

УДК 004.056.2

О. Я. Матов<sup>1</sup>, В. С. Василенко<sup>2</sup>, О. В. Дубчак<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут проблем реєстрації інформації НАН України

вул. М. Шпака, 2, 03113 Київ, Україна

<sup>2</sup>Національний авіаційний університет

вул. Космонавта Комарова, 1, 03058 Київ, Україна

## Пропускна спроможність каналу та доступність інформаційних об'єктів у розподілених мережах

*Розглянуто варіанти та напрямки збільшення пропускної спроможності каналів передачі даних та, як наслідок, підвищення доступності інформаційних об'єктів розподілених обчислювальних мереж.*

**Ключові слова:** доступність інформації, пропускна спроможність каналу, розподілені обчислювальні мережі, співвідношення сигнал/завада, смуга пропускання каналу.

### Вступ

Забезпечення доступності та цілісності інформації, яка циркулює в розподілених обчислювальних мережах (РОМ), є однією із основних задач технічного захисту в цих системах. Для телекомунікаційних систем, як елементів РОМ, ця задача трансформується в забезпечення їхньої високої пропускної спроможності за відсутності будь-яких модифікацій (викривлень), які не були санкціоновані її власником, незалежно від причин або джерел виникнення таких викривлень. При передачі значна їхня частина пов'язана з дією природних чинників, таких як атмосферні електромагнітні розряди, іскріння контактів у автомобілях, електротранспорті і багато що інше. Наслідком таких впливів у каналах РОМ є зменшення співвідношення енергетик сигнал/шум (сигнал/завада)  $h^2$ . Це співвідношення, як відомо [1, 2], визначає пропускну спроможність каналів зв'язку, а також вірність інформації, визначувану, наприклад, через імовірність викривлення двійкових символів (біт)  $P_{\text{випр}}$ , інтенсивність цих помилок.

Відомо [1], що у випадку найбільш «неприємної» завади типу «білий шум», потужність якої рівномірно розподілена в усій смузі частот каналу, справедливе наступне співвідношення: потенційна пропускна спроможність безперервного каналу з завадами дорівнює:

$$C_n = \Delta F \log_2(h^2 + 1), \quad (1)$$

де  $\Delta F$  — ширина смуги частот каналу;  $h^2$  — співвідношення корисний сигнал/завада.

Вважається, що вираз (1) указує граничне значення пропускної спроможності каналу, якого досягти вельми важко, до нього можна лише наблизитися. В роботах [2, 3], присвячених проблемам підвищення пропускної спроможності, показано, що досягти в реальних системах, близьких до (1), результатів відомими методами (розширенням смуги пропускання каналу чи збільшенням співвідношення сигнал/завада) неможливо. Це, на думку автора роботи [2], підтверджує нереальність припущення Шеннона, яке покладено в основу формули (1) про те, що на приймальній стороні сигнали повністю відділяються від завад (шумів). У зв'язку із цим помітимо також те, що відомі дослідження не дають способів досягнення величини  $C_n$ , а лише показують її теоретичну межу.

У статті здійснено спробу показати можливість наближення пропускної спроможності до її теоретичної межі навіть в умовах впливу певного рівня завад.

### Аналіз умов дослідження

Традиційно вважається, що як витікає із виразу (1), підвищення пропускної спроможності каналів є можливим за рахунок або розширення смуги пропускання  $\Delta F$ , або збільшення відношення сигнал/завада  $h^2$ . Цей вплив докладно проаналізовано в [2] та [3], де стверджується, що шлях збільшення пропускної спроможності за рахунок розширення смуги пропускання каналу є найефективнішим. Однак результати аналізу, проведеного авторами, не дають змоги погодитись із цим твердженням.

Отже відомий спосіб, назвемо його *способом прямого (безпосереднього) розширення смуги пропускання*, полягає в підвищенні швидкості посимвольного обміну  $B$ , що, зрозуміло, можливе за рахунок зменшення періоду формування, а також тривалості символів, якими здійснюється обмін. Із використанням цього виразу та підходу, викладеного в [2], знайдемо межу пропускної спроможності в разі, коли швидкість передачі збільшується необмежено. Неважко показати, що із використанням при цьому властивостей «другої чудової межі», одержимо:

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C_n = 2 \lim \{ \log_2 [1 + y/B]^{B/y} \}^y = 2y \log_2 e = 2,88 P_c / (2N_0) = 1,44 P_c / N_0,$$

де  $P_c, N_0$  — потужність сигналу та спектральна щільність завад відповідно. Це повністю збігається із результатами, наведеними в [2, 3]. Для більш детального аналізу можна використати наведену в [2] залежність виду  $C_n / (P_c / N_0) = f(\Delta F / (P_c / N_0))$ . З графіка цієї функції, наданого на рис. 1, видно, що в міру збільшення швидкості посимвольної передачі інформації (чи смуги пропускання  $\Delta F$  каналу) його пропускна спроможність швидко зростає доти, поки середні потужності шуму та сигналу не зрівняються. Потім вона зростає поволі, асимптотично наближаючись до визначеного вище значення  $1,44 \cdot h^2$ . Максимально ефективне використання смуги пропускання каналу забезпечується до частоти  $\Delta F / (P_c / N_0) = 1$ , чи  $\Delta F = P_c / N_0$ .

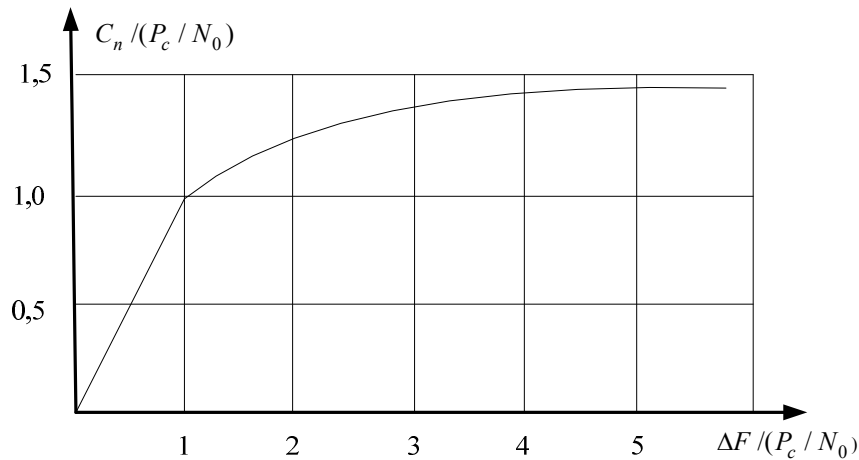


Рис. 1. Залежність  $C_n / (P_c / N_0) = f(\Delta F / (P_c / N_0))$

Аналіз розглянутих результатів свідчить про те, що традиційний спосіб підвищення пропускної спроможності каналу шляхом розширення смуги пропускання є ефективним лише в досить вузькому діапазоні частот, а, отже, про хибність твердження [2], що цей шлях збільшення пропускної спроможності є найефективнішим.

Із виразу (1) видно також, що збільшення пропускної спроможності  $C_n$  може бути досягнутим також за рахунок збільшення співвідношення сигнал/завада. Це пояснюється можливістю введення  $n < P_c / P_z$  варіантів сигналу (такий сигнал іноді називають багатопозиційним [3]). Кожен із таких багатопозиційних сигналів може бути еквівалентом одного із  $n$  повідомлень. Якщо за час однієї послідовності — передачі одного символу — можлива передача однієї із  $n$  дискрет (градацій, варіантів) сигналу, тобто одного із  $k$ -розрядних повідомлень, то це є еквівалентним одночасній передачі  $k$  символів повідомлення, де  $k = \log_2 n$ . Практично розширення алфавіту сигналів обмежується зверху зменшенням відмінності елементарних послідовностей і збільшенням імовірності викривлення таких символів завадами, так що величина  $n$  в каналі обмежується відношенням сигнал/шум  $P_c / P_z$ .

Однак на цьому шляху є певні перепони. Збільшення співвідношення сигнал/завада вимагає певних енергетичних або матеріальних витрат і натикається іноді також на масогабаритні обмеження (наприклад, у системах мобільного зв'язку). Перешкодою на цьому шляху можуть бути, перш за все, обмеження на амплітуду (а отже на потужність сигналу і на співвідношення сигнал/завада). Це призводить до виникнення так званої практичної межі безперервного каналу. На рис. 2 наведено взятий із [3] графік цієї залежності (точками позначені практичні результати для стандарту V.34 при  $P_{\text{викр}} = 10^{-4}$ , а формулі Шеннона відповідає крива під назвою «теоретична межа»).

Практична межа відношення сигнал/шум в аналоговій телефонній лінії складає приблизно 35 дБ (3162 разів по потужності або більше 56 разів по амплітуді),

що дозволяє досягти [3] пропускної спроможності біля  $C_n < 34822$  біт/с (стандар-  
тне значення, яке є реалізованим на практиці, 33600 біт/с).

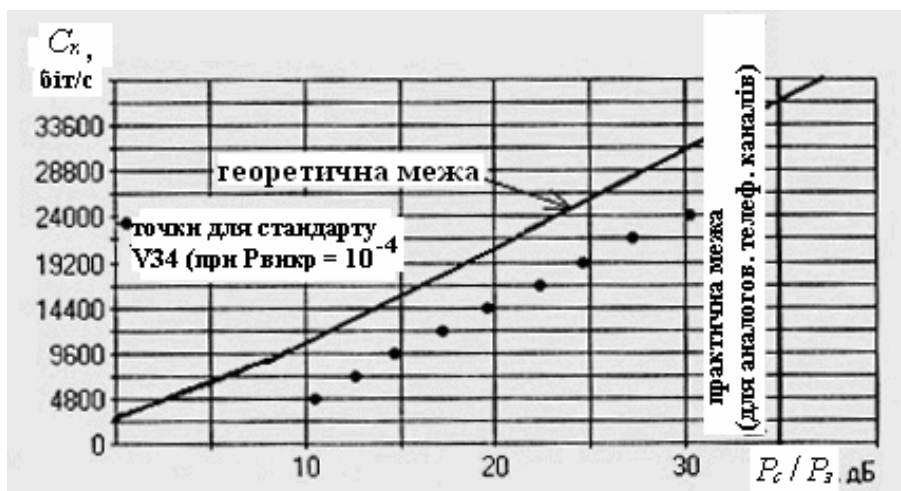


Рис. 2. Залежність пропускної спроможності аналогової лінії від відношення сигнал/шум по потужності  $P_c / P_s$

### Ідея та напрямки підвищення пропускної спроможності

Ідея *підвищення пропускної спроможності* витікає із багаторівневої частотної маніпуляції, коли вихідна двійкова послідовність розбивається на відповідне число біт (дібіти, трибіти і т.д.) для визначення однієї з можливих частот несної, переданої у даний момент. При цьому для передачі  $k$  комбінацій потрібно використовувати  $k$  частот із діапазону  $\Delta F$ . Наприклад, при передачі чотирьох комбінацій дібітами потрібно чотири частоти (рис. 3), що є не досить економним, оскільки при  $k$  частотах можливим є  $n = 2^k$  їхніх комбінацій (якщо  $k = 4$ , то  $n = 16$ ).

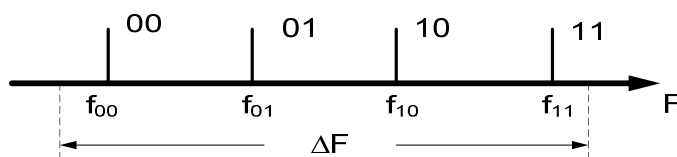


Рис. 3. Чотирирівнева частотна маніпуляція

Тому для *підвищення пропускної спроможності* авторами пропонується *дискретизація* (розбиття) загальної визначеної наперед і, якомога широкій, *смуги пропускання каналу*  $\Delta F$  на певну кількість  $k$  частотних дискрет (піддіапазонів) шириною  $\Delta F_{di}$  кожна, по яких одночасно передаються  $n$  сигналів

$$k = \Delta F / \Delta F_{di},$$

так, що їхня сукупність утворює певне повідомлення. Якщо за час однієї послілки (тривалість елементарного аналогового сигналу типу відрізка синусоїди основної частоти дискрети) одночасно передається  $k$  різночастотних послілок, то це є еквівалентом одночасної передачі інформації  $k$  двійковими розрядами, і загальне число варіантів дискретного (цифрового) сигналу (алфавіт) складе  $n = 2^k$ . Розширення алфавіту для дискретних сигналів можливе при збільшенні кількості  $k$  частотних дискрет (за рахунок розширення загальної смуги пропускання  $\Delta F$ , чи за рахунок зменшення ширини цих дискрет  $\Delta F_{oi}$ ). Ширина кожної із  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) частотних дискрет  $\Delta F_{oi}$  та частотний проміжок між ними повинні вибиратися так, щоб виключити взаємні впливи сигналів сусідніх дискрет.

На рис. 4 надано приклад використання частотної дискретизації при одночасній передачі повідомлення  $11\dots0\dots1$ , яке складається із  $k$  двійкових розрядів.

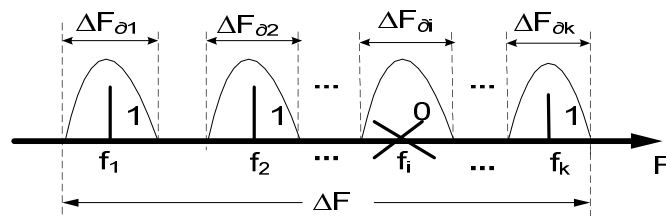


Рис. 4. Дискретизація смуги пропускання каналу

При такому підході та збереженні вимог до ймовірності викривлення символів  $P_{вукр}$  і потужності  $P_{cd}$  сигналу в межах однієї дискрети, співвідношення сигнал/завада за рахунок зменшення ширини смуги в  $k$  разів збільшується, що може бути використаним за декількома напрямками.

Перший з цих напрямків полягає у збереженні попереднього співвідношення сигнал/завада за рахунок зменшення в  $k$  разів потужності сигналу в межах відповідної дискрети. Це дозволяє при збереженні загальної потужності, яка є потрібною для передачі  $k$ -розрядного повідомлення на попередньому рівні  $P_c = k \cdot P_{cd}$ , збереженні вимог до ймовірності  $P_{вукр}$  викривлення символів, збільшити в  $k$  разів швидкість передачі інформації до  $B \cdot k$  (біт/с). Якщо при швидкості передачі інформації  $B$  мінімальну ширину кожної із дискрет можна визначити як  $\Delta F_{oi} = B$  Гц, тоді можлива кількість частотних дискрет складе  $k = \Delta F / \Delta F_o = \Delta F / B$ , а максимальна швидкість  $B_{чдмакс}$  передачі інформації, тобто *теоретично пропускна спроможність каналу при частотній дискретизації не залежить від наявності завад* і дорівнює:

$$B_{чдмакс} = C_{чд} = B \cdot k = B \cdot \Delta F / B = \Delta F \text{ (біт/с).}$$

Правда, при низькій швидкості передачі в межах дискрет і широкій смугі пропускання кількість частотних дискрет може бути значною, і тоді реалізація

цього методу, у зв'язку із складністю технічної реалізації, може бути утрудненою, але це — складності зовсім іншого плану.

Зменшити цю кількість можна за рахунок збільшення швидкості передачі інформації в межах кожної із дискрет, а отже, за рахунок збільшення їхньої смуги пропускання і, як наслідок, — зменшення кількості цих дискрет. Але виникає питання щодо меж такого збільшення швидкості посимвольної передачі.

Отже, *другий з цих напрямків* полягає в застосуванні такої швидкості посимвольної передачі  $B$ , яка була би максимальною і забезпечувала би ефективно використання смуги пропускання каналу. Для визначення такої швидкості можна використати уже наведену для методу прямого розширення смуги пропускання каналу залежність виду  $C_n / (P_c / N_0) = f(\Delta F / (P_c / N_0))$ . З графіка цієї функції, наданого на рис. 1, видно, що максимально ефективно використання смуги пропускання каналу забезпечується при  $\Delta F / (P_c / N_0) = 1$ , чи при  $\Delta F = P_c / N_0$ .

Розрахунки показують, що пропускна спроможність, яка є максимально досяжною для методу прямого розширення смуги пропускання, при використанні наведених вище умов досягається при незначній кількості (одиниці) дискрет.

*Таким чином*, застосування запропонованого авторами методу частотної дискретизації при максимально ефективному використанні смуги пропускання каналу дозволяє досягти не лише теоретичного, але й практичного розширення пропускної спроможності каналів РОМ і, за рахунок цього, — підвищення доступності інформаційних об'єктів РОМ.

1. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетики / К. Шеннон. — М., 1963.

2. Алишев Я.В. Предельная пропускная способность и потенциальная помехоустойчивость оптических сетей и систем телекоммуникаций / Я.В. Алишев // Доклады БГУИР. 2004. — Т. 2, № 2. — С. 43–45.

3. Локальные компьютерные сети. Электронный учебник. — Режим доступа: <http://dvoika.net/infor/top/Glava%2012/Index1.htm>.

Надійшла до редакції 02.04.2009