

УДК 621.39

НОВІ РІЗНОВИДИ МОДУЛЯЦІЇ СИГНАЛУ В ЦИФРОВИХ РАДІОРЕЛЕЙНИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАВАННЯ



[І.В. ГОРБАТИЙ](#)

Національний університет
“Львівська політехніка”

Abstract – The family of modulations on the basis of amplitude modulation of many components (AMMC) in the digital radio-relay line-of-sight transmission systems is suggested to use. As a result of researches it sets, that in case of use offer AMMC the distance between the signal points on the signal constellation increases, what is why the bit error rate decrease in radio-relay line-of-sight transmission systems by comparison to the use of quadrature amplitude modulation (QAM) at identical maximal power and informing of modulated signal.

It is shown, that offer method of adaptive data transmission in the systems of the remote sensing of Earth, the satellite telecommunication systems, the radio-relay line-of-sight transmission systems with the use of AMMC allows to increase a quantity of transmitted data through radio-relay line-of-sight transmission system on 5,3% because AMMC characterized by higher protect of hindrance.

Анотація – Запропоновано використовувати сімейство модуляцій на основі амплітудної модуляції багатьох складових (АММС) у цифрових радіорелейних системах передавання прямої видимості (РРСП ПВ). За результатами досліджень установлена можливість зменшення ймовірності біткової помилки в РРСП ПВ при використанні АММС порівняно із квадратурною амплітудною модуляцією (КАМ).

Анотация – Предложено использовать семейство модуляций на основе амплитудной модуляции многих составляющих (АММС) в цифровых радиорелейных системах передачи прямой видимости (РРСП ПВ). По результатам исследований установлена возможность уменьшения вероятности битовой ошибки в РРСП ПВ при использовании АММС по сравнению с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ).

Вступ

При побудові телекомунікаційних мереж, зокрема телефонних мереж загального користування, мереж мобільного зв'язку та мереж передавання даних, широко застосовують радіорелейні системи передавання. Серед радіорелейних систем найбільш поширеними є радіорелейні системи передавання прямої видимості (РРСП ПВ), які працюють у діапазоні сантиметрових хвиль, використовують гостро направлені антени з великим коефіцієнтом підсилення за потужністю, що дозволяє застосовувати передавачі з невеликими потужностями й забезпечувати невеликі габарити обладнання. Для ліній РРСП ПВ виділені обмежені робочі смуги частот. Широкого застосування набули багатоканальні РРСП ПВ.

До важливих характеристик якості РРСП ПВ належить ймовірність помилки при передаванні даних. Зменшення ймовірності помилки дозволяє підвищити якість РРСП ПВ, зокрема підвищити достовірність прийнятих даних. Серед факторів, що

впливають на виникнення помилок у РРСП ПВ, важливе місце посідають обрані методи модуляції сигналу та коригуючого кодування. При формуванні сигналів у передавачах сучасних цифрових РРСП ПВ застосовують бінарну фазову маніпуляцію (БФМн), квадратурну фазову маніпуляцію (КФМн) і квадратурну амплітудну модуляцію (КАМ), що дозволяє передавати дані зі швидкістю до 155 Мбіт/с із використанням відповідних методів передавання даних [1-5].

Для різновидів фазової та багатопозиційної амплітудно-фазової модуляції сигналу, що застосовують у розглянутих РРСП ПВ, характерним є збільшення ймовірності помилки в каналі зв'язку при збільшенні кількості символів M , які можливо передати протягом одного інформаційного такту. Проте, у загальному різновиди модуляції при однаковій кількості переданих символів M та однаковому відношенні E_b / N_0 енергії одного біта інформації до спектральної густини потужності білого шуму можуть характеризуватись різною ймовірністю помилки. Тому актуальною задачею є розроблення нових чи вдосконалення відомих різновидів модуляції сигналу, які при певному відношенні E_b / N_0 забезпечать передавання даних із заданою швидкістю та меншою ймовірністю помилки порівняно із застосовуваними в сучасних цифрових РРСП ПВ. Цьому питанню присвячено ряд публікацій [6-9], проте воно потребує подальших досліджень.

Метою цієї роботи є підвищення якості сучасних РРСП ПВ з обмеженою смугою пропускання в умовах завад шляхом використання нового запропонованого сімейства модуляцій на основі амплітудної модуляції багатьох складових (АМБС).

I. Математичні моделі для дослідження цифрових радіорелейних систем передавання прямої видимості

Важливою характеристикою сучасних цифрових РРСП ПВ є швидкість передавання даних. Ця швидкість буде обмежена пропускнуою здатністю застосованого в РРСП ПВ радіоканалу. У загальному пропускна здатність C_c (біт/с) каналу електров'язку визначається згідно з відомою формулою К. Шеннона [10]:

$$C_c = F_c \log_2(1 + P_s / P_n), \quad (1)$$

де F_c – ширина смуги пропускання каналу електров'язку, Гц; P_s / P_n – відношення середньої потужності сигналу до середньої потужності шуму в каналі, разів.

Для розрахунку пропускнуої здатності багатоканальної РРСП ПВ слід скористатись таким співвідношенням:

$$C_{sn} = \sum_{i=1}^n F_i \log_2 \left[1 + \frac{P_{s_i}}{P_{n_i}} 10^{-|\alpha_i|/10} \right], \quad (2)$$

де n – кількість каналів; F_i – смуга пропускання одного каналу, Гц; P_{s_i} – потужність сигналу передавача i -го каналу на вході лінії зв'язку, Вт; P_{n_i} – потужність шуму в смузі пропускання i -го каналу на виході лінії зв'язку, Вт; $|\alpha_i|$ – модуль середнього затухання в лінії зв'язку в смузі пропускання i -го каналу, дБ.

Швидкість передавання даних у РРСП ПВ буде залежати від потужності передавача, застосованих методів модуляції та коригуючого кодування, ослаблення в радіолінії, чутливості приймача, коефіцієнтів підсилення приймальної та передавальної антен.

Розглянемо характеристики середньошвидкісних цифрових РРСП ПВ з адаптивною модуляцією для передавання IP-трафіка зі швидкістю до 105 Мбіт/с у діапазонах частот 4, 5, 6, 7, 8, 11, 13, 15, 18, 23 і 38 ГГц [5], що на сьогоднішній час є типовими з точки зору швидкості передавання даних. Такі РРСП ПВ забезпечують автоматичну зміну методу модуляції: 21 Мбіт/с (при застосуванні БФМн), 42 Мбіт/с (КФМн), 63 Мбіт/с (8-КАМ), 84 Мбіт/с (16-КАМ), і 105 Мбіт/с (32-КАМ). Зміна виду модуляції відбувається беззбивно. Аналіз рівня потужності завад і вибір виду модуляції відбувається в кожному пакеті інформації, яка передається, що забезпечує максимізацію ефективності системи при передаванні призначеного для користувача трафіка Ethernet. Призначений для користувача трафік захищений коригуючим кодуванням. В обладнанні РРСП ПВ застосовано інтерфейс користувача типу Ethernet 10 Base-T/100 Base-TX. Моніторинг і управління устаткуванням здійснюється за допомогою автоматизованої системи управління. Основні параметри таких РРСП ПВ наведені в табл. 1.

Для дослідження таких РРСП ПВ засобами математичного моделювання з метою виявлення шляхів підвищення їх якості розроблено вдосконалену математичну модель телекомунікаційної системи на основі радіоліній, що базується на застосуванні вдосконалених математичних моделей [11] та наведених вище співвідношень (1)-(2). Зокрема, така модель дозволяє дослідити вплив застосованих відомих чи нових методів модуляції та коригуючого кодування на швидкість передавання даних або ймовірність помилки при передаванні даних у РРСП ПВ.

Таблиця 1. Основні параметри сучасних середньошвидкісних РРСП ПВ

Тип РРСП ПВ	Діапазон, ГГц	Випромінювана потужність, дБм	Чутливість приймача при $P_b = 10^{-6}$, дБм
“Радіан-4”	3,4...4,2	До 32	-72 (105 Мбіт/с)
“Радіан-5”	4,4...5,0		
“Радіан-6”	5,67...6,17; 5,925...6,425		
“Радіан-7”	7,25...7,55	До 29	-72 (105 Мбіт/с)
“Радіан-8”	7,9...8,4		
“Радіан-11”	10,7...11,7	До 25	-72 (105 Мбіт/с)
“Радіан-13”	12,75...13,25		
“Радіан-15”	14,4...15,35	До 25	-72 (105 Мбіт/с)
“Радіан-18”	17,9...19,9	До 23	-71 (105 Мбіт/с)
“Радіан-23”	21,2...23,6		
“Радіан-38”	37,0...39,5	До 19	-69 (105 Мбіт/с)

Застосовані в РРСП ПВ [5] види модуляції розглянуті в [1-4]. Подальше підвищення якісних характеристик можливе застосуванням нових методів модуляції та коригуючого кодування, що володіють кращими характеристиками порівняно з відомими. Розглянемо деякі нові методи модуляції, які можливо застосувати в РРСП ПВ для зменшення ймовірності помилки при передаванні даних або збільшення кількості переданих даних.

II. Амплітудна модуляція багатьох складових у цифрових радіорелейних системах передавання прямої видимості

На якість РРСП ПВ впливають випромінювана потужність передавача та потужність шуму в смузі пропускання радіоканалу. Випромінювана потужність РРСП ПВ обмежена й регламентується міжнародними організаціями (зокрема Міжнародним союзом електрозв'язку). Рівень шумів у радіоканалі може бути зменшений до певної величини за рахунок використання вузько направлених антен. Тому сучасні РРСП ПВ працюють в умовах певного відношення P_s / P_n , яке збільшити дуже важко. Це впливає на досягнуті значення ймовірності помилки при передаванні даних. Для подальшого зменшення ймовірності помилки доцільно застосовувати нові методи модуляції й коригуючого кодування, які при заданому значенні відношення P_s / P_n (або відношення E_b / N_0) забезпечують передавання даних із заданою швидкістю та меншою ймовірністю помилки в телекомунікаційній системі.

Для зменшення ймовірності помилки в РРСП ПВ, у яких використовують КАМ, автором запропоновано застосовувати нове сімейство модуляцій на основі АМБС (Amplitude Modulation of Many Components – АММС). Модульований АМБС-сигнал формують у вигляді суми N гармонічних складових, що відрізняються початковими фазами φ_n . Він має вигляд [12, 13]:

$$u_{\text{АМБС}}(t) = \sum_{n=1}^N U_0 a_n u_{m_n}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_n), \quad (3)$$

де U_0 , ω_0 , φ_0 – амплітуда, кутова частота й початкова фаза носійного коливання; a_n – коефіцієнти пропорційності для n -х каналів модулятора; $u_{m_n}(t)$ – модулюючі сигнали на входах n -х перемножувачів у складі модулятора.

При $N=3$ складових із початковими фазами $\varphi_1=0$ рад, $\varphi_2=\pi/3$ рад та $\varphi_3=2\pi/3$ рад кількість неповторюваних АМБС-сигналів, що можна однозначно демодулювати (а значить і ефективна кількість символів), становить

$$M_{\text{еф}} = 3M_U(M_U - 1). \quad (4)$$

Загальну кількість символів, що можна одержати з використанням усіх можливих комбінацій модулюючих інформаційних сигналів при довільних початкових фазах складових, обчислюють за допомогою такого співвідношення:

$$M_{\text{заг}} = (M_U)^N. \quad (5)$$

При цьому протягом тривалості одного інформаційного символу може бути передано $\log_2 M_{\text{еф}}$ біт інформації.

Завадозахищеність модуляції залежить від відстані $d_{\text{сигн}}$ (В) між сигнальними точками на сигнальній площині. Для АМБС при $N=3$, початкових фазах складових $\varphi_1=0$ рад, $\varphi_2=\pi/3$ рад та $\varphi_3=2\pi/3$ рад та максимально можливій амплітуді моду-

льованого сигналу $U_{c_{\max}}$ (В) при модуляції кожної складової модулюючими сигналами з кількістю рівномірно віддалених рівнів M_U автором отримано наступне співвідношення для обчислення відстані $d_{\text{сигн}}$:

$$d_{\text{сигн}} = U_{c_{\max}} / (M_U - 1). \quad (6)$$

За допомогою АМБС можливо формувати сигнали з найрізноманітнішими сигнальними сузір'ями. При цьому сигнальне сузір'я АМБС-сигналу з N складовими вписується в $2N$ -кутник. Із практичної точки зору цікавими є сузір'я із трьома та шістьма складовими. На рис. 1 зображені деякі базові сузір'я КАМ- і АМБС-сигналів (із трьома складовими) з усіма можливими сигнальними точками.

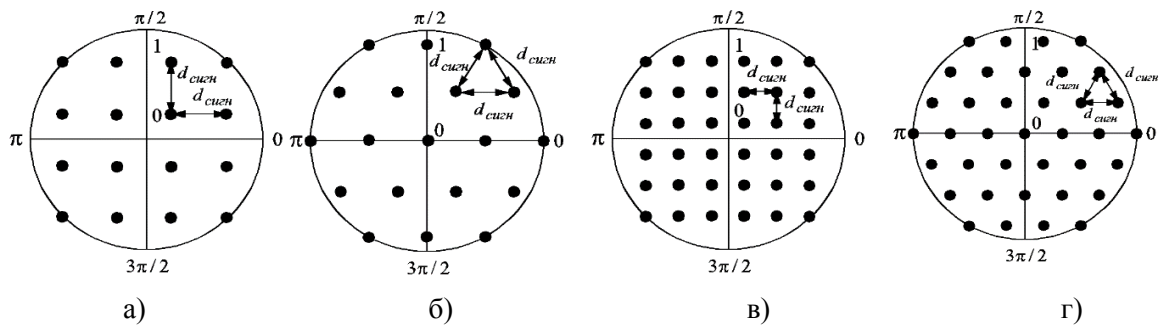


Рис. 1. Базові сигнальні сузір'я: а) 16-КАМ; б) 19-АМБС; в) 36-КАМ; г) 37-АМБС.

Їх використовують для формування сузір'їв із кількістю точок 2^k (k - натуральне число). У сучасних РРСП ПВ, як правило, застосовують сигнали саме з такою кількістю сигнальних точок для спрощення процесу передавання двійкових даних. Сигнальні сузір'я найбільш доцільних для застосування КАМ- і АМБС-сигналів зображені на рис. 2.

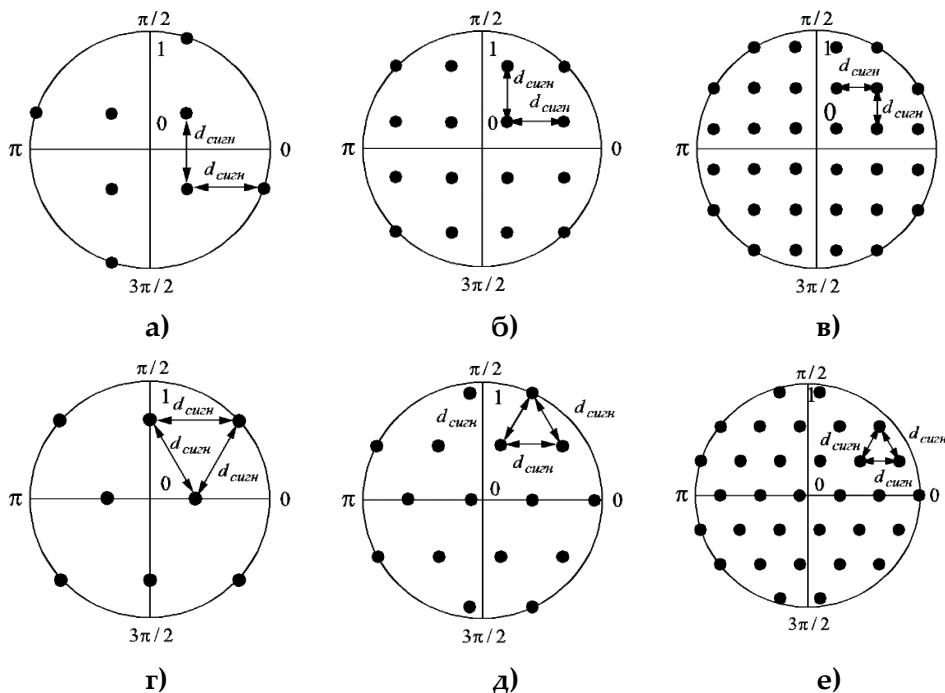


Рис. 2. Сигнальні сузір'я: а) 8-КАМ; б) 16-КАМ; в) 32-КАМ; г) 8-АМБС зі зсувом; д) 16-АМБС зі зсувом; е) 32-АМБС зі зсувом

Зокрема, показані сигнальні сузір'я широко вживаних різновидів модуляції: 8-КАМ (отримане при використанні 8 точок із базового сузір'я 16-КАМ), 16-КАМ, 32-КАМ (отримане при використанні 32 точок із базового сузір'я 36-КАМ). Також показані сигнальні сузір'я АМБС-сигналів з $N = 3$ складовими зі зсувом рівнів амплітуди модулюючих сигналів і такою ж кількістю сигнальних точок, як і в КАМ: 8-АМБС зі зсувом (отримане при використанні 8 точок із базового сузір'я 19-АМБС), 16-АМБС зі зсувом (отримане при використанні 16 точок із базового сузір'я 19-АМБС) і 32-АМБС зі зсувом (отримане при використанні 32 точок із базового сузір'я 37-АМБС).

III. Модулятор та демодулятор для здійснення амплітудної модуляції багатьох складових

Модулятор для формування АМБС-сигналу [12, 13] (рис. 3) складається з формувача модулюючих сигналів 1, опорного високостабільного генератора косинусоїдальних коливань 2, N фазоповертачів 3-5 на кути φ_n , N перемножувачів 6-8 та суматора 9.

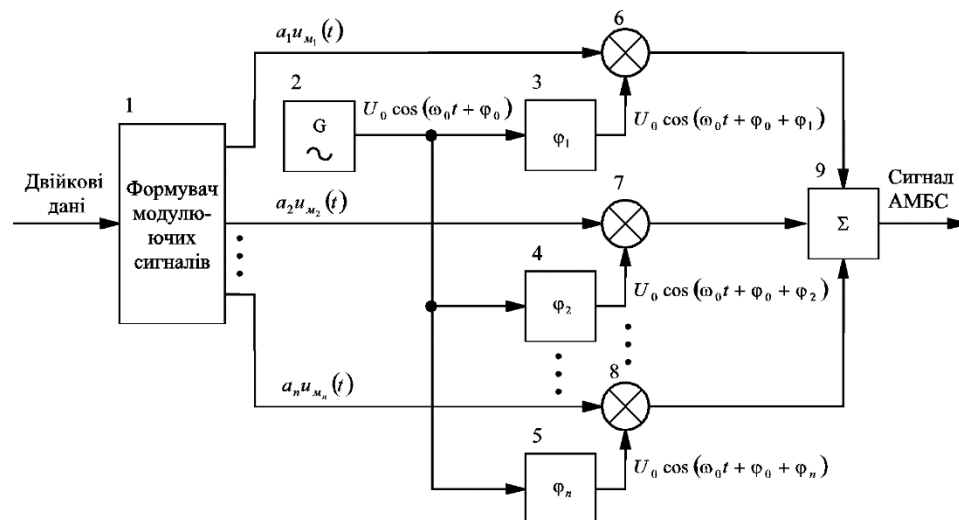


Рис. 3. Модулятор АМБС

Кількість фазоповертачів та перемножувачів дорівнює кількості складових N , що потрібно використати для формування заданої АМБС. Двійкові дані, що мають бути передані через телекомунікаційний канал, подають на формувач модулюючих сигналів для формування N модулюючих сигналів. На виході фазоповертачів одержують гармонічні коливання із частотою носійного коливання ω_0 та фазами $\varphi_0 + \varphi_n$.

Перемножувачі використовують для здійснення амплітудної модуляції гармонічних коливань із виходів фазоповертачів модулюючими сигналами. АМБС-сигнал отримують шляхом додавання сигналів на виходах усіх перемножувачів.

Перевагою такого модулятора є відносна простота формування АМБС-сигналів. Так, при здійсненні 32-АМБС необхідно забезпечити можливість формування на кожному інформаційному такті сигналу з однією з 18 можливих амплітуд та однією з 28 можливих початкових фаз, що при застосуванні запропонованого модулятора вимагає лише використання модулюючих сигналів із чотирма можливими амплітудами.

Аналогічно при формуванні 16-АМБС-сигналу, що має на кожному інформаційному такті одну з 9 можливих амплітуд та одну з 14 можливих початкових фаз, необхідно застосовувати модулюючі сигнали із трьома можливими амплітудами. Найпростіше сформувавши 8-АМБС-сигнал, що має на кожному інформаційному такті одну з 3 можливих амплітуд та одну з 8 можливих початкових фаз.

Демодулятор для оброблення АМБС-сигналу [12, 13] (рис. 4) складається з опорного високостабільного генератора косинусоїдальних коливань 1 із фазовим автопідстроюванням частоти (ФАПЧ) відносно частоти носійного коливання вхідного АМБС-сигналу, N фазоповертачів 2-4 на кути θ_n , N перемножувачів 5-7, N фільтрів нижніх частот (ФНЧ) 8-10 та формувача двійкових даних 11.

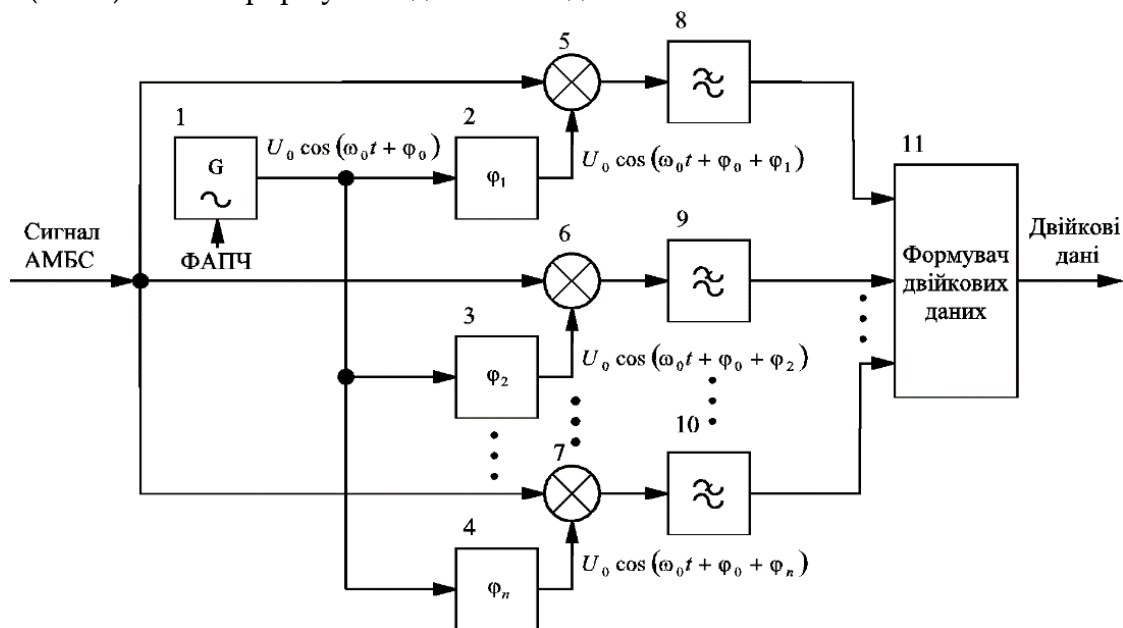


Рис. 4. Демодулятор АМБС

Кількість фазоповертачів та перемножувачів дорівнює кількості складових N , що були використані для формування заданої АМБС. На виході кожного фазоповертача отримують гармонічні коливання із частотою ω_0 та фазою носійного коливання φ_0 , використаного в модуляторі АМБС, зсунутою на θ_n . АМБС-сигнал подають одночасно на N перемножувачів, що разом із ФНЧ використовують для виділення низькочастотних сигналів, що застосовуються для формування прийнятих двійкових даних за допомогою формувача двійкових даних. Цей формувач забезпечує необхідну амплітуду та тривалість двійкових даних.

При здійсненні демодуляції КФМн- або КАМ-сигналів кожену сигнальну точку можна зобразити на площині демодуляції в декартовій системі координат із координатами, рівними значенням напруг на виходах обох демодуляторів, а при демодуляції АМБС із N складовими використовують запропонований N -вимірний простір демодуляції. Кожна точка АМБС-сигналу в такому просторі має координати, рівні значенням амплітуд сигналів на виходах кожного демодулятора, або відносні координати, рівні номерам можливих рівнів амплітуди на виходах демодуляторів. У випадку 19-

АМБС-сигналу із трьома складовими сигнальними сузір'я в тривимірному просторі демодуляції з осями n_1 , n_2 та n_3 буде мати вигляд, наведений на рис. 5. При цьому на виході кожного демодулятора може бути присутній сигнал з одним з 5-ти можливих рівнів амплітуди від мінус 1 В до 1 В.

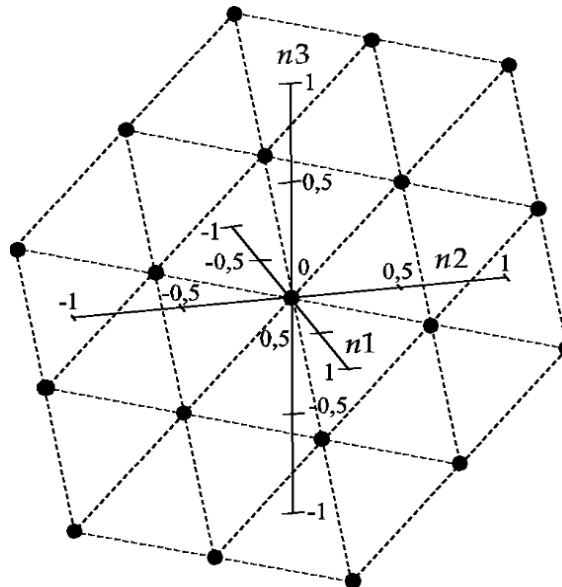


Рис. 5. Простір демодуляції 19-АМБС

Як видно з рис. 5, для такого модульованого сигналу точки сигнального сузір'я знаходяться в площині, нахиленій до осей координат під певними кутами, і утворюють правильний шестикутник.

Особливістю запропонованих модуляторів і демодуляторів АМБС є можливість здійснювати модуляцію та демодуляцію як БФМн, КФМн, М-ФМн і М-КАМ, так і сімейства модуляцій М-АМБС. При цьому для здійснення модуляції БФМн у модуляторі АМБС достатньо використати лише один перемножувач, а для КФМн, 8-ФМн і КАМ – два перемножувачі та один фазоповертач на $\pi/2$. Для демодуляції БФМн у демодуляторі АМБС достатньо задіяти лише один перемножувач та один ФНЧ, а для КФМн, 8-ФМн і КАМ – два перемножувачі, два ФНЧ та один фазоповертач на $\pi/2$.

IV. Імовірність бітової помилки в радіорелейних системах передавання прямої видимості при використанні різних видів модуляції сигналів

Для комплексного оцінювання переваг АМБС порівняно з іншими відомими різновидами модуляції сигналу проведено дослідження ймовірності бітової помилки в РРСП ПВ у залежності від застосованого різновиду модуляції. Для обчислення ймовірності бітової помилки при використанні АМБС-сигналів застосовано формулу [14]:

$$P_{b_{AMBC}} \cong \frac{n_m}{\log_2(M_{eff})} \cdot Q_1 \left(\sqrt{K_E \cdot \log_2(M_{eff}) \cdot \frac{E_{b_{mid}}}{2N_0}} \right), \quad (7)$$

де n_m – коефіцієнт, що дорівнює середній кількості сусідніх точок, котрі знаходяться навколо однієї з точок сигнального сузір'я; M_{eff} – ефективна кількість символів при використанні АМБС; $E_{b_{mid}}$ – середня енергія одного біта інформації; N_0 – спектральна густина потужності білого шуму; коефіцієнт

$$K_E = \Delta E_{\min} / E_{s_{mid}} = \Delta E_{\min} \cdot M_{eff} / \sum_{i=1}^{M_{eff}} E_{s_i}, \quad (8)$$

де ΔE_{\min} – мінімально можлива енергія різниці двох символів, котрі відповідають сусіднім точкам сигнального сузір'я; $E_{s_{mid}}$ – середня енергія всіх символів, котрі відповідають неповторюваним точкам сигнального сузір'я; E_{s_i} – енергія i -го символу.

Встановлено, що формула (7) придатна при застосуванні АФМн, КАМ та АМБС для обчислення ймовірності символної помилки, що не перевищує 0,1.

На основі проведених досліджень встановлено, що зменшити ймовірність помилки при передаванні даних в умовах завад у РРСП ПВ з обмеженою смугою пропускання можливо за допомогою запропонованого методу адаптивного передавання даних у системах дистанційного зондування Землі, супутникових системах зв'язку, РРСП ПВ з використанням АМБС [15]. Він полягає в адаптивному виборі різновиду модуляції, яка при певному відношенні потужності сигналу до потужності шуму забезпечить найнижчу можливу ймовірність бітової помилки P_b при заданій швидкості передавання даних. При цьому слід застосовувати один із різновидів модуляції БФМн, КФМн, а також М-позиційних різновидів модуляції 8-ФМн, М-КАМ чи М-АМБС. Для подальшого зменшення ймовірності бітової помилки необхідно застосовувати коригуюче кодування.

V. Результати математичного моделювання

Результати дослідження ймовірності бітової помилки в РРСП ПВ при обмеженій смузі пропускання в умовах завад при застосуванні різних видів модуляції сигналу при різних значеннях відношення $E_{b_{mid}} / N_0$ середньої енергії одного біта інформації до спектральної густини потужності білого шуму наведені в табл. 2. При теоретичних дослідженнях застосовано співвідношення (3)-(8).

Таблиця 2. Ймовірність бітової помилки в РРСП ПВ при застосуванні різних видів модуляції сигналу

$E_{b_{mid}} / N_0$, дБ	12,95	14,68	15,93	16,91	17,72
Модуляція	Ймовірність бітової помилки P_b				
8-КАМ	$2,972 \cdot 10^{-6}$	$2,011 \cdot 10^{-8}$	$1,301 \cdot 10^{-10}$	$8,149 \cdot 10^{-13}$	$< 10^{-13}$
8-АМБС зі зсувом	$1,577 \cdot 10^{-7}$	$2,14 \cdot 10^{-10}$	$2,614 \cdot 10^{-13}$	$< 10^{-13}$	$< 10^{-13}$
16-КАМ	$2,662 \cdot 10^{-5}$	$4,728 \cdot 10^{-7}$	$8,17 \cdot 10^{-9}$	$1,385 \cdot 10^{-10}$	$2,317 \cdot 10^{-12}$
16-АМБС зі зсувом	$1,128 \cdot 10^{-5}$	$1,16 \cdot 10^{-7}$	$1,149 \cdot 10^{-9}$	$1,109 \cdot 10^{-11}$	$9,291 \cdot 10^{-14}$
32-КАМ	$5,474 \cdot 10^{-4}$	$4,148 \cdot 10^{-5}$	$3,135 \cdot 10^{-6}$	$2,362 \cdot 10^{-7}$	$1,776 \cdot 10^{-8}$
32-АМБС зі зсувом	$3,845 \cdot 10^{-4}$	$2,103 \cdot 10^{-5}$	$1,140 \cdot 10^{-6}$	$6,144 \cdot 10^{-8}$	$3,296 \cdot 10^{-9}$

Як видно з табл. 2, при застосуванні АМБС зменшується ймовірність помилки на виході вирішуючого пристрою каналу електров'язку (РРСП ПВ) порівняно з використанням КАМ при тій самій інформативності модульованих сигналів (кількості символів M , що можливо передати за один інформаційний такт), що пояснюється збільшенням відстані між сигнальними точками на сигнальній площині. Наприклад, при використанні 8-АМБС зі зсувом рівнів амплітуди модулюючих сигналів ймовірність бітової помилки є меншою порівняно з 8-КАМ в 18,84 раз при значенні відношення $E_{b_{mid}} / N_0 = 12,95$ дБ.

Використовуючи вдосконалену математичну модель телекомунікаційної системи на основі радіоліній, що базується на застосуванні вдосконалених математичних моделей [11], та наведені вище співвідношення (1)-(2), (7), (8), досліджено залежність швидкості передавання даних v_b у РРСП ПВ від інтенсивності дощу R_r при застосуванні запропонованого методу адаптивного передавання даних у системах дистанційного зондування Землі, супутникових системах зв'язку, РРСП ПВ із використанням АМБС [15]. Отримані результати порівняні із залежністю швидкості передавання даних v_b у РРСП ПВ від інтенсивності дощу R_r при використанні відомого методу [5], що передбачає при передаванні даних адаптивний вибір одного з відомих методів модуляції сигналу: БФМн, КФМн, 8-КАМ, 16-КАМ чи 32-КАМ. Моделювання здійснено для РРСП ПВ із довжиною радіолінії 40 км, робочою частотою в діапазоні 10,7...11,7 ГГц і параметрами обладнання, наведеними в табл. 1. Результати досліджень наведені на рис. 6.

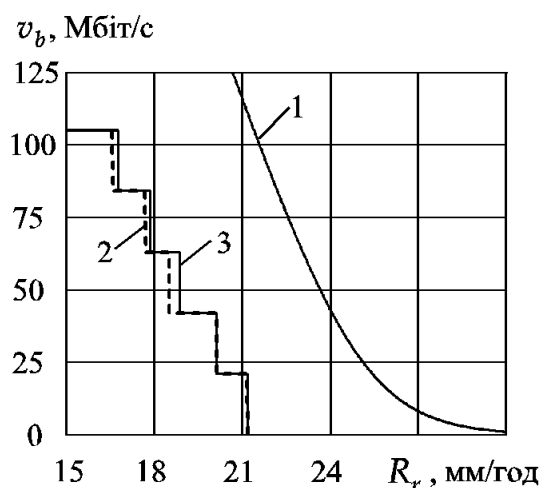


Рис. 6. Залежність швидкості передавання даних v_b у РРСП ПВ від інтенсивності дощу R_r при застосуванні методу адаптивного передавання даних:

1 – максимально можливе значення;

2 – при використанні БФМн, КФМн, 8-КАМ, 16-КАМ і 32-КАМ;

3 – при використанні БФМн, КФМн, 8-АМБС зі зсувом, 16-АМБС зі зсувом і 32-АМБС зі зсувом.

Як видно з результатів досліджень, при зміні інтенсивності дощу в межах від 16 до 22 мм/год застосування запропонованих методів модуляції 8-АМБС зі зсувом,

16-АМБС зі зсувом і 32-АМБС зі зсувом замість 8-КАМ, 16-КАМ і 32-КАМ дозволяє збільшити кількість переданих даних через РРСП ПВ на 5,3% за рахунок вищої завадозахищеності АМБС. Таким чином, запропонована модуляція є перспективною для використання в сучасних РРСП ПВ та інших аналогічних системах.

Висновки

При використанні запропонованої АМБС збільшується відстань між сигнальними точками на сигнальній площині, за рахунок чого зменшується ймовірність помилки на виході демодулятора каналу електрозв'язку (РРСП ПВ) порівняно з використанням КАМ при однакових максимальній потужності та інформативності модульованого сигналу. Завдяки цьому можливо зменшити ймовірність помилки при передаванні даних або збільшити кількість переданих даних. Забезпечити передавання даних при тих саме ймовірності помилки та швидкості передавання при застосуванні АМБС можливо при зменшенні випромінюваної потужності передавача або використанні приймача з меншою чутливістю.

Показано, що запропонований метод адаптивного передавання даних у системах дистанційного зондування Землі, супутникових системах зв'язку, РРСП ПВ із використанням АМБС дозволяє збільшити кількість переданих даних через РРСП ПВ на 5,3% за рахунок вищої завадозахищеності АМБС.

Запропоновані АМБС і адаптивне передавання даних доцільно застосовувати при проектуванні сучасних РРСП ПВ та інших аналогічних систем.

Список літератури:

1. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: Учебник для вузов / В.В. Крухмалев, В.Н. Гордиенко, А.Д. Моченов и др.; Под ред. В.Н. Гордиенко и В.В. Крухмалева. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 510 с.
2. Цифровые и аналоговые системы передачи: Учебник для вузов / В.И. Иванов, В.Н. Гордиенко, Г.Н. Попов и др.; Под ред. В.И. Иванова. – 2-изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 232 с.
3. ITU-R Recommendation F.635-6. Radio-frequency channel arrangements based on a homogeneous pattern for fixed wireless systems operating in the 4 GHz band. – Geneva: ITU, 2001. – 11 p.
4. Справочник по радиорелейной связи / Н.Н. Каменский, А.М. Модель, Б.С. Надененко и др.; Под ред. С.В. Бородича. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
5. Веб-сайт ЗАО “Радіан” [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.radian.su/>.
6. Simon M.K. Bandwidth-efficient digital modulation with application to deep-space communications : monograph. Editor-in-chief Joseph H. Yuen. – California: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2001. – 228 p.
7. Sakarellos V.K., Skraparlis D., Panagopoulos A.D., Kanellopoulos J.D. Outage performance analysis of a dual-hop radio relay system operating at frequencies above 10GHz // IEEE Transactions on Communications – 2010. – Vol. 58, Issue 11. – P. 3104-3109.

8. Abdalla A.G.E., Zain A.F.M. A software tool for cost optimization of microwave radio relay link // Antennas and Propagation Society International Symposium, 1995. — AP-S. Digest, Newport Beach, CA, USA, 1995. — Vol. 2 — P. 1078-1081.
9. Ong L.T., Shikh-Bahaei M., Chambers J.A. Variable rate and variable power MQAM system based on Bayesian bit error rate and channel estimation techniques // IEEE Transactions on Communications. — 2008. — Vol. 56, Issue 2. — P. 177-182.
10. Горбатий І.В. Математичні моделі та методи дослідження телекомунікаційних каналів: Монографія. — Львів : СПОЛОМ, 2006. — 156 с.
11. Горбатий І.В. Системи дистанційного зондування Землі з космосу : Монографія. — Львів : СПОЛОМ, 2011. — 612 с.
12. Горбатий І.В. Амплітудна модуляція багатьох складових // Зб. наук. пр. (Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України). — Київ, 2009. — Вип. 50. — С. 186–190.
13. Пат. №91950 Україна, МПК (2009) H04L27/34, H04L27/20, H03D3/00, H04L5/00. Пристрій для передавання даних за допомогою інформаційного сигналу, сформованого на основі амплітудної модуляції багатьох складових / І.В. Горбатий. — №a200909567 ; заявл. 18.09.2009 ; опубл. 10.09.2010, Бюл. №17.
14. Горбатий І.В. Дослідження інформаційної ефективності амплітудної модуляції багатьох складових // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. — 2010. — №681. — С. 191–196.
15. Горбатий І.В. Метод адаптивного передавання даних у системах дистанційного зондування Землі, супутникових системах зв'язку, радіорелейних системах передавання прямої видимості // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. — 2012. — №738. — С. 160–164.