 424–430.*
4. *Seamless fiber-wireless bridge in the millimeter- and terahertz-wave bands / A. Kanno, P. T. Dat, N. Sekine [et al.] // J. Lightw. Technol. Oct. 2016. Vol. 34. P. 4794–4801.*
5. *Review on the Millimeter-Wave Generation Techniques Based on Photon Assisted for the RoF Network System / J. Xiao, C. Zhao, X. Feng [et al.] // Advances in Condensed Matter Physics, 2020.*
6. *Evolution of radio-over-fiber technology / C. Lim, Y. Tian, C. Ranaweera [et al.] // J. Lightw. Technol. 2019. Vol. 37, no. 6. P. 1647–1656.*
7. *RF fading circumvention using a polarization modulator for supporting W-band RoF transport from 85 to 95 GHz / R.-K. Shiu, S.-J. Su, Y.-W. Chen [et al.] // Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. Exhib., 2020. P. 1–3.*
8. *Elsayed E. E., Yousif B. B. Performance enhancement of hybrid diversity for M-ary modified pulse-position modulation and spatial modulation of MIMO-FSO systems under the atmospheric turbulence effects with geometric spreading // Opt. Quantum Electron. 2020. Vol. 52. P. 1–18.*
9. *Magidi S., Jabeena A. Analysis of multi-pulse position modulation free space optical communication system employing wavelength and time diversity over Malaga turbulence channel // Sci. Afr. 2021. Vol. 12, e00777.*
10. *Trisno S., Davis C. C. Performance of free space optical communication systems using polarization shift keying modulation // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 2006. P. 6304.*
11. *Kononyuk A. E. Fundamentals of scientific research (general theory of experiment). Book 1. Kyiv: Osvita Ukrainy, 2011.*
12. *Toyoda I. Polarization modulation // Modulation in Electronics and Telecommunications, 2019.*
13. *Optical generation scheme of microwave signals with multiple modulation formats / W. Guodong, Z. Shanghong, L. Xuan [et al.] // J. Infrared and Laser Engineering. 2019. Vol. 48, no 6. P. 622002–0622002.*

Я. А. Кременецкая, А. А. Макаренко, С. Г. Лазебный, В. И. Кравченко, К. Д. Бутолин

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЕМКОСТИ СИГНАЛОВ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ДЛЯ СИСТЕМ СВЯЗИ
В РАДИО- И ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНАХ**

Перспективные системы связи развиваются в направлении усложнения конфигурации сетей, расширения спектра сигналов, интеграции наземных, спутниковых, волоконных, открытых оптических технологий. Поляризационные методы обработки сигналов, конвертация радиосигналов в оптические домены являются перспективными методами для увеличения спектральной эффективности, а также уменьшения влияния атмосферы. В статье проанализированы способы увеличения информационной емкости сигналов, принципиальные схемы волоконно-эфирной передачи в радио- и оптическом диапазонах, в том числе в миллиметровом диапазоне, с использованием поляризационных эффектов для пространственной модуляции информационных сигналов. Подобные схемы с применением беспроводных участков сети в оптическом и высокочастотных радиодиапазонах и волоконных линиях могут быть использованы как в небольших масштабах наземных сетей, так и в глобальном покрытии.

Ключевые слова: пространственная модуляция; информационная емкость; поляризационный сигнал; radio-over-fiber; миллиметровые волны; телекоммуникационные системы.

Ya. A. Kremenetska, A. O. Makarenko, S. H. Lazebnyi, V. I. Kravchenko, K. D. Butolin

**A METHOD FOR IMPROVING INFORMATION CAPACITY OF A SIGNAL
WITH VARIANT POLARIZATION EFFECTS FOR COMMUNICATION SYSTEMS
IN THE OPTICAL AND RADIO BANDS**

Promising communication systems are developing in the direction of complicating the configuration of networks, expanding the spectrum of signals, and integrating terrestrial, satellite, fiber, and open optical technologies. However, the use of information signal modulation methods remains traditional, which are based on changing parameters in the time domain, such as amplitude, frequency, and phase. Spatial signal modulation techniques have not been effectively used in wireless communication systems. Broader proposals find only polarization-based methods for increasing the multiplexing factor and in binary information transmission systems where two states of linear polarization with a shift of $\pi/2$ are used. Polarizing complex signal processing technologies, converting radio signals into optical domains, are promising methods for increasing the spectral efficiency as well as reducing the influence of the atmosphere. The use of complex schemes for modulating the polarization state becomes possible due to the development of polarization-sensitive quantum materials sensitive to light helicity. The paper analyzes the theoretical validity of the effectiveness of spatial modulation parameters to increase the information capacity of signals. The ways of increasing the information capacity of signals, the fundamental schemes of fiber-ether transmission in the optical and radio bands, including in the millimeter band, using polarization effects for spatial modulation of information signals, are analyzed. Schematic diagrams for the formation of radio-frequency pulses in the optical range with spatial modulation using polarization effects are proposed. Similar schemes using wireless sections of the network in the optical and high-frequency radio bands, and fiber lines can be used both in small scale terrestrial networks and in global coverage.

Keywords: spatial modulation; information capacity; polarization signal; radio-over-fiber; millimeter wave; telecommunication systems.

