

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, кафедра документального електрозв'язку

УПРАВЛІННЯ ВІДНОСНОЮ ЕФЕКТИВНОЮ ШВИДКІСТЮ ПЕРЕДАЧІ В МЕРЕЖАХ З КОМУТАЦІЄЮ ПАКЕТІВ

© Скопа О.О., Корчинський В.В., 2002

Розглядається можливість підвищення ефективності роботи телекомунікаційної мережі за рахунок збільшення відносної ефективної швидкості передачі кожного елемента системи. Досліджується доцільність використання режиму виявлення помилок і їхньому частковому виправленні при змінних статистичних параметрах каналу.

The opportunity of increase of an overall performance of a telecommunication network is considered at the expense of increase of relative effective speed of transfer of each element of system. The expediency of use of a mode of detection of mistakes and their partial correction is investigated at varied statistical parameters of the channel.

Дослідження проблеми і постановка задачі

Однією з задач, що стоять перед мережами з комутацією пакетів, є підвищення швидкості передачі. Реалізація передачі даних у мережі здійснюється на основі традиційних систем з вирішальним зворотним зв'язком (ВЗЗ). Системи передачі даних (ПД) з ВЗЗ знайшли широке застосування і функціонують на різних типах каналів зв'язку. Відповідно до рекомендацій МСЕ/МККТТ, у системах і кінцевих пристроях ПД повинен забезпечуватися коефіцієнт помилок не більше, ніж $p=1 \cdot 10^{-6}$. Іншою важливою вимогою є забезпечення часових параметрів на проходження встановленого обсягу інформації через систему ПД.

Одним з показників ефективності функціонування систем ПД з ВЗЗ, є відносна ефективна швидкість передачі R [3]. На її значення впливають довжина кодової комбінації та інтенсивність і характер розподілу помилок у каналі ПД. Традиційно в системах ПД з ВЗЗ застосовується режим з виявленням помилок.

Перспектива підвищення швидкості R можлива за рахунок автоматичного вибору системою ПД з ВЗЗ оптимального режиму коригувального коду з урахуванням поточного стану каналу. Наприклад, зменшення числа перезапиту можна забезпечити за рахунок включення режиму виправлення помилок. Цей режим, в основному, застосовується в системах ПД без зворотного зв'язку і надмірність коригувального коду звичайно розрахована на найгірші умови роботи. Очевидно, що в системах ПД з ВЗЗ не можна цілком відмовитися від виявлення помилок, тому що в періоди незадовільного стану каналу всяке виправлення помилок може виявитися неефективним. Тому процедура виправлення помилок у системах ПД з ВЗЗ доцільна лише у випадку поєднання її з одночасним виявленням помилок. З цього можна припустити, що декодувальні пристрої на приймальній стороні системи повинні забезпечувати виправлення помилок деякої малої кратності і при цьому виявляти помилки більшої кратності. Це ускладнює алгоритм роботи декодувальних пристроїв і їх технічну реалізацію, а також вимагає наявності пристрою контролю стану каналу ПД. Однак питання про вибір між ускладненням алгоритму роботи системи і збільшенням швидкості передачі по каналах багато в чому визначається економічними показниками. Останнім часом вияви-

лася тенденція здешевлення систем передачі інформації і збереження високої вартості часу використання каналів зв'язку.

З метою вивчення і дослідження можливості управління відносною ефективною швидкістю в мережах з комутацією пакетів розглянемо надлишковий двійковий (n, k) -код з кодовою відстанню $d_0=2t_i+1$, де t_i – кратність виправлення помилок. У режимі виявлення і виправлення помилок такий код може гарантовано виправляти всі помилки кратності не вище $t_{ид}$ і виявляти всі помилки кратності не вище $t_{об}$, якщо дотримується умова

$$t_{ид} + t_{об} + 1 \leq d_0, \quad (1)$$

де $t_{ид}$ - число помилок, що виправляються, декодувальним пристроєм, $t_{об}$ - число помилок, що виявляються кодом.

Як видно з (1), у такому режимі роботи системи штучно занижуються потенційні можливості коду по виявленню максимальної кратності помилки на величину $t_{ид}$. Однак, замість цього, забезпечується виправлення помилок малої кратності. В зв'язку з тим, що більшість реальних каналів мають нестационарний характер розподілу помилок у часі і велике розходження в параметрах [4], виникає питання про найбільш доцільні умови функціонування системи. Проведемо дослідження ефективності систем ПД безупинною передачею та з ВЗЗ (ВЗЗбп) при частковому виправленню помилок в поєднанні з їх виявленням.

Методика дослідження

Розглянемо систему ПД з ВЗЗ, безупинною передачею і накопиченням групи знаків (ВЗЗнз), що використовує лінійний (n, k) код у режимі часткового виправлення помилок кратності не вище $t_{ид}$ і виявлення помилок кратності не вище $2t_i-t_{ид}$. У такій системі ймовірність невиявлення помилок $P_{НО}(n)$ [3] і ймовірність стирання $P_{СТ}(n)$, що характеризують виявлення помилок у кодовому слові довжиною n елементів, визначається як

$$\left. \begin{aligned} P_{НО}(n) &\leq 2^{k-n} P(\geq (2t_i + 1) - t_{ид}, n) \sum_{i=0}^{t_{ид}} C_n^i \\ P_{СТ}(n) &\geq P(\geq t_{ид} + 1, n) - P_{НО}(n) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

У системах ПД з ВЗЗнз відносна ефективна швидкість передачі R може змінюватися і є функцією стану каналу і параметрів передачі [2]

$$R = \gamma_K \cdot \gamma_{\mathcal{E}} = \frac{k}{n} \cdot \frac{1}{1 + \frac{M \cdot P_{СТ}(n)}{1 - P_{СТ}(n)}}, \quad (4)$$

де γ_K – відносний коефіцієнт швидкості коду; $\gamma_{\mathcal{E}}$ – відносний коефіцієнт кодової ефективності використання каналу, обумовлений ймовірністю помилкового прийому одиничного елемента; k – число інформаційних елементів у кодовому слові n , M – кількість повторюваних кодових слів.

Значення M визначає ємність накопичувача для систем ПД з ВЗЗнз

$$M = 1 + \frac{2t_p + t_o}{t_{комб}}, \quad (5)$$

де $t_p = \frac{L}{V}$ – час поширення сигналу в каналі зв'язку, с; $t_{\text{комб}} = \frac{n}{B}$ – тривалість кодової комбінації з n розрядів, с; $t_o = \frac{1}{B}$ – тривалість елементарної послідовності; L – відстань між кінцевими станціями, км; V – швидкість поширення сигналу в каналі, км/с; $B = D \cdot \mu$ – швидкість передачі, біт/с; D – швидкість модуляції, Бод; μ – питома швидкість передачі, біт/с.

Значення параметрів R , γ_K і $\gamma_{\text{Э}}$ обмежені діапазоном чисел від 0 до 1. При цьому відношення $R = k/n$ визначає теоретичну межу ефективності системи ПД зі зворотним зв'язком. У реальних умовах функціонування системи ПД практично не вдається досягти теоретичної межі R , однак наблизитися до нього можна за рахунок використання ефективних методів передачі та ефективних алгоритмів управління. При розробці нової системи необхідно щоб $R \rightarrow 1$ і $R > R_{\text{пр}}$, де $R_{\text{пр}}$ відносна ефективність швидкості передачі прототипу системи ПД з ВЗЗ із показниками функціонування, що є кращими на момент розробки нової системи.

Як видно з (4) наблизитися до теоретичної межі можна за умови, що коефіцієнти γ_K і $\gamma_{\text{Э}}$ також прагнуть до 1. Отже, при виборі параметрів і алгоритму передачі системи ПД з ВЗЗ необхідно враховувати цю умову.

Для кодів, що виявляють і виправляють помилки ймовірність $P_{\text{НО}}(n)$ можна обчислити по наближеній формулі [3, (8.7)]:

$$P_{\text{НО}}(n) \approx \frac{p_o}{2^{n-k}} \left(\frac{n}{d_o - t_{\text{ид}}} \right)^{1-\alpha} \sum_{i=0}^{t_{\text{ид}}} C_n^i. \quad (6)$$

Для оцінки впливу γ_K і $\gamma_{\text{Э}}$ на швидкість передачі R з метою визначення їх оптимальних значень при різних параметрах коригувального коду і дискретного каналу зручно зв'язати співмножники формули (4) з параметрами n , k , d_o , p_o , α і $P_{\text{НО}}(n)$.

З врахуванням того, що кількість перевірюваних елементів у кодовій комбінації $r = n - k$, з (6) знайдемо

$$r = 3,32 \left[(1-\alpha) \lg \frac{n}{d_o - t_{\text{ид}}} + \lg p_o + \lg \sum_{i=0}^{t_{\text{ид}}} C_n^i - \lg P_{\text{НО}}(n) \right]. \quad (7)$$

Зробимо в першому співмножнику виразу (3) заміну k на $n-r$ і з врахуванням виразу (7) отримаємо

$$\gamma_K = \frac{k}{n} = \left\{ 1 - \frac{3,32}{n} \left[(1-\alpha) \lg \frac{n}{d_o - t_{\text{ид}}} + \lg p_{\text{ош}} + \lg \sum_{i=0}^{t_{\text{ид}}} C_n^i - \lg P_{\text{НО}}(n) \right] \right\}. \quad (8)$$

Вираз для другого співмножника виразу (4) отримаємо з врахуванням виразу (5). Тоді

$$\gamma_{\text{Э}} = \frac{1 - P_{\text{СТ}}(n)}{1 + P_{\text{СТ}}(n) \cdot \frac{2LB}{n} + 1}. \quad (9)$$

Підставивши (6) і (7) у друге рівняння формули (3) отримаємо

$$P_{CT}(n) = n^{1-\alpha} p_0 \left[\frac{1}{t_{ид} + 1} - \frac{\sum_{i=0}^{t_{ид}} C_n^i}{2^{3,32 \left((1-\alpha) \lg \frac{n}{d_0 - t_{ид}} + \lg p_0 + \lg \sum_{i=0}^{t_{ид}} C_n^i - \lg P_{HO}(n) \right)} (d_0 - t_{ид})^{1-\alpha}} \right]. \quad (10)$$

Підставляючи (8) і (9) у (4), отримаємо вираз для розрахунку відносної ефективної швидкості передачі для системи ПД з ВЗЗнз у режимі коригувального коду, що виправляє і виявляє помилки, де $P_{CT}(n)$ визначається по формулі (10).

$$R = \left\{ 1 - \frac{3,32}{n} \cdot \left[(1-\alpha) \lg \frac{n}{d_0 - t_{ид}} + \lg p_0 + \lg \sum_{i=0}^{t_{ид}} C_n^i - \lg P_{HO}(n) \right] \right\} \cdot \left[\frac{1 - P_{CT}(n)}{\frac{2LB}{V} + 1} \right]. \quad (11)$$

Розглянемо систему ПД з ВЗЗнз, що використовує лінійний (n, k) код у режимі тільки виявлення помилок кратності не вище $2t_i$ [1], де

$$\left. \begin{aligned} P_{HO}(n) &\leq 2^{k-n} P(\geq 2t_i + 1, n) \\ P_{CT}(n) &\geq P(\geq 1, n) - P_{HO}(n) \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Вираз для розрахунку відносної ефективної швидкості передачі для системи ПД з ВЗЗнз тільки з виявленням помилок представлений як [1]

$$R = \left\{ 1 - \frac{3,32}{n} \cdot \left[(1-\alpha) \lg \frac{n}{d_0} + \lg p_0 - \lg P_{HO}(n) \right] \right\} \cdot \left[\frac{1 - P_{CT}(n)}{\frac{2LB}{V} + 1} \right] \left. \right\} \quad (13)$$

$$P_{CT}(n) = n^{1-\alpha} p_0 \left[1 - \frac{1}{2^{3,32 \left((1-\alpha) \lg \frac{n}{d_0} + \lg p_0 - \lg P_{HO}(n) \right)} d_0^{1-\alpha}} \right].$$

Для повноти аналізу розглянемо модель каналу ПД [3], відповідно до якої ймовірність перекрученої кодової комбінації може бути знайдена по формулі

$$P(\geq 1; n) = n^{1-\alpha} p_0, \quad (14)$$

де α - показник групування помилок, p_0 - ймовірність помилки одиничного елемента.

Відповідно до цієї моделі ступінь зростання $P(\geq 1; n)$ з ростом n залежить від характеру розподілу помилок. На мал.1 показана залежність від α при різних довжинах n .

На мал. 2 представлені залежності R від довжини кодової комбінації. Крива 1 відповідає режиму роботи системи з виявленням помилок при $p_0 = 2,5 \cdot 10^{-3}$, $\alpha = 0,29$. У випадку зміни заводої обстановки, наприклад коефіцієнт групування помилок зменшився до величини

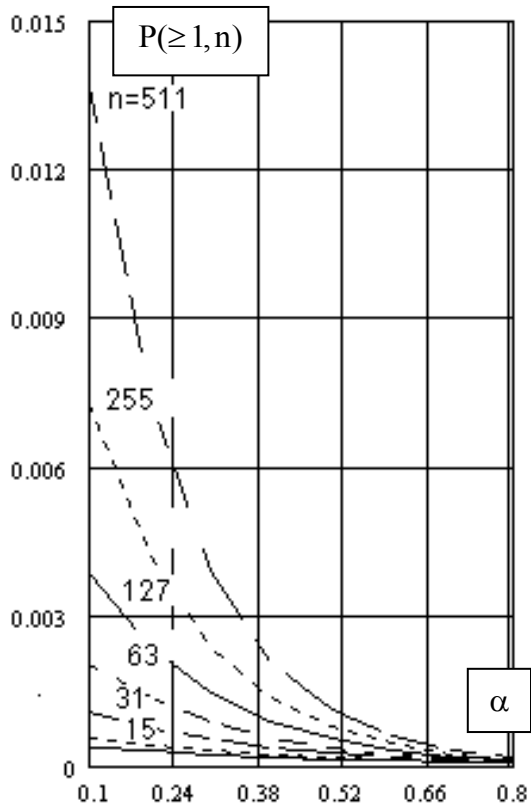


Рис.1. Залежність $P(\geq 1, n)$ від α при $p_0=5 \cdot 10^{-3}$

$\alpha=0,1$, швидкість R при довжині коду $n=255$ (точка А) змінить своє значення з 0,8 на 0,548 (точка 3), тобто втрати у швидкості передачі склали 32%. Зменшення R пояснюється збільшенням кількості перекручених кодових комбінацій через що зростає число перезапитів. З'ясуємо тепер, що відбудеться, якщо при зміні поточного стану каналу система перейде на режим функціонування з виправленням і виявленням помилок. Крива 3 (мал.2) відповідає режиму виправлення помилок кратності $t_{ид}=1$ зі збереженням здатності коду виявляти помилки кратності не вище $t_{ид}=3$. При переході на цей режим значення R збільшилося з 0,548 (точка 3) до 0,69 (точка В) при незмінній довжині коду $n=255$, тобто втрати у швидкості передачі щодо точки А (мал.2) склали 14%. Дані розрахунків свідчать про те, що перехід на цей режим дозволив істотно компенсувати втрати у швидкості передачі через погіршення якості каналу.

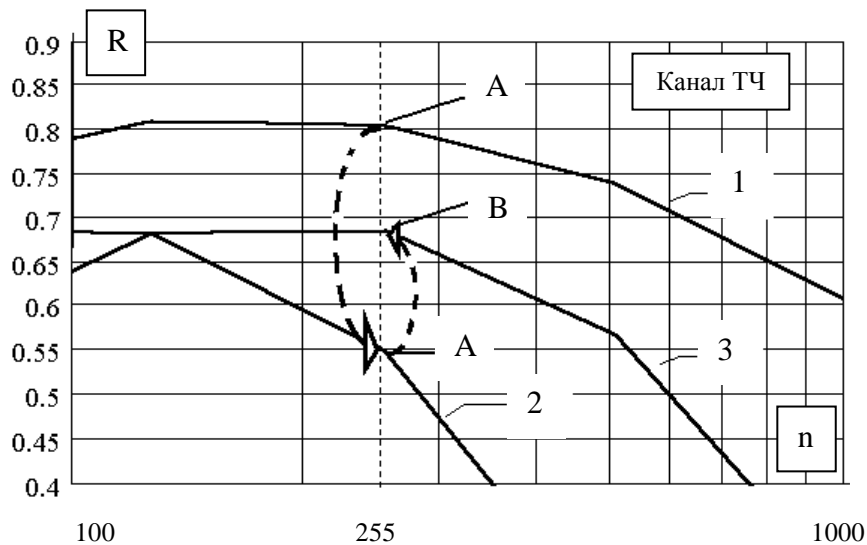


Рис. 2. Графік залежності швидкості R від довжини кодової комбінації для системи ПД з ВЗЗбп в режимах:

- 1) виявлення помилок при $p_0=2,5 \cdot 10^{-3}$, $\alpha=0,29$, $d_0=4$, $P_{HO}(n)=3 \cdot 10^{-6}$, $L=100$ км;
- 2) виявлення помилок при $p_0=2,5 \cdot 10^{-3}$, $\alpha=0,1$, $d_0=4$, $P_{HO}(n)=3 \cdot 10^{-6}$, $L=100$ км;
- 3) виправленням та виявлення помилок $p_0=2,8 \cdot 10^{-3}$, $\alpha=0,1$, $d_0=4$, $t_{ид}=1$, $P_{HO}(n)=3 \cdot 10^{-6}$, $L=100$ км;

Таким чином, у системі ПД з ВЗЗбп і виявленням помилок погіршення якості каналу (параметр $\alpha \rightarrow 0$), спричиняє появу додаткового числа перекручених кодових комбінацій. При цьому збільшується частка перекручених кодових комбінацій з малою кратністю помилок і в той же час зменшується число перекручених кодових комбінацій з високою кратністю помилок. Остання обставина робить доцільним перехід системи на режим одночасного виправлення і виявлення помилок, при якому погіршення виявляючих здібностей коду, компенсується станом каналу з малою ймовірністю поразки кодової комбінації великою кратністю помилок. Виправлення ж помилок малої кратності дозволяє знизити кількість перепитів, а, отже, підвищити R .

Висновки

1. Отримано формулу (11) для розрахунку ефективної відносної швидкості передачі для системи ПД з ВЗЗнз у режимі часткового виправлення помилок малої кратності $t_{\text{д}} < t_i$ з одночасним виявленням помилок обмеженої кратності не вище $2t_i - t_{\text{д}}$.

2. Режим часткового виправлення і виявлення помилок доцільно поєднати з режимом виявлення помилок. Вибір режиму системою ПД з ВЗЗбп здійснюється з врахуванням поточної якості каналу.

3. Режим виявлення помилок рекомендується для стану каналу з великим коефіцієнтом групування помилок $\alpha = 1,8 \dots 4,5$, так як в цьому випадку код може забезпечити виявлення помилок високої кратності.

4. Режим виправлення помилок малої кратності і виявлення помилок кратності не вище $2t_i - t_{\text{д}}$ рекомендується для стану каналу з невисоким коефіцієнтом групування помилок $\alpha < 0,18$, що доцільно для кодів з невеликими виявляючими властивостями.

Таким чином, застосування в системах ПД з ВЗЗбп розглянутого режиму захисту від помилок з погляду критерію ефективності – підвищення швидкості R і збереження при цьому необхідної вірності передачі – доцільно в каналах з шумами та в періоди незадовільного його стану.

1. Захарченко В.Н., Корчинский В.В., Гринь А.А. Эффективность систем ПД с РОС и переменными параметрами корректирующего кода / Радиотехника. 2000. Вып. 110.

2. Захарченко В.Н., Корчинский В.В. Модель потока ошибок при исследовании систем передачи данных с переменными параметрами. / Сборник трудов УГАС им. А.С. Попова №1, 1999.

3. Элементы теории передачи данных дискретной информации / Пуртов Л.П., Замрий А.С., Захаров А.И., Охорозин В.М – М.: Связь, 1972. – 232 с.

4. Морозов В.Г., Пуртов Л.П., А.С.Замрий. Обобщение экспериментальных данных по вероятности и показателю группирования ошибок. – Техника проводной связи. Сер. ТПС. - 1981. - Вып. 4 (2). С. 53 – 60.