

Бочкарьов О.Ю. Нові принципи побудови вимірювально-обчислювальних мереж на основі інтелектуальних агентів // Вісник НУ "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі". – 2003. – № 492. – С.100–107. 16. Бочкарьов А.Ю., Голембо В.А. Самоорганізація колектива мобільних измерительных агентів в задаче распределенных контактных измерений // Искусственный интеллект. – Донецк, 2005. – №3. – С.723–731. 17. Бочкарьов О.Ю., Голембо В.А., Ціж А.М. Колективна поведінка мобільних агентів у задачах рівномірного розподілу обмеженої території // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі". – 2008. – № 630. – С. 31–35. 18. Algorithms and Protocols for Wireless, Mobile Ad Hoc Networks, by Azzedine Boukerche (Editor), Wiley-IEEE Press (November 10, 2008). – 496 p.

УДК 621.39

І. Горбатий

Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра телекомунікацій

## МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ КАНАЛІВ У СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ Й ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

© Горбатий І., 2009

Наведено метод підвищення ефективності телекомунікаційних каналів у системах зв'язку й дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) при використанні запропонованої амплітудної модуляції багатьох складових (АМБС, *amplitude modulation of many components* – АММС). Досліджено залежність оптимального діаметра антени наземного інформаційного комплексу (НІК) ДЗЗ від швидкості передавання даних з бортового комплексу (БК) ДЗЗ TERRA при різних видах модуляції сигналу. За результатами моделювання встановлено, наскільки можливо зменшити діаметр антени НІК при використанні АММС порівняно з деякими відомими різновидами модуляції.

The method of rise the efficiency of telecommunication channels in the telecommunication systems and systems of remote sensing of Earth with use the proposed amplitude modulation of many components (AMMC) was given. The dependence of optimum antenna diameter of earth informative complex of remote sensing of Earth from the cosmic satellite TERRA data transmission speed using the varieties of signal modulation was explored. By the modelling results was set, how is possible to decrease the antenna diameter of earth informative complex with use the AMMC by comparison to some known varieties of modulation.

### Вступ

Основною задачею спектрально ефективних модуляцій є максимізація ефективності використання смуги частот. У системах ДЗЗ швидкість передавання даних лежить у діапазоні від 2 до 800 Мбіт/с, що накладає високі вимоги до приймального тракту, наприклад, необхідно встановлювати відповідну смугу пропускання каналу до демодулятора (детектора), а також на виході демодулятора (детектора) залежно від швидкості передавання даних (якщо смуга пропускання буде ширшою, то буде погіршуватись відношення сигнал/шум), нерівномірність амплітудно-частотної характеристики каналу повинна бути не більшою за 1 дБ, повинно бути ефективне автоматичне регулювання підсилення в каналі та інше. Тому для таких систем зв'язку і

систем ДЗЗ найчастіше використовують різновиди фазової маніпуляції, зокрема, BPSK, QPSK і MPSK. Можливості подальшого підвищення пропускну здатності каналу зв'язку з відомими модуляціями сигналів без розширення смуги пропускання вичерпані, що є великою проблемою на сучасному етапі. Тому актуальною задачею є дослідження нових видів модуляції сигналів для використання в системах зв'язку і ДЗЗ.

Проектування систем зв'язку і ДЗЗ з новими видами модуляції сигналу в науковій літературі за останні роки висвітлено недостатньо [1–3]. Автором запропоновано використовувати АММС у таких системах.

Метою даної роботи є запропонувати метод підвищення ефективності телекомунікаційних каналів у системах зв'язку й ДЗЗ при використанні запропонованої АММС та дослідити його ефективність порівняно з використанням деяких відомих різновидів модуляції.

### Модуляції сигналу, що використовуються в цифрових системах зв'язку і ДЗЗ

У цифрових системах зв'язку і ДЗЗ в основному використовують радіочастотні сигнали з фазовою маніпуляцією (PSK – phase shift keying). Найчастіше використовують бінарну фазову маніпуляцію BPSK (binary phase shift keying) і квадратурну фазову маніпуляцію QPSK (quadrature phase shift keying) та їх різновиди DPSK, AQPSK, OQPSK, SQPSK та UQPSK.

Так, при використанні фазової маніпуляції фаза сигналу може набувати  $M$  дискретних значень. Таку модуляцію часто називають багатофазною маніпуляцією MPSK (multiple phase-shift keying). При цьому фазоманіпульований сигнал має вигляд [1]:

$$u_{MPSK}(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_m(t) + \varphi_0), \quad T_c \cdot k_c < t \leq T_c \cdot (1 + k_c), \quad (1)$$

де номер фази  $m = 1, 2, \dots, M$ ; номер інформаційного символу  $k_c = 0, 1, \dots, \infty$ ;  $U_0$ ,  $\omega_0$ ,  $\varphi_0$  – амплітуда, кругова частота та початкова фаза несучого коливання відповідно;  $T_c$  – час передавання інформаційного символу.

Найпоширенішим є випадок, коли змінна складова фази сигналу визначається як

$$\varphi_m(t) = 2\pi(m-1)/M. \quad (2)$$

При BPSK фаза сигналу може набувати лише два можливі значення  $0$  або  $\pi$  рад. Тому ця модуляція дає змогу передавати один біт протягом часу  $T_c$ .

Більш уживаною є QPSK. Сигнал QPSK може бути описаний співвідношенням (1), але, звичайно, його представляють у вигляді суми двох ортогональних складових – косинусоїдальної (синфазної) та синусоїдальної (квадратурної):

$$u_{QPSK}(t) = U_0 a_I u_{mI}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + U_0 a_Q u_{mQ}(t) \cos\left(\omega_0 t + \varphi_0 - \frac{\pi}{2}\right), \quad (3)$$

де  $a_I$ ,  $a_Q$  – коефіцієнти пропорційності для синфазного  $I$  та квадратурного  $Q$  каналів, що є параметрами модулятора;  $u_{mI}(t)$ ,  $u_{mQ}(t)$  – модулюючі сигнали на синфазному  $I$  та квадратурному  $Q$  входах модулятора.

При здійсненні такої модуляції використовують модулюючі сигнали, що є послідовностями прямокутних імпульсів із можливими значеннями амплітуд  $U_{mI} = \pm U_{M_{\max}}$ ,  $U_{mQ} = \pm U_{M_{\max}}$ , де  $U_{M_{\max}}$  – максимально можлива амплітуда модулюючого сигналу.

Сигнальні сузір'я для модуляцій BPSK, QPSK, 6PSK та 12PSK зображені на рис. 1.

### Метод підвищення ефективності телекомунікаційних каналів у системах зв'язку й ДЗЗ

Метод підвищення ефективності телекомунікаційних каналів у системах зв'язку й ДЗЗ полягає в тому, що при використанні нового запропонованого автором різновиду модуляції АММС, при якій модульований сигнал має вигляд

$$u_{AMMC}(t) = \sum_{n=1}^N U_0 a_n u_{m_n}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0 + \varphi_n), \quad (4)$$

збільшується відстань між сигнальними точками на сигнальній площині, за рахунок чого зменшується ймовірність помилки на виходах демодуляторів телекомунікаційних каналів порівняно з використанням фазової чи амплітудно-фазової модуляції при тій самій інформативності модульованих сигналів. Тут  $N$  – кількість гармонічних складових сигналу АММС;  $a_n$  – коефіцієнти пропорційності для  $n$ -х каналів модулятора, що є параметрами модулятора;  $u_{m_n}(t)$  – модулюючі сигнали на  $n$ -х входах модулятора.

Сигнал АММС є сумою  $N$  гармонічних складових, зсунутих на фазові кути  $\varphi_n$ . Заслуговує на увагу сигнал АММС, при формуванні якого використовують фазові кути

$$\varphi_n = \pi / N. \quad (5)$$

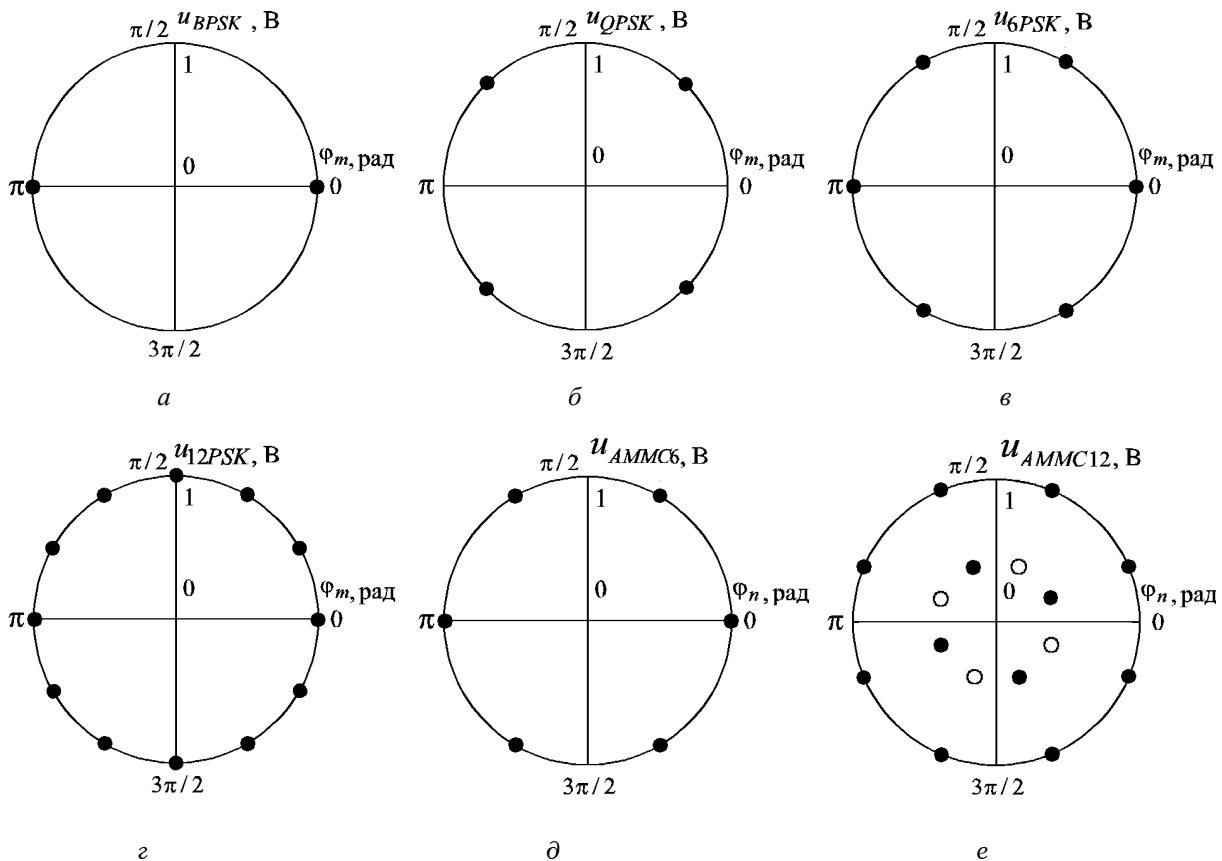


Рис. 1. Сигнальні сузір'я: а – BPSK; б – QPSK; в – 6PSK; г – 12PSK; д – АММС6; е – АММС12

При використанні модулюючих сигналів, що є послідовностями прямокутних імпульсів із двома можливими значеннями амплітуд  $U_{m_n} = \pm U_{m_{\max}}$ , при  $N = 3$  (АММС6) та  $N = 4$  (АММС12) одержимо модульовані сигнали, сигнальні сузір'я яких зображені на рис. 1, д та рис. 1, е відповідно. При формуванні сигналу АММС12 для підвищення завадостійкості доцільно використовувати з 16 наявних точок на сигнальній площині лише 12 (точки, що позначені на рисунку колами, не використовують).

Відстань між сигнальними точками на сигнальній площині [1–3] при максимально можливій амплітуді сигналу 1 В для MPSK дорівнює

$$d_{\text{сигн}} = 2 \sin(\pi / M). \quad (6)$$

За допомогою співвідношення (4) отримано відстані для 6PSK та 12PSK 1 В та 0,518 В відповідно. Виявлено, що для АММС6 та АММС12 відстані між сигнальними точками становлять 1 В та 0,586 В відповідно. Отже, завадостійкість АММС6 не менша від 6PSK, а завадостійкість АММС12 вища від 12PSK.

Відомо, що ефективність використання смуги частот при різних видах модуляції сигналу визначається коефіцієнтом використання каналу за смугою частот (біт/с/Гц)

$$\gamma = \frac{V}{\Delta F}, \quad (7)$$

де  $V$  – швидкість передавання даних, біт/с;  $\Delta F$  – ширина смуги каналу зв'язку, Гц.

Для фазової модуляції та для АММС коефіцієнт  $\gamma$  обчислюють за формулою

$$\gamma = \log_2 M, \quad (8)$$

де  $M$  – кількість інформаційних символів.

Результати розрахунку ефективності використання смуги частот при різних видах модуляції наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Ефективність використання смуги частот при різних видах модуляції**

Вид модуляції	BPSK	QPSK	6PSK	АММС6	12PSK	АММС12
$\gamma$ , біт/с/Гц	1	2	2,59	2,59	3,59	3,59

Отже, за допомогою АММС6 можливо передати 2,59 біт інформації за один інформаційний такт як при 6PSK та більше від QPSK (2 біт) чи BPSK (1 біт). При використанні АММС12 можливо передати  $\log_2 12 = 3,59$  біт як при 12PSK.

Бачимо, що при використанні модулюючих сигналів із двома можливими рівнями амплітуди при АММС6 одержимо решітку, подібну на 6PSK. При АММС12 точки решітки розташовані по всій площі сигнальної площини (при 12 PSK – лише по колу), що забезпечує вищу завадозахищеність запропонованої модуляції за рахунок збільшення мінімальної відстані між точками на сигнальній площині.

Суттєвою відмінністю АММС порівняно з PSK є те, що для демодуляції модульований сигнал подають на  $N$  перемножувачів. У демодуляторі опорні сигнали, зсунуті одні відносно інших на кути  $\varphi_n$ , що зменшує ймовірність виникнення помилки на виході демодулятора як при використанні АММС6 (порівняно з 6 PSK), так і при використанні АММС12 (порівняно з 12 PSK).

**Теоретичні дослідження радіоканалу БК-НІК при різних видах модуляції сигналів**

Дослідження радіоканалу БК-НІК здійснено для БК ДЗЗ TERRA (параметри наведені в табл. 2.) з використанням математичної моделі [4].

Таблиця 2

**Параметри БК ДЗЗ TERRA**

Частота несучої, МГц	Потужність передавача, Вт	Висота орбіти, км
8212,5	10	705

За результатами математичного моделювання радіоканалу БК-НІК отримано залежності оптимального діаметра антени  $D$  НІК від швидкості передавання даних  $V$  при різних видах модуляції (рис. 2).

З рис. 2 видно, як впливає вид модуляції на швидкість передавання даних в каналі зв'язку. Наприклад, швидкість передавання в каналі зв'язку зі смугою пропускання 100 МГц при BPSK становить 100 Мбіт/с, при QPSK – 200 Мбіт/с, при АММС6 – 259 Мбіт/с і при АММС12 – 359 Мбіт/с. Слід мати на увазі, що при технічній реалізації каналу зв'язку смугу пропускання збільшують на 10...20 % у зв'язку з неідеальністю фільтрів.

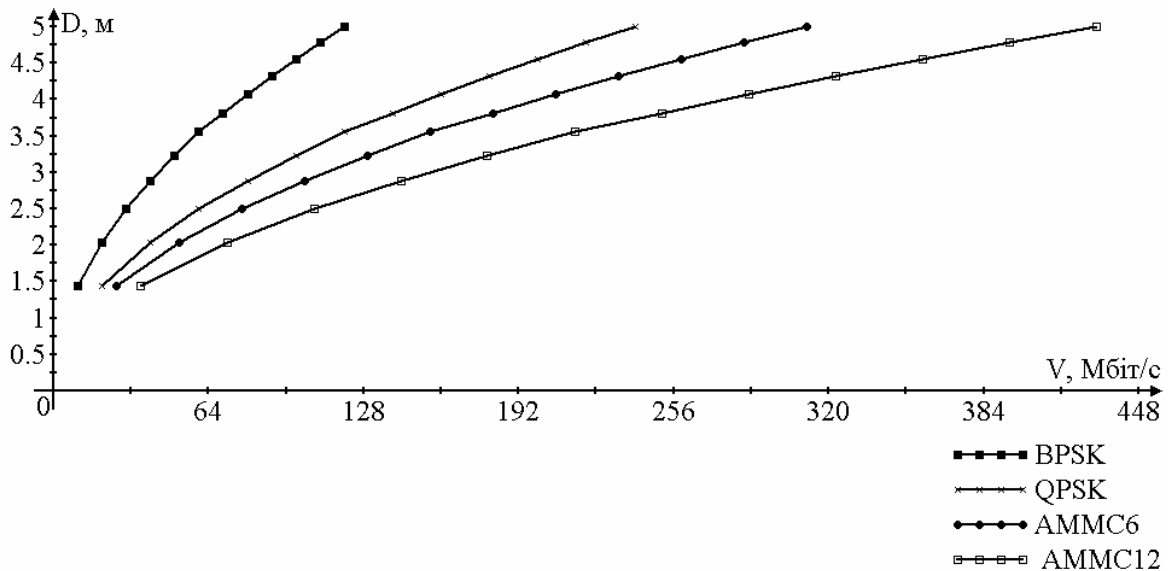


Рис. 2. Залежність оптимального діаметра антени НІК від швидкості передавання даних при різних видах модуляції: BPSK, QPSK, AMMC6, AMMC12

Також за результатами моделювання визначено, що при передаванні даних зі швидкістю, наприклад, 100 Мбіт/с при модуляції BPSK номінальний діаметр антени становить 4,56 м, при модуляції QPSK – 3,2 м, при модуляції AMMC6 – 2,83 м і при модуляції AMMC12 – 2,4 м. Отже, при використанні модуляції AMMC12 замість, наприклад, BPSK діаметр антени можливо зменшити в 1,9 раза.

### Висновки

1. Запропоновано метод підвищення ефективності телекомунікаційних каналів у системах зв'язку і ДЗЗ.
2. Досліджено ефективність використання каналів за смугою частот при використанні AMMC та інших видів модуляції.
3. Розраховано залежність оптимального діаметра антени НІК ДЗЗ від швидкості передавання даних при різних видах модуляції.
4. Запропонований метод підвищення ефективності телекомунікаційних каналів доцільно використовувати в сучасних телекомунікаційних каналах та системах передавання даних.

1 Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2004. – 1104 с.: ил. – Парал. тит. англ.  
 2. Прокус Д. Цифровая связь. Пер. с англ. / Под. ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь. 2000. – 800 с.: ил.  
 3. Anderson, John B., Tor Aulin, and Carl-Erik Sundberg, Digital Phase Modulation, New York, Plenum Press, 1986.