

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЦИФРОВИХ БЕЗПРОВІДНИХ СИСТЕМ ШЛЯХОМ ВИБОРУ МЕТОДІВ МОДУЛЯЦІЇ

© Пелішок В.О., 2009

Запропоновано методику вибору методів цифрової модуляції для забезпечення основних системних вимог до безпроводних систем передачі даних: заданої ймовірності появи бітових помилок та заданої швидкості передачі даних. Показниками ефективності системи є використання її енергетичних та частотних ресурсів.

The method of choice of methods of digital modulation is offered for providing of the basic system requirements to the off-wire systems transmissions given: set probability of appearance of bit errors and set speed transmissions given. The indexes of efficiency of the system is the use of it power and frequency resources.

Вступ

Ефективність системи загалом переважно визначається ефективністю використання її енергетичних ресурсів (потужності передавача, $P_{\text{прд}}$) та частотних ресурсів (необхідної смуги частот, F). Саме передавана потужність або рівень сигналу в точці приймання та ширина смуги пропускання є двома основними ресурсами систем безпроводного зв'язку. Хоча ці ресурси, як правило, завжди є дефіцитними, все-таки в багатьох практичних випадках один з них може бути наявний з надлишком, а другий – недостатнім. Тому проєктовані системи можна класифікувати як системи з обмеженою потужністю та системи з обмеженою смугою пропускання. У разі недостатнього сигналу в точці прийому можна також підвищити ефективність системи та забезпечити поставлені вимоги, застосовуючи кодування.

Розробка системи цифрового зв'язку розпочинається з опису каналу зв'язку: прийнятої потужності смуги пропускання, статистики шуму та інших ефектів погіршення якості сигналу, наприклад, внаслідок замирань. Далі визначаються системні вимоги, основними з яких є швидкість передачі даних R та ймовірність P_b появи бітових помилок. У цій роботі розглядається вибір методів модуляції як засобів підвищення ефективності безпроводних систем передачі даних шляхом зменшення вимог до енергетичних та частотних ресурсів ($P_{\text{прд}}$, F), але за забезпечення заданих основних показників системи (P_b , R). Під час вирішення подібних проблем відомими методами [1, 3] використовуються дві площини:

- залежності $P_b(E_b/N_0)$ для різних видів модуляції від відношення сигнал/шум (E_b/N_0 , E_b – енергія одного біта, N_0 – спектральна густина шуму);
- залежності $R(E_b/N_0)$ для різних видів модуляції.

Фактично вибір необхідного методу модуляції здійснюється перебором різних її видів, причому тільки після послідовного отримання результатів в двох згаданих площинах.

У цій роботі для вирішення проблеми пропонується використання просторової залежності, проєкція якої на одну площину є залежністю $P_b(E_b/N_0)$, а на другу площину – залежністю $R(E_b/N_0)$. Розроблена методика з використанням запропонованої просторової залежності значно спрощує вибір необхідної модуляції та забезпечує наочність процесу вибору.

1. Забезпечення заданої ймовірності появи бітових помилок

1.1. Інтеграл похибок

Під час аналізу системи вважаються заданими:

- відношення (P_r/N_0) потужності прийнятого сигналу P_r до спектральної густини потужності шуму N_0 ;

- дозволена смуга частот F для каналу зв'язку;
- необхідна швидкість передачі даних R біт/сек та ймовірність бітових помилок P_b .

Ймовірність появи бітових помилок – один з основних показників, які задаються під час проектування системи. Для різних систем цей показник може знаходитись в межах, орієнтовно від 10^{-3} до 10^{-9} . Реалізована в системі ймовірність P_b неправильного відтворення повідомлення не повинна перевищувати заданого значення. Ймовірність появи бітових помилок здебільшого визначається на основі інтеграла похибок Гауса:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du. \quad (1)$$

На рис. 1 показано залежність інтеграла похибок від значення x .

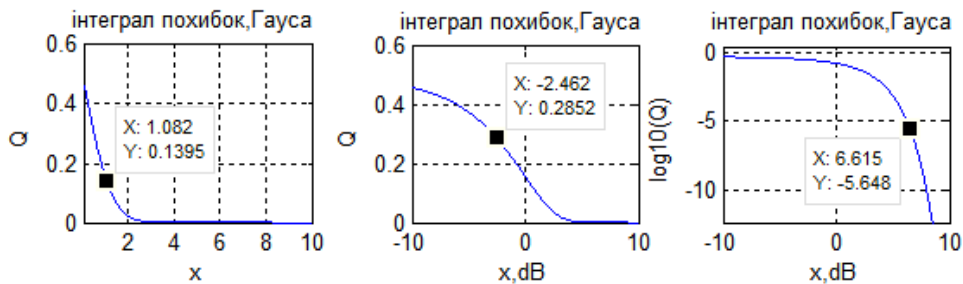


Рис. 1. Інтеграл похибок Гауса

Ці графіки відрізняються між собою масштабом по осях координат. Бачимо, що найзручніше користуватись значеннями в дБ по осі x , причому за малих значень x – лінійним масштабом по осі y , а за великих значень x – логарифмічним масштабом по осі y . З наведених графіків можна визначити значення інтеграла за будь-якого значення аргументу. Отже, залежність $Q(x)$ має увігнутий характер і лише завдяки зміні масштабу характер його зміни перетворився на випуклий. Крайній правий графік на рис. 1 отримано на основі такої запропонованої програми 1, розробленої в системі Matlab.

Програма 1

```

syms u1 v
a1=1/(sqrt(2*pi)); a2=exp(-v^2/2);
u=10^(u1/10); a3=int(a2,v,u,inf);
a4=log10(a1*a3);
ezplot(a4,[-10,10])
title 'інтеграл похибок,Гауса ';
grid on;
xlabel('x,dB');
ylabel('log10(Q) ');
axis([-10 10 -9 0 ])

```

Варто зауважити, що Програма 1 заміняє цілі таблиці, наведені, наприклад, у [3].

1.2. Залежність P_b від виду модуляції

Ймовірність появи бітових помилок залежить від виду модуляції та визначається так [3]:

$$P_b = 2Q \sqrt{2(\log_2 M) \frac{E_b}{N_0} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{M}\right)} \quad (2,a)$$

– для MPSK-модуляції;

$$P_b = \frac{2^{k-1}}{(2^k - 1)} \cdot \frac{(M-1)}{2} \cdot e^{-\frac{E_b}{2N_0} \cdot \log_2 M} \quad (2,6)$$

– для некогерентної MFSK-модуляції.

Значення параметра P_b , який характеризує ймовірність появи бітових помилок, переважно залежить від енергетичної ефективності системи. Така ефективність визначається нормованим відношенням сигнал/шум E_b/N_0 , яке повинно бути наявне на приймальному боці радіолінії для забезпечення заданої якості зв'язку, тобто (2.1) реалізована в системі ймовірність P_b неправильного відтворення повідомлення не повинна перевищувати заданого значення (P_b)_з. Відношення сигнал/шум E_b/N_0 визначається як відношення енергії сигналу E_b , необхідної для передачі одного біта повідомлення, до спектральної густини N_0 усіх шумів в радіолінії, причому значення E_b , N_0 визначаються на виході приймальної антени. Таке відношення є універсальним енергетичним показником. Кращим, з точки зору використання енергетичного потенціалу, є варіант такої системи, яка вимагає меншого значення E_b/N_0 , тобто меншої енергії від передавача для передачі кожного біта повідомлення за однакових шумів в радіолінії. Між заданим значенням P_r/N_0 та значенням E_b/N_0 , яке використовується під час визначення ймовірності появи бітової помилки P_b , наявна така залежність:

$$\frac{P_r}{N_0} = \frac{E_b}{N_0} \cdot R \quad (3)$$

2. Забезпечення заданої швидкості передачі

2.1. Ефективність використання смуги частот

Значення параметра R , який характеризує швидкість передачі даних, переважно залежить від ефективності використання смуги частот (питомої швидкості передачі інформації, біт/с/Гц), яка характеризується відношенням реалізованої у цій системі швидкості R біт/с передачі інформації до ширини смуги частот F , яку займає система:

$$\gamma = \frac{R}{F} \quad (4)$$

На практиці часто для підвищення ефективності радіомережі використовуються M -арні модуляції, які можуть передавати M різних символів, кожен з яких містить k -біт, причому

$$M=2^k \text{ або } k=\log_2 M \quad (5)$$

Аналіз показує [2], що ефективність використання смуги частот залежить від виду модуляції, причому:

$$\gamma = \log_2 M \quad (6,а)$$

– для M -арної фазової модуляції (MPSK);

$$\gamma = \frac{\log_2 M}{M} \quad (6,б)$$

– для M -арної частотної модуляції (MFSK).

Бачимо, що для MPSK-модуляції ефективність γ використання каналу збільшується за збільшення M . Зовсім інша ситуація виникає під час використання MFSK-модуляції – ефективність використання каналу зменшується за збільшення M .

В табл. 1 наведені, для порівняння, значення ефективності R/F використання смуги частот для деяких видів M -арної модуляції.

Таблиця 1

Значення ефективності R/F використання смуги частот

M, k	$M=2, k=1$	$M=4, k=2$	$M=8, k=3$	$M=16, k=4$	$M=32, k=5$	$M=64, k=6$
$\log_2 M$ (MPSK)	1	2	3	4	5	6
$\log_2 M / M$ (MFSK)	1/2=0.5	2/4=0.5	3/8= 0.3750	4/16=0.25	5/32=0.1563	6/64=0.0938

За відомим значенням γ можна визначити (1), у скільки разів швидкість передачі даних більша за смугу частот:

$$R = \gamma F. \quad (7)$$

З залежностей (6), (7) та табл. 1 зрозуміло, що за однакової смуги пропускання один з видів модуляції (MPSK) забезпечує швидкість передачі R в $\log_2 M > 1$ разів більшу за смугу пропускання, а інший вид модуляції (MFSK) – швидкість в $\log_2 M / M < 1$, меншу за смугу пропускання. Наприклад, за $M=8$ та однакової смуги пропускання швидкість передачі під час використання MPSK-модуляції буде у 8 разів більша порівняно з MFSK-модуляцією. Тому може виникнути питання, навіщо взагалі використовувати MFSK-модуляцію, яка є такою неефективною з точки зору швидкості передачі.

2.2. Площина «смуга-ефективність»

У роботі Шенона [3] показано, що пропускна здатність (C в біт/с) каналу з адитивним білим гауссовим шумом є функцією середньої потужності P_c прийнятого сигналу, середньої потужності шуму P_u та ширини смуги пропускання F :

$$C = F \cdot \log_2 \left(\frac{P_c + P_u}{P_u} \right). \quad (8)$$

Варто зауважити, що залежність (5) справедлива для систем з однією несучою частотою. З залежності (8) можна зробити висновок, що, теоретично, під час використання складної схеми кодування інформацію через канал можна передавати з будь-якою швидкістю R ($R \leq C$), причому також з малою ймовірністю виникнення помилки. Навпаки, якщо $R > C$, то коду, на основі якого можна домогтись будь-якої малої ймовірності виникнення помилки, не існує. Використовуючи формулу Шенона (8), можна встановити взаємозв'язок між показниками ефективності використання системи E_b/N_o та R/F . Враховуючи введені коефіцієнти ефективності та прийнявши в залежності (8), що максимальна пропускна здатність системи дорівнює швидкості передачі інформації ($C = R$), отримаємо

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{2\gamma - 1}{\gamma}. \quad (9)$$

На рис. 2 показано площини «смуга-ефективність», тобто залежності, отримані на основі (6), для нормованої R/F пропускної здатності каналу або ефективності використання смуги частот за $C=R$.

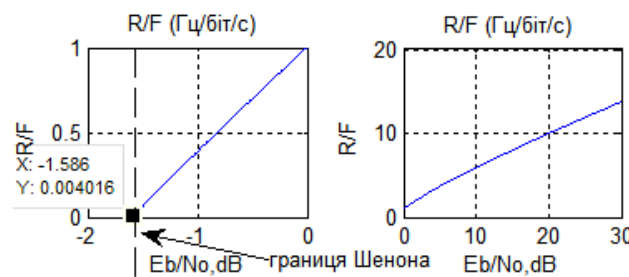


Рис. 2. Залежності ефективності використання смуги частот від E_b/N_o

З наведених графіків бачимо, що область реальних значень ефективності використання смуги частот ($R/F > 0$) обмежена зліва границею Шенона. Наведені дані демонструють ефективність використання смуги частот. Значення R/F якраз і є мірою обсягу даних, які можна передати через одиницю смуги частот за даний час, тобто вона відображає ефективність використання смуги пропускання. Графіки відповідають умові $R=C$, тобто представляють границю, яка розділяє область реальних прикладних систем зв'язку та область, в якій такі системи принципово неможливі.

3. Вибір виду модуляції для забезпечення основних системних вимог

3.1. Вибір виду модуляції для забезпечення заданого значення R_b

Розглянемо два варіанти (табл. 2) технічних даних та основних системних вимог для проєктованої мережі.

Технічні дані проєктованої мережі

Параметри/варіанти	Варіант 1	Варіант 2
Відношення сигнал/шум прийнятого сигналу P_r/N_o , дБ/Гц	55	50
Смуга пропускання F , Гц	4400	44000
Швидкість передачі R , біт/сек	9600	9600
Ймовірність появи бітових помилок	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$

Визначимо першу необхідну умову, якій повинні задовольняти вибрані види модуляції. Бачимо, що для варіанта 1 задана швидкість передачі значно більша за доступну смугу передачі ($R/F=9600/4400>2.18$), тому цей канал можна вважати каналом з обмеженою смугою пропускання. У цьому випадку, згідно з даними табл.1, можна використати MPSK ($M \geq 8$) модуляцію, тобто модуляцію зі значенням $\gamma > 2.18$. Аналогічно визначимо, що для варіанта 2 наявний значний запас смуги пропускання ($R/F=9600/44000>0.218$). Отже, для варіанта 2 прийнятні усі види модуляції, для яких $\gamma > 0.218$, тобто MFSK-модуляція (за $M \leq 16$) та усі види MPSK-модуляції.

Визначимо другу необхідну умову, якій повинні задовольняти вибрані види модуляції. З врахуванням залежності (3) визначимо значення сигнал/шум (E_b/N_o) в точці приймання

$$E_b/N_o = 55 \text{ дБ/Гц} - (10 \lg 9600) \text{ дБбіт/с} = 15.2 \text{ дБ} \quad (10a)$$

– для варіанта 1;

$$E_b/N_o = 50 \text{ дБ/Гц} - (10 \lg 9600) \text{ дБбіт/с} = 10.2 \text{ дБ} \quad (10б)$$

– для варіанта 2.

Порівнюючи дані (10a), (10б) для обох варіантів, можна вважати другий варіант системою з обмеженою потужністю прийнятого сигналу. Отже, необхідне відношення сигнал/шум для вибраних видів модуляції повинно бути не більшим від значень, наведених в (10a), (10б).

Визначимо третю необхідну умову, якій повинні задовольняти вибрані види модуляції, тобто забезпечити ймовірність появи бітової помилки $P_b \leq 5.5 \cdot 10^{-5}$. На рис. 3 показано залежність $P_b(E_b/N_o)$ MPSK ($M \geq 8$) модуляції, яку можна використовувати для варіанта 1.

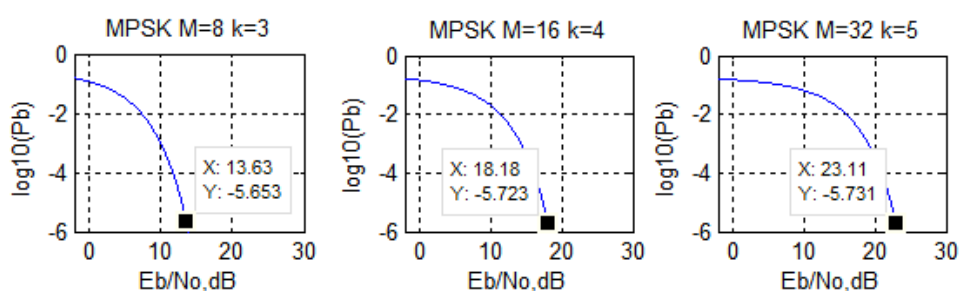


Рис. 3. Ймовірність появи бітових помилок для MPSK-модуляції

Бачимо, що серед видів MPSK-модуляції ($M \geq 8$), тільки одна задовольняє вимогам (10a) для варіанта 1, а саме – MPSK-модуляція ($M=8$). Для усіх інших видів MPSK-модуляції необхідне більше відношення сигнал/шум E_b/N_o , яке відсутнє у цій системі.

Аналогічно визначимо третю необхідну умову для варіанта 2 (для якого згідно з першою умовою можуть бути прийнятні усі види MPSK-модуляції та MFSK-модуляції (за $M \leq 16$)). На рис. 4 показано залежність $P_b(E_b/N_o)$ MPSK ($M=2$) модуляції, яку також (враховуючи модуляції, показані на рис. 3) можна використовувати для варіанта 2.

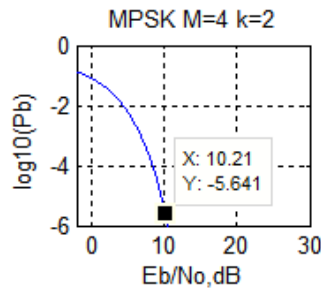


Рис. 4. Ймовірність появи бітових помилок для MPSK ($M=4$) модуляції

З наведених графіків (рис. 3, 4) зрозуміло, що жодна з MPSK-модуляцій не може бути використана для варіанта 2, тому що необхідне відношення сигнал/шум більше від значення (10б), яке реально наявне в системі. На рис. 5 показані аналогічні залежності $P_b(E_b/N_0)$ для FSK ($M \leq 16$) модуляції.

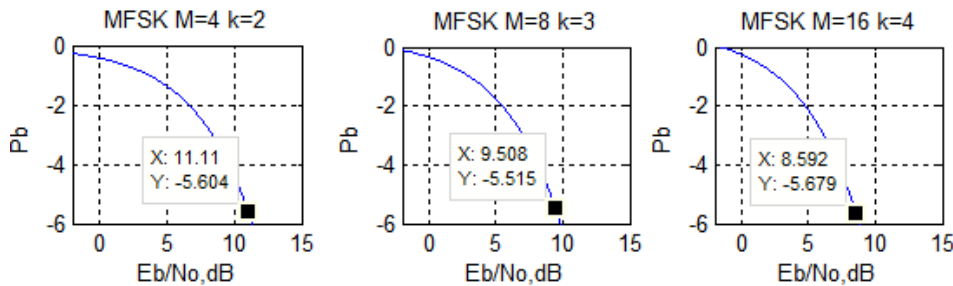


Рис. 5. Ймовірність появи бітових помилок для MFSK ($M \leq 16$) модуляції

Бачимо, що серед видів MFSK-модуляції ($M \leq 16$) тільки дві задовольняють вимогам (10а) для варіанта 2, а саме MFSK-модуляція ($M=16$ та $M=8$). Для усіх інших видів MFSK-модуляції необхідне більше відношення сигнал/шум E_b/N_0 , яке відсутнє у цій системі.

Отже, задане значення ймовірності появи бітових помилок може забезпечити: для варіанта 1 – 8PSK-модуляція, для варіанта 2 – 16FSK або 8FSK.

3.2. Вибір виду модуляції для забезпечення заданого значення R

Визначимо четверту необхідну умову, якій повинні задовольняти вибрані види модуляції, з точки зору забезпечення заданої швидкості передачі. На рис. 6 показано площину «смуга-ефективність», на яку нанесена точка цієї модуляції 8PSK (рис. 3 – $E_b/N_0=13.63$, $R/F=k=3$).

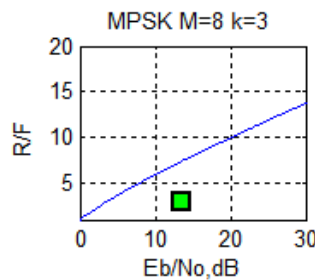


Рис. 6. Площина «смуга-ефективність» з даними для варіанта 1 (модуляції 8PSK)

Бачимо, що дані для вибраної модуляції знаходяться нижче від граничної залежності. Отже, модуляція 8PSK забезпечує вимоги для швидкості передачі в системі, дані якої відповідають варіанту 1.

На рис. 7 показано аналогічну площину «смуга-ефективність», на яку нанесені точки, що відповідають модуляції 8FSK (рис. 5 $E_b/N_0=9.5$, $R/F=k=3$) та 16FSK (рис. 5 – $E_b/N_0=8.6$, $R/F=k=4$).

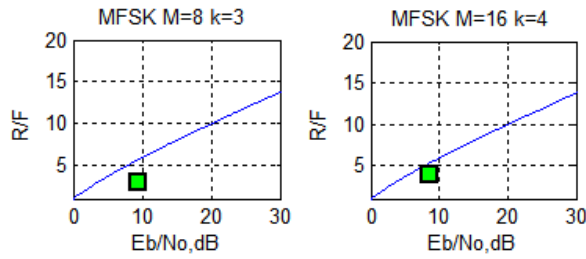


Рис. 7. Площина «смуга-ефективність» з даними для варіанта 2 (модуляції 8FSK, 16FSK)

Бачимо, що показники модуляції 16FSK фактично знаходяться на межі граничної залежності. Тому потрібно віддати перевагу модуляції 8FSK, якій властивий значний запас стосовно граничної залежності.

4. Приклад використання запропонованої методики

4.1. Вибір виду модуляції для системи згідно з варіантом 1

Для системи з вимогами згідно з варіантом 1 на рис. 8, а показано запроповану просторову залежність «ймовірність помилки – смуга-ефективність», на рис. 8, б – її одна проекція на площину (яка є площиною «ймовірність помилки – ефективність»), на рис. 8, в – її друга проекція на площину (яка є площиною «смуга-ефективність»).

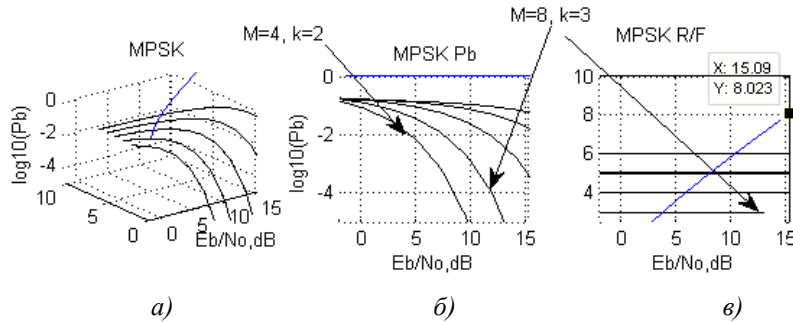


Рис. 8. Просторова залежність «ймовірність помилки – смуга-ефективність» для MPSK-модуляції

З рис. 8, б можна зробити висновок, що тільки один вид MPSK-модуляції (за $M \geq 8$), а саме – 8PSK може забезпечити задане значення $P_b \leq 10^{-5}$. Фактично з трьох наведених рисунків досить користуватись одним (рис. 8, в), з якого зрозуміло, що (за $M \geq 8$) можна використати тільки модуляцію 8PSK, яка вимагає такого відношення сигнал/шум, що задовольняє вимозі (10а).

4.2. Вибір виду модуляції для системи згідно з варіантом 2

Для системи з вимогами згідно з варіантом 2 на рис. 9, а показано аналогічну просторову залежність «ймовірність помилки – смуга-ефективність», на рис. 9, б – її одну проекцію на площину (яка є площиною «ймовірність помилки – ефективність»), на рис. 9, в – її другу проекцію на площину (яка є площиною «смуга-ефективність»).

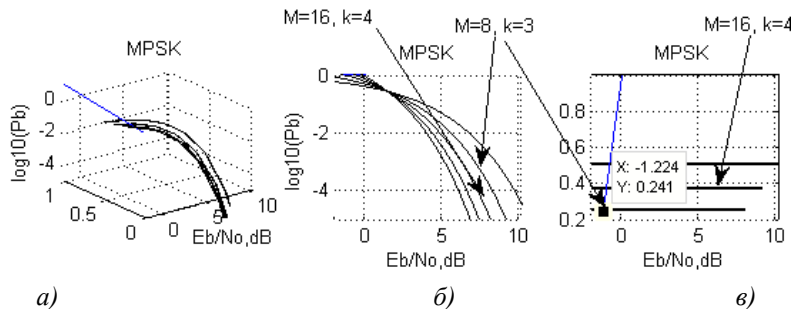


Рис. 9. Просторова залежність «ймовірність помилки – смуга-ефективність» для MFSK-модуляції

З рис. 9, б можна зробити висновок, що тільки два види MFSK-модуляції (за $M \leq 16$), а саме – 8FSK та 16FSK можуть забезпечити задане значення $P_b \leq 10^{-5}$. Фактично з трьох наведених рисунків можна користуватись одним (рис. 8, в), з якого зрозуміло, що (за $M \leq 16$) можна використати тільки два види модуляції, які вимагають такого відношення сигнал/шум, що задовольняє вимозі (10а). Але з двох можливих видів доцільно віддати перевагу модуляції 8PSK, якій властивий більший запас за відношенням сигнал/шум.

Висновки

Під час вибору видів модуляції для безпроводних систем, які повинні забезпечити основні системні параметри (задані швидкість передачі та ймовірність появи бітових помилок) використовується почерговий аналіз у двох площинах: «смуга-ефективність» та «ймовірність помилок – ефективність».

Запропоновано просторову залежність «ймовірність помилок – смуга-ефективність», використання якої дає змогу значно спростити процес вибору необхідного виду модуляції. Розроблено графічний інтерфейс користувача в системі Matlab на базі запропонованої просторової залежності.

1. Вишневский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с. 2. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь: Учебное пособие для вузов. – М.: “Горячая линия-Телеком”, 2007. – 432 с. 3. Скляр Бернанд. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – 2-е изд., испр. / Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 1104 с.