

УДК 621.391.3

**М.В. Захарченко**, д-р техн. наук, проф.,  
**М.М. Гаджиєв**, канд. техн. наук, доц.,  
**О.М. Мартинова**, інженер,  
 Одес. нац. акад. зв'язку ім. О.С.Попова

## ТРАНСФОРМУВАННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ НЕСТАЦІОНАРНИХ КАНАЛІВ В ЯКІСТЬ ПЕРЕДАЧІ

*Н.В. Захарченко, М.М. Гаджиєв, Е.Н. Мартинова.* **Трансформации пропускной способности нестационарных каналов в качество передачи.** Предложен способ превращения пропускной способности нестационарных каналов при таймерных сигналах в качество передачи одного байта информации.

*N.V. Zakharchenko, M.M. Gadzhyiev, E.M. Martynova.* **Transformation of nonstationary channels capacity into the transmission quality.** The algorithm of transforming the non-stationary channels capacity with timer signals into the quality of transmitting one byte of information has been suggested.

При проектуванні системи передачі даних нестационарними каналами зв'язку користуються моделлю каналу постійного струму (КПС), яка будується на підставі вторинних характеристик спотворення: параметрів дроблень, крайових спотворень та помилок [1].

Дроблення та крайові спотворення характеризують дискретний за рівнем та безперервний за часом канал (КПС), а помилки — дискретний за рівнем та часом канал (ДКЗ).

Вимірювання на реальних каналах зв'язку констатують, що закон зміщень значущих моментів модуляції (ЗММ) є нормальний, а розділення тривалості дроблень — логарифмічно-нормальним [1].

Матриця перехідних ймовірностей для такої моделі має форму

$$\mathbf{\Pi} = \begin{pmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} \\ \pi_{21} & \pi_{22} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де  $\pi_{11} + \pi_{12} = \pi_{21} + \pi_{22} = 1$ .

А матриця ймовірностей появи помилки в станах —  $\mathbf{\Theta}_\varepsilon = \|\varepsilon_1 \varepsilon_2\|$ , де  $\varepsilon_1$  означає ймовірність появи помилки у стані 1, а  $\varepsilon_2$  — ймовірність появи помилки у стані 2.

Джерело процесу комутації і переходу від одного стаціонарного стану до іншого є також ланцюгом Маркова з  $l$ -станами, матриця перехідних ймовірностей якого має вигляд

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} P_{11}P_{12}\dots P_{1l} \\ P_{21}P_{22}\dots P_{2l} \\ \dots\dots\dots \\ P_{l1}P_{l2}\dots P_{ll} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Після того, як комутатор визначить номер стаціонарного стану, слід визначити тривалість перебування моделі в цьому стаціонарному стані. Розподіл ймовірностей часу перебування у стаціонарних станах задається матрицею

$$\mathbf{P}(l) = \begin{pmatrix} p_1(l) \\ p_2(l) \\ \dots\dots\dots \\ p_l(l) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

а для описування  $p_u(l)$  може бути обрано експоненційний закон  $p_u(l) = \exp(-l/T_{\text{сеп}}^u)$ , де  $(T_{\text{сеп}}^u)$  — середній час перебування в  $u$ -му стаціонарному стані.

Для визначення параметрів каналів можна скористатись моделлю Елліота-Гільберта [2]. Дана модель описує потік помилок в каналі з двома станами:

— “добрим” станом, в якому канал знаходиться 0,99...0,999% часу, а імовірність помилкового прийому елемента  $P_{ед}$  коли на декілька порядків менше середнього  $\bar{P}_e$  значення  $P_{ед} \ll \bar{P}_e$ ;

— “поганим” станом, в якому канал знаходиться менше одного процента часу, а імовірність помилкового прийому елемента на багато більше середнього значення  $P_{еп} \gg \bar{P}_e$ .

З метою оцінки параметрів каналу в “доброму” стані проведені виміри статистичних характеристик спотворень сигналів в каналі з двома послідовно включеними станціями комутації при передачі дискретних сигналів через модем з частотною модуляцією (ЧМ) при частоті  $\Delta F = 700$  Гц. Виміри показали:

— кількість занижень рівня сигналу нижче “порогового” значення —  $720$  заниж./год (0,2 занижень на секунду);

— параметри занижень: математичне очікування часу заниження  $\bar{l}_3 = 1,34$  мс; середнє значення інтервалу часу між заниженнями  $\bar{L} = 3095$  мс; дисперсія часу заниження  $D(l) = 1,47$  (мс)<sup>2</sup>.

Питому вагу  $i$ -кратних помилок при передачі одного байта (8 елементів) при швидкості передачі 600 Бод ( $t_0 = 1$  мс) та реєстрації в середній точці наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Питома вага  $i$ -кратних помилок

$P \geq 1,8$	Результати вимірювань								
	1	2	3	4	5	6	7	8	$P_s$
$2,5 \cdot 10^{-3}$	0,55	0,32	0,095	0,025	0,005	0,003	0,0025	0,0015	$4,6 \cdot 10^{-4}$
$2,6 \cdot 10^{-3}$ *	0,69	0,693	0,119	0,0746	0,037	0,0076	0,0032	0,0017	$2,7 \cdot 10^{-4}$

— з метою оцінки співвідношення сигнал/завада в “доброму” стані в канал передавались сигнальні кодові конструкції з різною кількістю ЗММ, сформовані на різних інтервалах  $T_c$ , в яких відстань між суміжними ЗММ [2]

$$\tau_e = t_0 + i\Delta, \quad (4)$$

де  $i \in 0; 1...7$ ;  $\Delta = \frac{1}{7}t_0$ .

В зв'язку з тим, що на приймальній стороні послідовність переданих сигнальних конструкцій відома, на прийомі проводилась реєстрація відхилень значущих моментів відтворень (ЗМВ) (величина відхилень в значеннях  $\Delta$  і номер ЗМВ) та кількості сигнальних конструкцій, в яких кількість ЗМВ відрізняється від кількості переданих ЗММ.

Слід зауважити що на інтервалах  $T_c$  передавались різні кількості ЗММ

$$T_{c1} \rightarrow 6; \quad T_{c2} \rightarrow 11; \quad T_{c3} \rightarrow 23.$$

При реєстрації враховувалась і кількість помилкових сигнальних конструкцій з урахуванням кількості ЗМВ на величину  $\Theta > \frac{1}{2}\Delta$ .

\* — питома вага  $i$ -кратних помилок після перекодування таймерних сигнальних конструкцій в 12-елементні кодові слова, одержані при вимірюваннях на реальних каналах.

Наприклад, при В-600 Бод для інтервалу при передачі 100000 конструкцій на величину  $\frac{3}{2}\Delta \geq \Theta \geq \frac{1}{2}\Delta$ ,  $T_{c1}$  структура зміщень ЗМВ має вигляд: зміщення одного ЗМВ-224; двох ЗМВ — 60; трьох ЗМВ — 10; чотирьох ЗМВ — 3.

Таким чином, із 600000 переданих ЗММ ( $100000 \times 6$ ) за рахунок завади на величину  $\frac{3}{2}\Delta \geq \Theta \geq \frac{1}{2}\Delta$  змістилось 386 ЗМВ.

Імовірність зміщення [4]

$$2[0,5 - \Phi(Z)] = 6,4 \cdot 10^{-5};$$

$$0,5 - \Phi(Z) = 3,2 \cdot 10^{-5}; \quad Z = 4,1; \quad Z = \frac{\Delta}{2\sigma}.$$

Враховуючи те, що  $\Delta = 0,1428t_0$ , середнє квадратичне відхилення  $\sigma = 0,0174t_0$ .

Для каналу з частотною модуляцією середньоквадратичне значення  $\sigma$  визначається величиною сигнал/завада  $h$  [3]

$$\sigma = \frac{1}{4h}. \quad (5)$$

Таким чином, величина  $h = \frac{1}{4\sigma} = \frac{1}{4 \cdot 0,0174} = 14,36$ , що відповідає моделі Гільберта з двома станами  $h^2 > 100$  [2].

Одержане значення  $h$  свідчить про те, що імовірність помилки в “доброму” стані  $P_{нд}$  набагато менша від середнього значення  $\bar{P}_n$  [5]

$$P_{нд} = \frac{1}{2}e^{-\frac{h^2}{2}} \ll \bar{P}_n. \quad (6)$$

Збільшити пропускну спроможність каналу, не змінюючи його алфавіту (наприклад двійковий канал), можливо тільки за рахунок зменшення енергетичної відстані між сигнальними конструкціями. При розрядно-цифровому кодуванні мінімальна відстань визначається енергією одного найквістового елемента. Пряме збільшення швидкості модуляції (передача сигналів з відстанню між суміжними моментами модуляції менше найквістового інтервалу) призводить до суттєвого росту міжсимвольних завад, що заважає збільшити пропускну здатність двійкового каналу більше 1.

Для збільшення кількості реалізацій на інтервалі часу  $T_c = mt_0$  пропонується взяти за базовий елемент  $\Delta = \frac{t_0}{S}$  ( $S \in 2, 3, \dots, K$ ) і із всіх сигнальних конструкцій ( $2^{ms}$ ) вибрати тільки ті, у яких відстань між суміжними ЗММ  $\tau_e \geq S\Delta$ .

Реалізація двох сигнальних конструкцій, в яких інформаційними параметрами є відстань між моментами модуляції 0...I; I...II; II...III сприяє підвищенню пропускну спроможності (рис. 1).

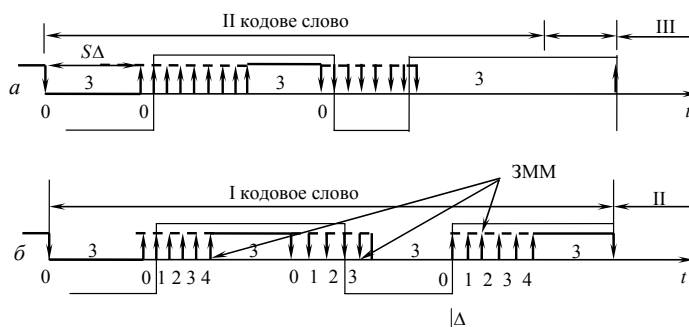


Рис 1. Реалізація двох сигнальних конструкцій

Кількість реалізацій з заданою кількістю ЗММ ( $i$ ) визначається значенням  $\Delta(S)$  і часом реалізації  $m(T_c = mt_0)$  [3]

$$N_p = C_{ms}^i - i(S-1), \quad (7)$$

де  $C$  — пропускна спроможність каналу;

Для прикладу наведемо значення кількості реалізацій для  $m = 4 \dots 8$  при  $S = 5$ ;  $i_1 = 3$ ;  $i_2 = 4$  (табл. 2).

Таблиця 2

Кількість реалізацій з заданою кількістю ЗММ

Показники	Значення показників				
	$2^m$	16	32	64	128
$m$	4	5	6	7	8
$S$	Кількість реалізацій				
5 ( $i_1=3$ )	56	286	816	1771	3276
5 ( $i_2=4$ )	1	126	1001	3876	10626

Пропускна спроможність каналу в кожному стані визначається як [2]

$$C = \frac{K}{m} \left[ \log_2 N_p + P_i \log_2 P_i + (1 - P_i) \log_2 \left( \frac{1 - P_i}{N_p - 1} \right) \right], \quad (8)$$

де  $K$  — коефіцієнт кількості реалізацій,

$P_i$  — матриця перехідних ймовірностей,

$N_p$  — кількість реалізацій з заданою кількістю ЗММ.

Слід зауважити, що значення  $C$  визначається окремо для каналу в “доброму” стані та “поганому” з подальшим урахуванням питомої ваги кожного стану  $K$  в сумарній пропускній спроможності.

Пропускна спроможність залежить від параметра  $S$  для двох значень  $h$ : залежності 1...3 для  $h_1=7,5$  при  $m \in 8; 6; 5$ ; залежності 4...6 для  $h_2=5,5$  (рис. 2).

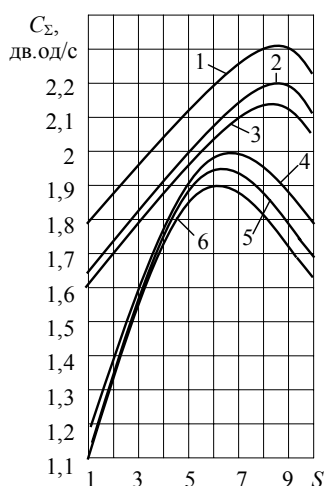


Рис. 2. Залежність пропускної спроможності каналу від параметра  $S$

Із залежностей можна зробити висновок, що для кожного значення  $h$  існує своє значення  $S$ , при якому  $C$  буде максимальним і більшим двох.

Пропускню спроможність можна трансформувати в якість передачі.

Для підвищення якості передачі використаємо надлишковий код, що виправляє однократні помилки.

Такий код повинен мати кодову відстань  $d=3$  [6]. Кількість збиткових елементів можна знайти із нерівності, знаючи кількість елементів первинного коду  $m$ ,

$$2^k > \sum_{i=0}^{d-2} C_{m+k-1}^i \quad (9)$$

Так, для передачі одного байта інформації при  $d=3$  кількість додаткових елементів  $K=4$ . Таким чином, для реалізації виправлення поодиноких помилок необхідно на інтервалі первинного коду реалізувати  $2^{12}$  сигнальних конструкцій ( $N_p = 4096$ ).

Враховуючи доцільність реалізацій сигнальних конструкцій рівної з точки зору циклового фазування довжини, після останнього ЗММ необхідно мати мінімальний інтервал  $t_3 = t_0$  [3]. Таким чином, при формуванні  $2^{14}$  конструкцій використовуємо перші сім елементів байта, а восьмий для забезпечення формування кодових слів рівної довжини.

Для синтезу  $2^{12}$  реалізацій при  $S=5$  можна використати 3876 реалізацій при  $i_2 = 4$  і частину реалізацій, які мають парну суму місць знаходження ЗММ при  $i=3$  (див. таблицю 2).

Враховуючи отримане значення  $\sigma = 1,74\%$  та значення  $\Delta = 0,2t_0$ , розрахуємо імовірність помилкового прийому одного ЗМВ в “доброму” стані

$$P_{3M} \left( \Theta > \frac{\Delta}{2} \right) = 2 \left[ 0,5 - \Phi \left( \frac{20}{2 \cdot 1,74} \right) \right] = 5 \cdot 10^{-9},$$

де  $\Theta$  — помилка в станах.

Зважаючи на те, що зміщення двох ЗМВ на задану величину практично неймовірно, вважатимемо, що максимальна імовірність помилкового прийому сигнальної конструкції для  $i=4$

$$P_{nR} = 4P_{3M} \left( \Theta > \frac{\Delta}{2} \right) = 20 \cdot 10^{-9} = 0,2 \cdot 10^{-7}.$$

Таким чином, основна кількість помилкових елементів буде виникати в період “поганого” стану каналу.

Дані таблиці 1 дозволяють визначити середнє значення спотворених елементів при передачі одного байта інформації разрядно-цифрового коду (РЦК) і після перетворення таймерних сигнальних конструкцій (ТСК) в РЦК. В першому випадку  $\bar{t} = 1,6t$ , в другому 2,31.

З метою зменшення впливу перетворення ТСК  $\rightarrow$  РЦК на середнє значення  $\bar{t}$  доцільно при кодуванні на передачі ввести перестановку елементів до формування ТСК, а на прийомі провести зворотну перестановку. В зв'язку з цим помилки стануть незалежними. Згідно з даними проведеного експерименту "поганій" стан каналу настає кожних 5 с (0,2 збурень/с), що призводить до помилкового прийому однієї таймерної сигнальної конструкції, внаслідок чого після кодоперетворення ТСК в 12-елементний РЦК на прийомі одержуємо в середньому 2,31 помилкові елементи. Тому що при швидкості модуляції  $V=600$  Бод за 5 с передається умовних  $\left(\frac{600}{8} \cdot 12 \cdot 5\right) = 4500$  елементів РЦК, імовірність помилкового прийому елемента дорівнює  $(2,31:4500) \cdot 5 \cdot 10^{-4}$ .

Імовірність вірного прийому 12-елементного кодового слова з урахуванням виправлення поодиноких помилок

$$P_{\text{вп}} = (0,9995)^{12} + 12 \cdot (5 \cdot 10^{-4}) \cdot (0,9995)^{11} = 0,999983554.$$

Для порівняння з імовірністю вірного прийому первинного коду розрахуємо значення еквівалентної імовірності помилки [5]

$$P_{\text{Е}} = \sqrt[8]{P_{\text{вп}}} = 0,99998.$$

Отже, еквівалентна імовірність помилкового прийому буде  $2 \cdot 10^{-5}$ , що більш ніж на порядок менше значення таблиці 1.

Таким чином, експериментально-вимірювальним шляхом доведено, що за рахунок кодоперетворення ТСК можна на порядок знизити вірогідність помилкового прийому, яке приводить до підвищення якості прийому-передачі сигналів нестационарними каналами зв'язку.

## Література

1. Шеховцев А.И. Передача информации по нестандартным каналам связи / Шеховцев А.И., Горохов С.Г. — Л.: ЛГУ, 1985. — 230 с.
2. Амосов А.А. Некоторые модели ошибок при передаче дискретной информации / Амосов А.А., Колпаков В.В. // Вопр. радиоэлектроники. — 1966. — Сер. 11. Вып. 4. — С. 12 — 16.
3. Захарченко В.М. Синтез багатопозиційних часових кодів. — К.: Техніка, 1999. — 281 с.
4. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. — М.: Наука, 1980. — 976 с.
5. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / А.Г. Зюко, А.И. Фалько, И.П. Панфилов и др.; Под ред. А.Г. Зюко. — М.: Радио и связь, 1985. — 272 с.
6. Кларк Дж.мл. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи: Пер. с англ. / Кларк Дж.мл., Кейн Дж.; Под ред. Б.С. Цыбакова. — М.: Радио и связь, 1987. — 392 с.

Надійшла до редакції 21 грудня 2007 р.