

**ПРОПУСКНА СПРОМОЖНІСТЬ КАНАЛІВ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ МЕРЕЖ.
УМОВИ ЧАСТОТНО-ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСУ**

Василенко В. С., канд. техн. наук, доц.

Національний авіаційний університет

kszi@ukr.net

Розглянуто умови підвищення пропускної спроможності в каналах обчислювальних мереж на основі забезпечення умов частотно-енергетичного балансу. Як варіант підвищення пропускної спроможності розглянуто можливості дискретизації смуги пропускання каналу.

Ключові слова: дискретизація, енергетичний баланс, канали передачі, обчислювальні мережі, пропускна спроможність, смуга пропускання, частотний баланс.

The terms of increase of carrying capacity are considered in dustings of computer networks on the basis of providing of terms frequency-power balance. As a variant of increase of carrying capacity is considered possibility of laying out of bar of key-in of channel.

Keywords: discretization, energy balance, communication channels, computer networks, bandwidth, bandwidth, frequency balance.

Постановка проблеми

Забезпечення доступності та цілісності ін-формації, яка циркулює в каналах обчислювальних мереж, є однією з основних завдань технічного захисту в розподілених обчислювальних мережах (РОМ). Для телекомунікаційних систем як елементів РОМ це завдання трансформується в забезпечення високої пропускної спроможності їх каналів за відсутності будь-яких модифікацій (викривлень), які не були санкціоновані її власником, незалежно від причин або джерел виникнення таких викривлень. При цьому завдання слід вирішувати в умовах певних обмежень. Обмеженнями є характеристики наявних каналів, такі як смуга пропускання каналу ΔF_{ϵ} , спектральна щільність потужності завад N_0 чи, власне, потужність завад $P_{\zeta} = N_0 \Delta F_{\epsilon}$. Окрім того, обмеженнями є вимоги щодо допустимого рівня цілісності (допустимих значень імовірності викривлень) інформаційних об'єктів.

Проблема полягає в забезпеченні високої пропускної спроможності каналів РОМ за визначених обмежень.

Аналіз досліджень і публікацій

Відомо [1], що при прямому (безпосередньому) розширенні смуги пропускання межа пропускної спроможності в разі, коли смуга пропускання каналу ΔF_{ϵ} , а отже, і швидкість посимвольної передачі інформації збільшуються необмежено, дорівнює:

$$\lim_{\Delta F \rightarrow \infty} C_n = 1,44 \cdot P_{\zeta} / N_0. \quad (1)$$

У праці [2] показано, що після множення чисельника і знаменника правої частини цього виразу на величину $B \approx \Delta F_{\epsilon}$, вираз (1) набуває вигляду:

$$\lim_{\Delta F \rightarrow \infty} C_n = 1,44 \cdot P_{\zeta} / N_0 = 1,44 \cdot B h^2,$$

де B — швидкість посимвольної передачі інформації в каналі, за якої зафіксоване співвідношення сигнал/завада дорівнює:

$$h^2 = P_{\zeta} / P_{\epsilon}, \text{ де } P_{\zeta} = N_0 \Delta F_{\epsilon}.$$

У праці [1] підкреслено, що спосіб розширення смуги пропускання в разі збільшення швидкості посимвольної передачі інформації, а отже, і ширини смуги пропускання, за технічної реалізації є найпростішим. Але більш детальний аналіз показує, що у міру збільшення швидкості посимвольної передачі інформації (чи смуги пропускання ΔF_{ϵ} каналу) його пропускна спроможність швидко зростає доти, доки середні потужності шуму і сигналу не порівнюються. Потім вона зростає поволі, асимптотично наближаючись до визначеного вище значення $1,44 \cdot P_{\zeta} / N_0$. При цьому ефективне використання смуги пропускання каналу забезпечується при $\Delta F_{\epsilon} / (P_{\zeta} / N_0) \leq 1$, чи при $\Delta F_{\epsilon} \leq P_{\zeta} / N_0$ та $h^2 \geq 1$. Вочевидь, що при цьому досягається і максимально ефективна швидкість обміну бінарними сигналами $B = \Delta F_{\zeta} \leq P_{\zeta} / N_0$.

Ще раз звернемо увагу на те [2], що співвідношення сигнал/шум при максимально ефективній швидкості обміну дорівнює одиниці, $h^2 = P_{\zeta} / P_{\epsilon} = 1$.

Зрозуміло, що це не дає змогу підвищувати надалі швидкість обміну (та водночас і пропускну спроможність каналу), використовуючи при цьому, наприклад, можливості багаторівневих сигналів. Дійсно, при такому співвідношенні сигнал/завада у формулі Шеннона для розрахун-

ку пропускної спроможності другий множник дорівнює одиниці і цей вираз набуває вигляду:

$$C_n = \Delta F_e \text{ (біт/с)}.$$

При цьому принципово важливим недоліком цього кроку [3] є те, що $h^2 = 1$ і, при цьому, величина ймовірності викривлення символу є досить великою (наприклад, за умови амплітудної модуляції є не меншою ніж $P_{\text{аєєд.аїї}} > 3,5 \cdot 10^{-1}$).

Ціль

Відомо, що згідно зі стандартом МККТТ (міжнародна назва тієї ж організації — ІТУ-Т), для цифрових даних повинна виконуватися умова $P_{\text{випр}} < 10^{-6}$ (в окремих випадках для критичних даних цей поріг зменшують до 10^{-9}). Отже, виходячи із умови забезпечення цілісності інформаційних символів (відсутності викривлень), при інформаційному обміні із застосуванням прямого розширення смуги пропускання повинно існувати певне обмеження такого розширення.

Мета статті — визначення зв'язку між характеристиками каналу та заданим рівнем цілісності інформаційних об'єктів, аналіз можливостей підвищення пропускної спроможності каналу за рахунок частотної дискретизації.

Умови частотно-енергетичного балансу каналу

Зрозуміло, що межа збільшення смуги пропускання повинна визначатися тією шириною смуги пропускання, за якої зберігаються вимоги діючих стандартів щодо забезпечення відсутності викривлень (забезпечення цілісності) інформаційних повідомлень.

Для її визначення врахуємо, що:

$$P_{\text{випр}} = 0,5 \exp(-\alpha^2 h^2/2),$$

де α^2 — коефіцієнт, який визначається видом модуляції.

Виходячи із цього виразу при допустимому значенні ймовірності викривлень $P_{\text{аєєд.аїї}}$, допустиме співвідношення сигнал/завада повинно бути не меншим ніж:

$$h_{\text{аїї}}^2 \geq -2 \cdot \ln(2 \cdot P_{\text{аєєд.аїї}}) / \alpha^2.$$

Отже, за таких заданих параметрів стану каналу як рівень сигналу P_c та рівень спектральної щільності потужності завади N_0 можна записати, що:

$$\begin{aligned} h_{\text{аїї}}^2 &\geq (P_c / P_c)_{\text{аїї}} = P_c / P_{c,\text{аїї}} = \\ &= P_c / (\Delta F_{\text{аїї}} \cdot N_0) \geq -2 \cdot \ln(2 P_{\text{аєєд.аїї}}) / \alpha^2. \end{aligned}$$

Звідси допустима ширина смуги пропускання каналу $\Delta F_{\text{аїї}}$ повинна задовольняти умові:

$$\Delta F_{\text{аїї}} \leq -P_c \cdot \alpha^2 / (2N_0 \cdot \ln(2P_{\text{аєєд.аїї}})). \quad (2)$$

Вираз (2) слід вважати умовою *частотно-енергетичного балансу (ЧЕБ)* каналу із певними характеристиками (наприклад, із існуючою спектральною щільністю завади N_0 та заданому рівні ймовірності викривлення символу $P_{\text{аєєд.аїї}}$).

Дійсно із цього виразу витікає, що при незмінному значенні ймовірності викривлення символу зменшення (чи збільшення) одного із цих параметрів, каналу, наприклад потужності сигналу потре-бує відповідного зменшення (чи збільшення) швидкості посимвольної передачі чи смуги пропускання каналу.

Слід звернути увагу на ту обставину, що в разі, коли умови виразу (2) задовольняються, співвідношення сигнал/завада дозволяє мати лише один енергетичний рівень сигналу відмінний від нуля. Тобто, в цьому варіанті можна *використовувати лише бінарні сигнали*, отже усі можливості щодо підвищення пропускної спроможності каналу іншими засобами, окрім розширення ширини смуги пропускання каналу, не існує.

Іншою обставиною, на яку також слід звернути увагу, є те, що між потужністю сигналу P_c та шириною смуги пропускання $\Delta F_{\text{аїї}}$, при якій забезпечується задана цілісність (правильність) інформаційних об'єктів $P_{\text{аєєд.аїї}}$, існує пряма пропорційна залежність: зменшувати (чи збільшувати) потужність сигналу можна при одночасному, відповідному зменшенні (чи збільшенні) ширини смуги пропускання. Зрозуміло, що зменшувати потужність сигналу P_c можна до рівня, який може бути значно меншим рівня завади у разі широкої (до такого зменшення чи розширенні навмисно) смуги пропускання.

Отже, підтверджується справедливність висновку 3-ї теореми Шеннона щодо можливості передачі інформації в каналах із будь-яким рівнем завад N_0 .

Головним при цьому залишається можливість генерації низькочастотного сигналу (що не є складним) та передавання його каналами із малою шириною смуги пропускання (це може викликати певні складнощі щодо можливості розповсюдження сигналу в заданому середовищі). Однак подолання цих труднощів легко досягається модуляцією сигналу, за рахунок якої можна перенести низькочастотний сигнал в діапазон більш високих частот).

Звернемо увагу на те, що із відомих співвідношень $h^2 = P_c / P_c = D_n / (\Delta F N_0) = P_c / (B N_0)$ за допустимих значень параметрів витікає:

$$\Delta F_{\text{аіі}} h_{\text{аіі}}^2 = \hat{A}_{\text{аіі}} h_{\text{аіі}}^2 = P_{\text{п.аіі}} / N_0. \quad (3)$$

Вираз (3) слід вважати також другою умовою *частотно-енергетичного балансу (ЧЕБ)*.

Із другої умови ЧЕБ (3) видно, що при сталій енергетиці каналу можна збільшувати смугу пропускання у разі відповідного зменшення співвідношення сигнал/завада чи навпаки. Отже існує можливість варіації цими параметрами каналу.

Звернемо увагу на те, що перше рівняння ЧЕБ (2) із використанням співвідношень (1) та (2) набуває вигляду, який можна розглядати як третє рівняння ЧЕБ:

$$\begin{aligned} \Delta F_{\text{аіі}} &= Bh^2 / h_{\text{аіі}}^2 = P_c / (N_0 h_{\text{аіі}}^2) = \\ &= (\lim_{\Delta F \rightarrow \infty} C_n) / (1,44 \cdot h_{\text{аіі}}^2) = \\ &= -\alpha^2 \lim_{\Delta F \rightarrow \infty} C_n / [2,88 \cdot \ln(2P_{\text{аєєд}})]. \end{aligned} \quad (4)$$

Із третього рівняння ЧЕБ (4) витікає, що при заданих виду модуляції α^2 та межі пропускну спроможності $\lim_{\Delta F \rightarrow \infty} C_n$ допустима смуга пропускання каналу $\Delta F_{\text{аіі}}$ визначається вимогами щодо цілісності інформаційних об'єктів (потрібною ймовірністю викривлення символу) $P_{\text{аєєд}}$.

Частотна дискретизація та пропускна спроможність каналів

Отже, величину допустимої смуги пропускання каналу $\Delta F_{\text{аіі}}$ можна розглядати як певну частку (дискрету) загальної смуги пропускання каналу $\Delta F_{\text{а}} = \Delta F_{\text{аіі}}$, при якій забезпечується передача інформації із характеристиками, які задовольняють визначеним умовам.

Окрім того, із умови ЧЕБ (2) при трьох існуючих чи заданих параметрах (наприклад, потужності сигналу P_c , спектральній щільності потужності завади N_0) і потрібній ймовірності викривлення символу $P_{\text{аєєд}}$ із (2) однозначно визначається четвертий — допустима смуга пропускання $\Delta F_{\text{аіі}}$. Аналогічно, із рівняння (3) при трьох існуючих чи заданих параметрах (наприклад, потужності сигналу P_c , спектральній щільності потужності завади N_0) і потрібній смузі пропускання ΔF чи потрібному співвідношенні сигнал/завада h^2 однозначно визначається четвертий — допустиме співвідношення сигнал/завада h^2 чи смуга пропускання ΔF . Так само при заданих смузі пропускання ΔF і співвідношенні сигнал/завада h^2 однозначно визначається потрібне співвідношення P_c / N_0 .

Зрозуміло, що в реальних умовах можливі різні співвідношення між загальною шириною

смуги пропускання каналу $\Delta F_{\text{є}}$ та величиною дискрети $\Delta F_{\text{аіі}}$, потрібної для передачі інформації із характеристиками, які задовольняють заданим умовам.

Першим співвідношенням, яке можливе є: $\Delta F_{\text{є}} = \Delta F_{\text{а}}$, коли уся смуга пропускання каналу розглядається як одна дискрета. Нагадаємо, що цей варіант відповідає такому частотно-енергетичному балансу, коли можливою є передача лише бінарних сигналів із швидкістю $V \approx \Delta F_{\text{є}} = \Delta F_{\text{а}}$. При цьому будь-які зміни в організації передачі інформаційних об'єктів є можливими лише у бік зменшення швидкості у випадку, коли таке зменшення не суперечить можливостям каналу та джерела інформації. Такі можливості розглядаються нижче.

Другим можливим співвідношенням є: $\Delta F_{\text{є}} < \Delta F_{\text{а}}$. У цьому випадку можливостей каналу недостатньо для передачі інформації із характеристиками, які задовольняють заданим умовам. Отже, для задоволення вимог ЧЕБ слід зменшувати швидкість інформаційного обміну, коли таке зменшення не суперечить вимогам джерела інформації. За рахунок цього можливе звуження смуги пропускання та зменшення впливу завад, збільшення співвідношення сигнал/шум і доведення ймовірності викривлення символу до заданої. Такі можливості також розглядаються нижче.

Нарешті, третім **можливим співвідношенням** є: $\Delta F_{\text{є}} > \Delta F_{\text{а}}$. Це відповідає варіанту наявності ще невикористаних ресурсів каналу, які можна витратити для підвищення його пропускну спроможності. З цією метою можна організувати передачу інформації одного і того ж повідомлення не послідовно в межах однієї (в цьому випадку — порівняно низькочастотної) дискрети, а здійснювати передачу інформації за певною кількістю k частотних підканалів (дискрет) одночасно.

Таку організацію використання частотного ресурсу каналу для підвищення пропускну спроможності каналу C_n будемо називати частотною дискретизацією.

Отже, розглянемо дискретизацію попередньо визначеної, та як можна ширшої, смуги пропускання каналу $\Delta F_{\text{є}}$. З цією метою загальна смуга пропускання каналу $\Delta F_{\text{є}}$ розбивається на певну кількість k частотних дискрет ($k = \Delta F_{\text{є}} / \Delta F_{\text{а}}$) завширшки $\Delta F_{\text{а}}$ кожна, по яких передаються одночасно також k сигналів, що утворюють у сукупності певне k -розрядне повідомлення.

Загальне число варіантів (алфавіт) повідомлень (дискретних сигналів) при цьому становить $n = 2^k$.

Отже, за час одного посилення можливо одночасно передати k різночастотних посилень.

Зрозуміло, що при швидкості передачі інформації B , мінімальній ширині смуги пропускання кожної з дискрет $\Delta F_{\text{д}} = B$ Гц, можливої кількості частотних дискрет k максимальна швидкість передачі інформації $B_{\text{д.макс}}$, тобто пропускна спроможність каналу при частотній дискретизації складе:

$$\hat{A}_{\text{д.макс}} = C_{\text{д}} = Bk = B\Delta F / B = \Delta F \text{ (біт/с)}.$$

Залежно від можливостей каналу та джерела інформації за рахунок або розширення загальної смуги пропускання каналу $\Delta F_{\text{д}}$, або зменшення ширини пропускання дискрет $\Delta F_{\text{д}}$, можливе збільшення кількості k частотних дискрет, що призведе до розширення алфавіту дискретних сигналів. Обирати ширину кожної з i частотних дискрет $\Delta F_{\text{д}} (i = 1, 2, \dots, k)$ та частотний проміжок між ними необхідно з урахуванням усунення взаємних впливів сигналів сусідніх дискрет.

Висновки

Таким чином, для заданих умов частотної дискретизації пропускна спроможність каналу можна розрахувати, виходячи із виразу:

$$\hat{A}_{\text{д.макс}} = C_{\text{д}} = \Delta F = kB_{\text{д}} \text{ біт/с}.$$

Причому в межах кожної із частотних дискрет для значення швидкості обміну:

$$B_{\text{д}} = \Delta F_{\text{д}} = -P_c \cdot \alpha^2 / (2N_0 \cdot \ln(2P_{\text{д}}))$$

забезпечуються умови щодо заданого значення ймовірності викривлення.

Порівнюючи розглянуті методи підвищення потенційної перепускної спроможності каналів РОМ видно, що запропонований метод частотної дискретизації може забезпечити більшу швидкість передачі інформації відносно відомого методу прямого розширення смуги пропускання каналу. Отже, цей метод є ефективним шляхом підвищення доступності інформаційних ресурсів у РОМ.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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.

2. Василенко В. С. Модели забезпечення цілісності інформаційних об'єктів // Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції «VĚDE A VZNIK – 2009/2010» 27 грудня 2009 — 05 січня 2010. Praha: «Publishing House» «Education and Science» s.r.o., 2009. — Т. 12. — С. 81—84.

3. Василенко В. С. Модель підвищення пропускної спроможності каналів обчислювальних мереж. Пряме розширення смуги пропускання каналів // Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції «ZPRÁVY VĚDECKÉ IDEJE – 2009» 27.10 – 05.11 2009. INFLAČNÍ BEZPENOST. — Praha: «Publishing House» «Education and Science» s.r.o., 2009. — Т. 12. — С. 49—51.

Стаття надійшла до редакції 30.12.2010.