

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОДУВАННЯ В СУЧАСНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ ETHERNET

Азаров О.Д., Кадук О.В.

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

кафедра обчислювальної техніки

E-mail: azarov@vstu.vinnica.ua

### Abstract

*Azarov O. D., Kaduk O. V. Analysis of coding methods in modern computer networks Ethernet. The effectiveness of using coding methods in computer networks Ethernet is evaluated. The coding circuitry of computer networks 100Base-T4, 100Base-TX, 1000Base-T are considered. The formation technologies of modern computer networks are compared.*

### Вступ.

Технологія Ethernet з'явилася у 1973 році в результаті експериментальних досліджень, що проводились фірмою Xerox. Мережа Ethernet будувалась на товстому коаксіальному кабелі і підтримувала швидкість передачі даних 2,9 Мбіт/с. Технологія поширювалася і поступово з лабораторної мережі перетворилася на технологію для побудови нових систем, що працювали зі швидкістю передавання даних 10 Мбіт/с. У 1981 році фірма 3Com представила 10Мбіт/с Ethernet-трансівер, а у 1982 році – перший Ethernet-адаптер для персонального комп'ютера. Наступним кроком було затвердження IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) стандарту Ethernet 802.3 і Ethernet 10Base5. Як середовище передачі даних використовувався товстий коаксіальний кабель. Поступово відбувся перехід на тонкий коаксіальний кабель. І вже у 1985 році з'являється технологія 10Base-T, що використовувала як середовище передачі нескрановану скручену пару. Саме цей стандарт отримав подальший розвиток. Сьогодні при побудові комп'ютерних мереж переважає технологія 100Base-T, що відповідає стандарту IEEE 802.3u, затвердженому у 1995 році. 100Base-T має два різновиди реалізації — 100Base-TX і 100Base-T4. У 1996 році розпочато розробки по стандартизації мереж Ethernet зі швидкістю передачі даних 1000Мбіт/с. Через два роки прийнято стандарт IEEE 802.3z, що використовував одномодове і багатомодове оптоволокно, а також STP (shielded twisted pair — екранована скручена пара) категорії 5 на короткі відстані до 25 метрів. Мала відстань передачі даних при використанні скрученої пари спричинила до значного зменшення її використання при побудові мереж. Зміни відбулися у 1999 року, коли було прийнято стандарт IEEE 802.3ab — передача даних зі швидкістю 1000Мбіт/с по неекранованій скрученій парі на відстань до 100 м. Це був стандарт 1000Base-T. Розглянемо схеми кодування у мережах 100Base-T4, 100Base-TX, 1000Base-T.

### Технологія 100Base-T4.

Інтерфейс типу 100Base-T4 розроблявся з урахуванням можливостей використання існуючої кабельної системи категорії 3 для передачі 100-мегабітних сигналів у напівдуплексному режимі. Структурну схему взаємодії двох мережних інтерфейсів 100Base-T4 зображено на рис. 1.

В устаткуванні розглянутого стандарту для передачі інформації в конкретний момент часу задіяні одночасно три пари. Пари 1 і 2 застосовуються для однонаправленої передачі сигналів, що забезпечує можливість функціонування механізму виявлення колізій, тоді як пари 3 і 4 можуть працювати у двонаправленому режимі передачі.

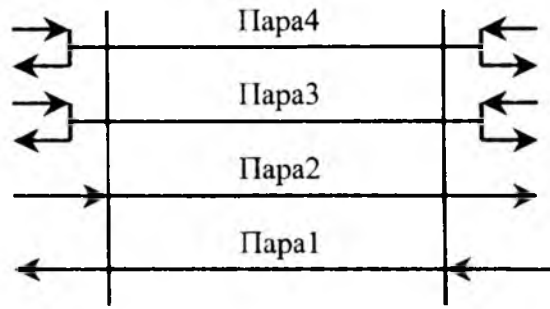


Рисунок 1 --- Схема взаємодії мережеских інтерфейсів

Напрямок передачі даних по цих парах у конкретний момент часу визначається керуючими сигналами. Використання трьох скручених пар одночасно дозволяє передавати по кожній з них інформаційний потік зі швидкістю:

$$V = \frac{100}{3} = 33,33 \text{ Мбіт/с.}$$

Для зменшення тактової частоти застосовується формування лінійного сигналу з використанням тривіневого коду 8В/6Т (рис. 2).

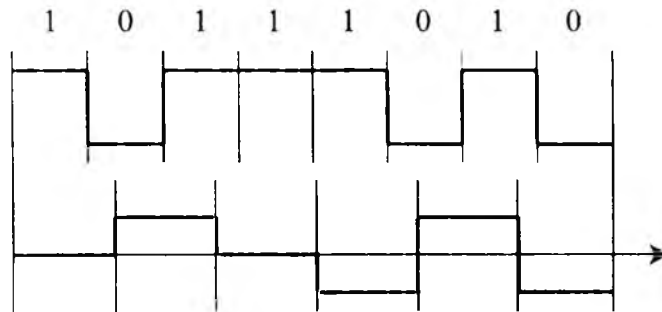


Рисунок 2 — Схема кодування 8В/6Т

Відповідно до алгоритму його реалізації в кодері передавача будь-який восьмирозрядний символ, що приходить на нього, відповідно до спеціальної кодової таблиці перетворюється в шість тривіневих символи, що попарно передаються по трьох скручених парах. У результаті цього тактова частота сигналу знижується до значення

$$f_m = \frac{100}{3} \times \frac{6}{8} = 25 \text{ МГц.}$$

Мінімальна ширина каналу зв'язку для передачі цифрового сигналу з такою частотою складас 12,5 МГц, що в 1,28 рази менше ширини смуги пропускання стандартного кабеля категорії 3 (16 МГц).

**Технологія 100Base-TX.**

У схемі кодування сигналів мережевого інтерфейса 100Base-TX використовується тривіневий сигнал типу MLT-3. При цьому передача виконується тільки по двох скручених парах категорії 5 і може відбуватися в повнодуплексному режимі (рис. 3).

Особливістю кодерів даних інтерфейсів є те, що розроблений спочатку мережевий інтерфейс TP-PMD повинен був забезпечити сумісність з рівнями FDDI, на яких використовується блокове кодування типу 4B5B, що розглядається далі. Таким чином, на

вхід лінійного кодера MLT-3 у цих інтерфейсах завжди надходить сигнал з тактовою частотою 125 МГц.

Код MLT-3 (Multi Level Transmission) реалізується аналогічно кодові NRZI і позначається іноді MLT-3 + NRZI. Зміна рівня лінійного сигналу відбувається тільки в тому випадку, якщо на вхід кодера надходить одиниця, але на відміну від коду NRZI алгоритм формування обрано таким чином, щоб дві сусідніх змінних завжди мали протилежні напрямки. Формально код MLT-3 є двійковим, однак застосування для його побудови описаного вище алгоритму дозволяє одержати сигнал із трьома станами і постійною складовою, що мало відрізняється від нуля навіть за найнесприятливіших ситуацій. Щоб підкреслити цю особливість, коди виду MLT-3 іноді виділяють в окремий підклас за назвою квазіпотрійних.

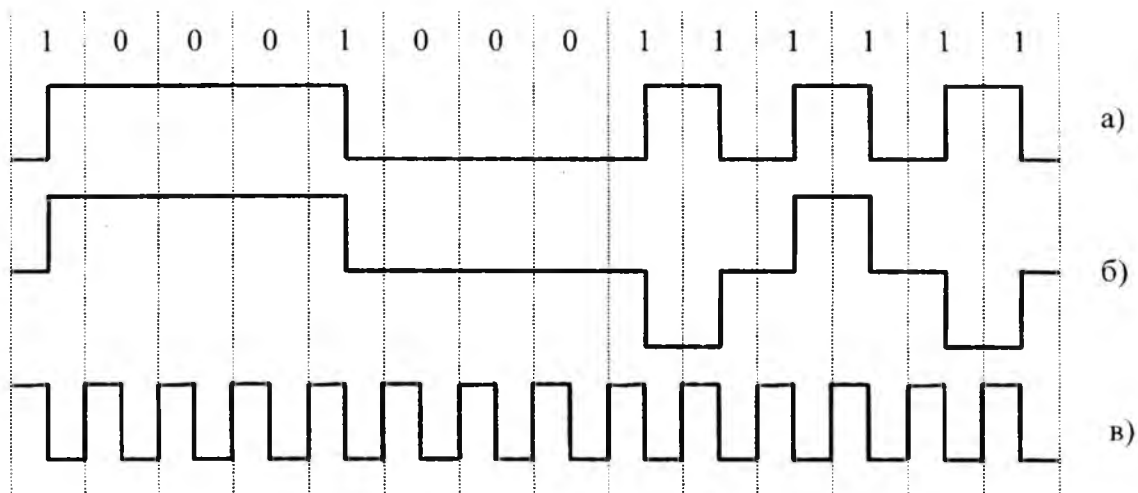


Рисунок 3 — Схема кодування MLT-3: а) сигнал у кодї NRZI, б) сигнал у кодї MLT-3, в) сигнал тактового генератора

Раніше було відзначено, що код NRZI не дозволяє забезпечити стійку синхронізацію без застосування спеціальних заходів. У даному випадку ці заходи зводяться до примусового введення у вхідний сигнал кодера логічних одиниць у випадку виявлення довгих послідовностей нулів. В інтерфейсах TP-PMD і 100BaseTX дана функція реалізується з використанням апаратного скремблера. Технічно цей пристрій являє собою регістр зсуву і генерує квазівипадкову послідовність відповідно з поліномом виду  $x^{11} + x^9$ . Вхідним сигналом регістра є сама інформаційна послідовність. Скремблер встановлюється на вході кодера MLT-3. У приймачі на виході декодера включається дескремблер, що відновлює вихідний вигляд інформаційного сигналу. Синхронізація функціонування скремблера і дескремблера виконується за допомогою сигналів стану лінії. Застосування скремблера дозволяє усунути викиди на енергетичному спектрі лінійного сигналу, що дає можливість одержання прийнятної рівня перехідного загасання без використання екранованої скрученої пари. Ще одним наслідком використання цього пристрою є мінімізація відхилення від нуля постійної складової лінійного сигналу.

Застосування трирівневого кодування MLT-3 дозволяє двічі зменшити тактову частоту лінійного сигналу, що складає

$$f_m = \frac{125}{2} = 62,5 \text{ МГц}.$$

Це значення з визначеним запасом відповідає параметрам електричного лінійного тракту, що можуть бути отримані при використанні для його побудови елементів 5 категорії.

Порівняння мережевих інтерфейсів 100Base-T4 і 100Base-TX показує, що при однакових швидкостях передачі (100 Мбіт/с) перехід в останньому випадку на роботу з якіснішим кабелем категорії 5 забезпечує:

- можливість реалізації повнодуплексного режиму роботи мережевого інтерфейсу 100Base-TX, що фактично еквівалентно збільшенню пропускної здатності каналу зв'язку вдвічі;
- істотне спрощення схем електронної обробки сигналів за рахунок відмови від установки двонаправлених підсилювачів, ланцюгів мультиплексування і демультиплексування і т.д.; за деякими оцінками складність реалізації за рахунок цього зменшується на 80–90%.

Зазначені обставини привели до поширення на практиці інтерфейсу 100Base-TX.

### **Технологія 1000Base-T.**

Стандарт мережі зі швидкістю передачі даних у 1 Гбіт/с по чотирьох неекраниваних кручених парах — Gigabit Ethernet 1000Base-T — було розроблено підкомітетом IEEE 802.3ab. Відповідно до нормативного документа, опублікованого цим підкомітетом, мережа повинна працювати в повнодуплексному режимі по каналах зв'язку на основі неекраниваної скрученої пари з верхньою граничною частотою 100 МГц і максимальною довжиною 100 м з ймовірністю помилки не більш  $10^{-10}$ .

Для забезпечення можливості передачі інформаційного потоку зі швидкістю 1000 Мбіт/с по кабелях СКС категорій 5 і 6 при розробці мережних інтерфейсів 1000Base-T використано такий комплекс заходів: для передачі задіяно всі чотири пари одночасно, причому передача по кожній парі здійснюється одночасно в двох напрямках; до складу прийомопередавачів уведено додаткові вузли мінімізації визначених видів перешкод; використаний спеціальний алгоритм синхронізації мережевих інтерфейсів; застосоване п'ятирівневе кодування PAM-5.

Високі швидкості передавання інформації висувають дуже жорсткі вимоги до синхронізації інтерфейсів 1000Base-T. Для її забезпечення вони завжди функціонують у режимі Master-Slave. Перед початком роботи з використанням механізму Autonegotiation визначається співвідношення пріоритетів пристроїв, що зв'язуються. За результатами порівняння інтерфейс із вищим пріоритетом (як правило, у його ролі виступає комутатор) бере на себе функції майстер-пристрою системи синхронізації, що настраює під частоту свого тактового генератора роботу передавача на іншому кінці. У тих випадках, коли пріоритети зв'язаних пристроїв однакові, питання про вибір майстер-пристрою вирішується жеребом.

Вхідний потік даних зі швидкістю 1 Гбіт/с розподіляється рівномірно по всіх чотирьох парах, таким чином, по кожній з них дані передаються зі швидкістю

$$V = \frac{1000}{4} = 250 \text{ Мбіт/с}.$$

Для забезпечення можливості двонаправленої передачі у схемі інтерфейсу встановлюються розв'язуючі пристрої (диференціальна система). Кінцева ефективність його функціонування приводить до того, що в приймач поряд із сигналом від передавача з віддаленого кінця надходить також сигнал передавача ближнього кінця (ехо-сигнал), що є перешкодою. Для мінімізації його шкідливого впливу ослаблений у визначене число раз переданий сигнал, оброблений в аналоговому і цифровому фільтрах (цифровий сигнальний процесор), просто віднімається із суміші вхідних сигналів приймача. Рівень ослаблення обчислюється у процесі налаштування каналу зв'язку перед початком роботи.

По такій ж схемі працюють подавлювачі перехідних перешкод на ближньому кінці, причому налаштування виконується для кожної впливаючої пари. Необхідність застосування індивідуального налаштування призводить до того, що в інтерфейсі 1000Base-T застосовується 4x3 — 12 блоків подавлювачів перехідних перешкод на ближньому кінці.

Досить оригінально в системі 1000Base-T реалізовано процедуру скремблювання. На відміну від систем TP-PMD і 100Base-TX тут скремблер кожної пари має свій породжувальний поліном. Це дозволяє як знизити кореляцію лінійних сигналів окремих

пар, так і однозначно ідентифікувати кожний канал на приймальному кінці. Остання властивість виявляється досить корисною у процесі настроювання інтерфейсу.

Коефіцієнт згасання скрученої пари залежить від її довжини і зростає з частотою. Для компенсації великого згасання високочастотних складових, котрі призводять до “завалювання” фронтів переданих імпульсів, можливі два підходи: збільшення амплітуди високочастотних складових у передавачі або зменшення підсилення на низьких частотах у приймачі. Недоліком першого підходу є зростання рівня випромінювання і зниження перехідного згасання, другий підхід супроводжується зниженням відношення сигнал-шум. Для усунення негативних наслідків цих ефектів у приймачі трансівера 1000 Base-T використана так звана динамічна корекція. Принцип її дії засновано на виборі коефіцієнта підсилення на низьких частотах залежно від рівня вхідного сигналу.

Мінімізація рівня перехідних перешкод у комбінованих трансіверах 100/1000Base-T відбувається за допомогою пристрою partial response filter, що встановлюється на виході трансівера і виконує підсумовування 3/4 частини нового імпульсу з 1/4 частиною попереднього. Його наявність дозволяє наблизити форми спектрів інтерфейсів 100Base-TX 1000Base-T і застосувати вихідний імпульсний трансформатор, характеристики якого оптимізовано для одержання максимуму перехідного згасання.

Для зменшення тактової частоти до рівнів, що дозволяють передавати цифрову інформацію по скручених парах категорії 5 і 6, дані в лінії представляються в так названому Enhanced TX/T2 коді або коді PAM-5. У ньому переданий сигнал має набір з 5 фіксованих рівнів  $\{-2, -1, 0, +1, +2\}$  (рис. 4). Чотири з них використовуються для кодування інформаційних бітів, а п'ятий призначено для корегування помилок. На наборі з чотирьох фіксованих рівнів одною послідовкою можна закодувати відразу 2 інформаційних біти, оскільки число можливих комбінацій з чотирьох по два дорівнює чотирьом — 00, 11, 01 і 10. Таким чином, сигнал у коді Enhanced TX/T2 має тактову частоту 125 МГц, що в 2 рази нижче тактової частоти окремих складових інформаційної послідовності. Передані одночасно по всіх парах кабелю четвірки п'ятеричних знаків являють собою неподільну одиницю інформації розміром в один байт. При тактовій частоті  $f_t = 125$  МГц по всім чотирьох парах кабелю передається інформаційний потік

$$V = 8 \times f_t;$$

$$V = 125 \text{ МГц} \times 2 \text{ біти / пара} \times 4 \text{ пари} = 1000 \text{ Мбіт / с}.$$

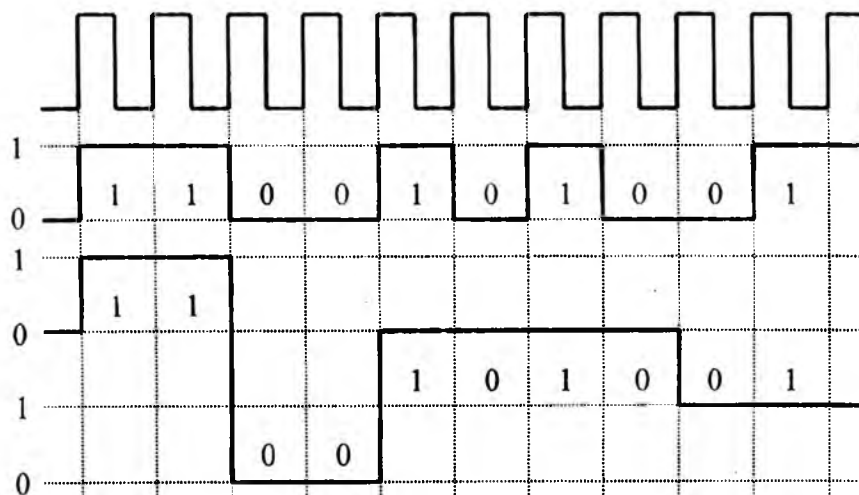


Рисунок 4 — Схема кодування PAM

Смуга пропускання каналу зв'язку для безпомилкового прийому такої послідовності повинна складати

$$f_{л} > \frac{fm}{2};$$

$$f_{л} = \frac{125}{2} = 62,5 \text{ МГц}.$$

Ширина смуги пропускання каналу категорії 5 за критерієм ACR = 10 дБ складає приблизно 70 МГц. Таким чином, сигнали мережевого інтерфейсу 802.3ab у принципі можуть передаватися по кабельній системі категорії 5. При цьому верхня гранична частота цього каналу перевищує теоретичне мінімальне значення на

$$\varphi = \frac{f_{\text{г}}}{f_{\text{мін}}} \times 100 = \frac{7,5}{70} \times 100 \approx 11\%.$$

Тобто для реалізації цього інформаційного обміну будуть потрібні інтерфейси з дуже складними схемними рішеннями і відповідно високою вартістю. Так, наприклад, по оцінках фахівців німецької компанії Compu-Shack для прийому одного біта кадру Gigabit Ethernet контролер мережевого адаптера 1000Base-T повинен виконати порядку 150 логічних операцій.

Термін служби мережного устаткування істотно поступається терміну служби СКС. Тому загальною тенденцією є здешевлення схемних рішень з відповідним здешевленням мережевої апаратури і компенсації втрат завдячності за рахунок поліпшення параметрів кабельної системи. Зазначена обставина являється однією з причин початку розробок електричних кабельних систем категорії 6 і 7.

Одночасне прагнення до збереження добре відпрацьованого виробництва компонентів категорії 5 призвело до розробки категорії 5e. Це дозволяє, зокрема, розширити смугу частот каналу приблизно до 85 МГц за критерієм ACR = 10 дБ, тоді

$$\varphi = \frac{f_{\text{г}}}{f_{\text{мін}}} \times 100 = \frac{22,5}{85} \times 100 = 26,5\%.$$

Одночасно цей стандарт задає додаткові параметри типу E1FEXT, дотримання яких є необхідним для чіткої роботи трансіверів 1000Base-T по симетричному кабелю.

П'ятий надлишковий рівень Enhanced TX/T2 коди використовується для побудови механізму корегування помилок. Він реалізується кодером Трелліса і декодером Вітербі. Застосування механізму корекції помилок еквівалентно збільшенню завдячності приймача на 6 дБ.

#### Висновки.

При побудові високошвидкісних інтерфейсів LAN зі швидкістю передачі 100 і 1000 Мбіт/с порівняно із низькошвидкісними аналогами широко використовуються процедури паралельної передачі інформаційного потоку по кільком скручених парах одночасно, застосовуються коди з корекцією помилок, використовується багаторівневе і/або блокове кодування. Основною метою застосування цих принципів є збільшення пропускну здатності каналу зв'язку на порядок і більше у сполученні зі збільшенням тактової частоти лінійного сигналу.

#### Література

1. Семенов А. Б., Стрижаков С. К., Сунчелей И. Р. Структурированные кабельные системы. — 3-е изд, перераб. и доп. — М.: ЛАЙТ Лтд., 2001. — 608+16 с.: ил.
2. Таненбаум Э. Компьютерные сети. — СПб.: Питер, 2003. — 992 с.: ил.
3. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Уч. пособие для вузов. — СПб.: Питер, 2000. — 672 с.
4. Буров С. Комп'ютерні мережі. — Львів: СП "БаК", 1999. — 468 с.