

## Висновки

Запропонований метод дає можливість будувати прогнозуючі моделі поведінки системи в умовах обміну інформацією з оточуючим середовищем, виконувати нормативний прогноз поведінки системи по заданій прогнозній функції. Він дозволяє перевести процедуру прогнозування на якісно новий рівень, доповнює існуючі методи прогнозування та системного аналізу в керуванні і зв'язку [2,4].

## Література

1. Крапивин В.Ф. Теоретико-игровые методы синтеза сложных систем в конфликтных ситуациях. – М.: Сов. радио, 1972. – 192с.
2. Кузнецов Ю.М., Скляр Р.А. Прогнозування розвитку технічних систем. – К.: ТОВ «ЗМОК» – ПП «ГНОЗИС», 2004. – 323с.
3. Козловский В.В., Бычковский В.А., Свечников Г.С., Згурский А.В. Синтез неоднородных электромагнитных сред. – К.: Наукова думка, 1992. – 264с.
4. Теория систем и методы системного анализа в управлении и связи. Волкова В.Н. и др. – М.: Радио и связь, 1983. – 248с.

Бычковский В.А. <b>Нормативный прогноз поведения системы в окружающей среде</b> Анализируется процесс информационного обмена между системой и окружающей средой. Приведена методика нормативного прогноза поведения системы и пример прогнозирования по заданной прогнозной функции	Bychkovsky V.A. <b>The rate prognosis of system behavior in environment</b> The information exchange process between system and environment is considered and analyzed. Rate prognosis method for system behavior and example of prognosis by set prognosticate function is present.
---	--

УДК 621.391

## МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ З OFDM МОДУЛЯЦІЄЮ

Глинянов А. О., Головін В. А.

*Розроблена модель системи передачі даних з OFDM модуляцією, яка дозволяє проводити дослідження в широкому діапазоні параметрів. Проведена оцінка ефективності використання різних видів модуляції в OFDM системі.*

### Вступ. Постановка задачі

Для поліпшення якості передачі даних в системах радіозв'язку використовується багатоканальна передача. При цьому діапазон частот розбивається на ряд смуг, по яких дані передаються паралельно. Однак такий спосіб передачі даних має два недоліки:

- необхідність застосування банку фільтрів у приймачі;
- неефективне використання спектру сигналу.

### Математичний апарат формування OFDM сигналу

Щоб уникнути вказаних недоліків, можна використати спектр, ортогональних частот. Кожна з частот вибирається виходячи з умови, що її період укладається ціле число разів у період передачі символу. Ортогональність забезпечується на певному інтервалі часу  $T_u$ , і визначається умовою:

$$\int_0^{T_u} f_l(t) f_m(t) dt \neq 0 \text{ при } l = m ; \int_0^{T_u} f_l(t) f_m(t) dt = 0 \text{ при } l \neq m$$

Модулюючий комплексний інформаційний символ, визначається як  $\dot{F}_n = F_n e^{j\varphi_n}$ , де  $F_n$  - амплітуда символу;  $\varphi_n$  - фаза символу;  $n=0,1,2,\dots,(N-1)$ .

Завдання, розв'язуване *OFDM* (*Orthogonal frequency-division multiplexing* – ортогональна частотна модуляція), зводиться до одержання на інтервалі часу  $T_u$  безперервного сигналу, що складається з  $N$  гармонік, модульованих символами  $F_n$  :

$$s(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} F_n \cos(2\pi f_n t + \varphi_n) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \text{Re}(\dot{F}_n e^{j2\pi f_n t}) \quad (1)$$

Виконаємо перехід від безперервного часу до дискретного:  $t=kT$ , де  $k=0,1,2,\dots,(N-1)$ . Період дискретизації  $T$  виберемо з умови  $T_u/T=N$  і одержимо значення сигналу в момент часу  $kT$

$$S_k = S(kT) = \frac{1}{N} \text{Re} \sum_{n=0}^{N-1} \dot{F}_n e^{j2\pi \cdot nk \frac{T}{T_u}} = \frac{1}{N} \text{Re} \sum_{n=0}^{N-1} \dot{F}_n e^{jnk \frac{2\pi}{N}} \quad (2)$$

Таким чином, ми перейшли від безперервної форми опису *OFDM* сигналу (1) до дискретного (2). Отримане рівняння являє собою не що інше, як дійсну частину зворотного дискретного перетворення Фур'є (*IFFT*). *IFFT* в *OFDM* модуляторах здійснюється в комплексній формі  $\dot{S}_k = \dot{S}(kT) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \dot{F}_n e^{jnk \frac{2\pi}{N}}$

Дана система відображає процес модуляції гармонік інформаційними символами  $F_n$ . При цьому варто виділити три моменти:

- кожний символ модулює тільки одну гармоніку;
- у формуванні кожного відліку приймають участь всі символи;
- процеси формування гармонік і їхньої модуляції в рамках *IFFT* сполучені.

У загальному випадку з  $N$  гармонік можуть бути використані не всі, що адекватно присвоєнню в системі рівнянь ряду символів нульових значень. Розглянемо процес демодуляції *OFDM* сигналу. При цьому будемо вважати, що в прийомному пристрої на основі прийнятого сигналу сформовані часові відліки  $S(k)$ , для яких пряме дискретне перетворення Фур'є:

$$\dot{F}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \dot{S}(kT) e^{-jnk \frac{2\pi}{N}}$$

Власне кажучи виділення кожного символу  $F_n$  реалізується шляхом інтегрування на інтервалі часу  $T_u$  добутку комплексного значення *OFDM* сигналу на певну комплексну експоненту.

Однією з головних проблем радіозв'язку є затримка приходу сигналу, викликана багатопроменевим поширенням сигналу. Міжсимвольна взаємодія може бути практично повністю ліквідована за рахунок введення захисного інтервалу для кожного *OFDM* символу. Захисний інтервал вибирається більше, ніж передбачувана затримка. Потім, в початок сигналу додається кі-

лька останніх елементів інформаційного сигналу. Тоді прийнятий багатопробієвий сигнал після захисного інтервалу часу буде співпадати з відправленим. Можливий і частотний підхід до оцінки багатопробієвого прийому. У результаті інтерференції радіосигналів, прийнятих з різними затримками, деякі частотні компоненти радіосигналу послаблюються, а деякі – підсилюються. За допомогою перестроюваних фільтрів, частотну характеристику можна спробувати зробити рівномірною в частотному діапазоні сигналу, якщо попередньо оцінити нерівномірність. У системі *OFDM* подавлені компоненти можуть бути повністю відновлені завдяки використанню частотного ущільнення в сполученні з кодуванням, що виявляє й виправляє помилки. Кожна гармоніка пакету *OFDM* несе лише невелику частину даних, помилки в якій можуть бути виявлені й виправлені за допомогою системи каналного кодування.

Система *OFDM* надає додаткові можливості за умови, якщо оцінюється частотна характеристика каналу. При передачі корисної інформації в пакет даних вводиться пілот-сигнал, по якому в прийомному кінці можна сформувати частотну характеристику каналу й обчислити коригувальні коефіцієнти для компенсації спотворень. *OFDM* система передачі даних має переваги: ефективне використання спектру; застосування перетворення Фур'є замість дорогих фільтрів; ефективна боротьба з міжсимвольною взаємодією. Разом з тим, *OFDM* система передачі має і суттєві недоліки: чутливість до високочастотного фазового шуму; чутливість навіть до невеликих коливань частоти; чутливість до спотворень у системі синхронізації;

Для вивчення властивостей системи передачі даних з *OFDM* модуляцією, у системі *Simulink* була розроблена математична модель (рис. 1).

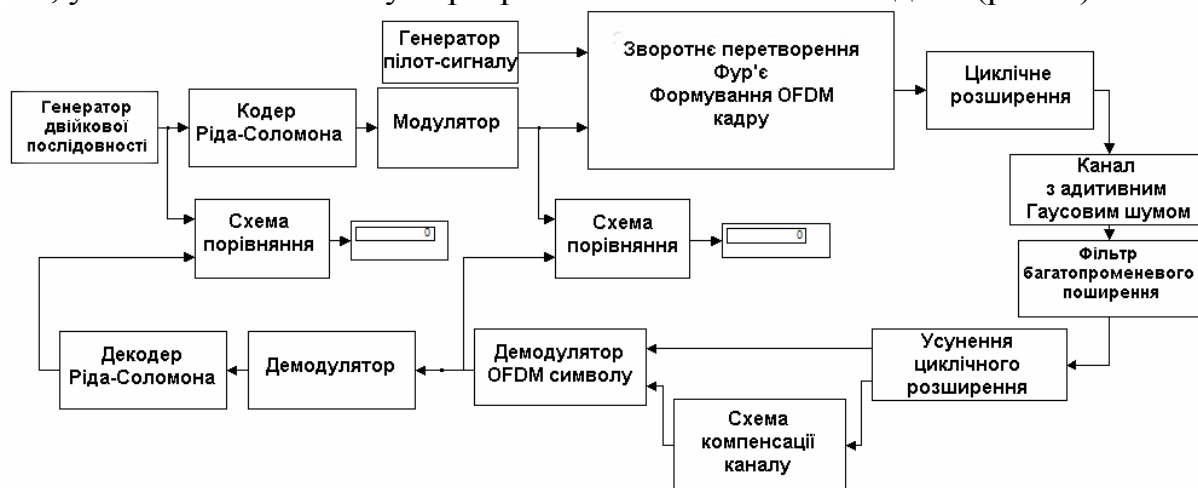


Рис. 1

### Передавач *OFDM* сигналу.

1. Генератор двійкової послідовності (*Bernoulli Binary*). Генерує випадковий двійковий сигнал, що представляється у вигляді інформаційної матриці, рядки якої передаються в подальші блоки обробки.

2. Кодер Ріда-Соломона (використовувався код Ріда-Соломона (15,11)).

3. Модулятор. В моделі застосовується фазова модуляція (*PSK*): двофазова *PSK* (*BPSK*) і чотирьохфазова *PSK* (*QPSK*), а також квадратурна амплітудна модуляція (*QAM*): 64 *QAM*.

4. Генератор пілот-сигналів, для оцінки відгуку каналу

5. Блок формування *OFDM* символу (*IFFT*, введення захисного інтервалу і пілот-сигналу). Зворотнє дискретне перетворення Фур'є - основний елемент *OFDM* системи, що формує спектр сигналу і забезпечує ортогональність частот. Захисний інтервал використовується для боротьби з міжсимвольними взаємодіями, обумовленими затримкою сигналу.

6. Канал передачі даних

6.1. Канал передачі з релеївськими завмираннями

6.2. Канал з адитивним Гаусовим шумом.

**Приймач *OFDM* сигналу.**

7. Усунення захисного інтервалу.

8. Демодулятор *OFDM* символу - обчислення дискретного перетворення Фур'є. Виділення пілот-сигналу.

9. Оцінка відгуку каналу - оцінюється відгук каналу на передану відому пілотну послідовність і відбувається оцінка й корегування вхідного сигналу.

10. Демодулятор. При демодуляції для кожного прийнятого символу відбувається пошук найближчого до нього елемента сузір'я.

11. Декодер Ріда-Соломона.

**Результати досліджень. Висновки**

За допомогою даної моделі досліджена залежність бітової помилки від відношення сигнал шум в каналі передачі при різних

Таблиця

видах модуляції (*BPSK*, *QPSK*, 64*QAM*). Моделювання проводилося з використанням 64 піднесучих, введенням захисного інтервалу і передачею пілот-сигналів. Результати моделювання (див. таблицю), показують, що при складних умовах зв'язку доцільно використовувати *BPSK* і *QPSK* модуляцію. Але ці види модуляції забезпечують невисоку швидкість передачі даних, тому при більших відношеннях  $E_b/N$  вигідніше використовувати багатопозиційну модуляцію, яка забезпечує значно більшу швидкість передачі даних.

Вид модуляції	Відношення $E_b/N$ , дБ	Bit Error Rate
BPSK	3	$2 \cdot 10^{-1}$
	9	$5 \cdot 10^{-4}$
	12	$2 \cdot 10^{-6}$
	18	$3 \cdot 10^{-7}$
QPSK	3	$2 \cdot 10^{-1}$
	9	$7 \cdot 10^{-4}$
	12	$8 \cdot 10^{-6}$
	18	$4 \cdot 10^{-7}$
64-QAM	3	$7 \cdot 10^{-1}$
	9	$2 \cdot 10^{-1}$
	12	$3 \cdot 10^{-2}$
	18	$2 \cdot 10^{-4}$

**Література**

1. В.М.Вишнеvский, А.И. Ляхов, В.И. Шахнович. "Широкополосные беспроводные сети передачи информации" – М.: "Техносфера", 2005. 592 с.
2. Скляр Б. Цифровая связь. М. "Вильямс", 2003. 1104 с.
3. Lawtey E. Adaptive Techniques for Multiuser OFDM. James Cook Univ. Press. 2001. 325 с.

Глинянов А.О., Головин В.А.

Glinjanov A.O., Golovin V.A.

---

---

<b>Моделирование системы передачи данных с <i>OFDM</i> модуляцией</b> Разработана модель системы передачи данных с <i>OFDM</i> модуляцией, которая позволяет проводить исследования в широком диапазоне параметров. Проведена оценка эффективности разных видов модуляции в <i>OFDM</i> системе.	<b>Simulation of an OFDM-Based communication system</b> The developed model OFDM communication system is developed; this model can use for research with wide range of parameters. Estimation efficiency of different type modulation at OFDM systems is shown.
---	--