

УДК 621.391

Н. Ф. ЛОГВИНЕНКО, В. В. ТОРЯНИК, А. О. КОНВИСАРОВА*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОМЕРНОЙ АНАЛИТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ИСТОЧНИКА ПОМЕХ В ДИСКРЕТНЫХ КАНАЛАХ СВЯЗИ**

Предложена методика проверки адекватности стохастических моделей источников помех в бинарных дискретных каналах электросвязи. Методика основана на сравнении теоретических вероятностных характеристик дискретного канала и соответствующих статистических оценок этих характеристик. В качестве основных оценочных показателей выбраны вероятность ошибки на бит, средняя длина безошибочного интервала, вероятность приема блока определенной длины с ошибками и ошибками фиксированной кратности. Выполнены расчеты четырехмерной модели. Определены соотношения теоретических и статистических оценок параметров дискретного канала.

Ключевые слова: дискретный бинарный канал, источник ошибок, состояние источника ошибок, вероятностные характеристики, вектор ошибок, вероятность искажения бита.

Введение

К настоящему времени разработано чрезвычайно много моделей источника помех в дискретном канале [1-7]. Одна из достаточно простых и наиболее распространенных в инженерной практике приведена в [1]. Однако нельзя сказать, что проблема решена полностью. Одни модели не являются адекватными [2], хотя и просты. Другие модели не позволяют в явном виде получить такой важный для построения систем передачи данных параметр как вероятность приема блока длиной n бит с ошибкой конкретной кратности i : $P(n, i)$. Этого недостатка лишены так называемые многомерные модели [6, 7]. Однако вопрос объективной правомерности их использования пока остается открытым. Многопараметричность таких моделей и несложное увеличение числа их параметров является весьма привлекательными для инженерной практики [8, 9].

Постановка задачи

Целью настоящей работы является создание методики проверки адекватности многомерной модели для различных дискретных каналов электросвязи. Данная модель может быть интерпретирована как модель, основанная на цепи Маркова, когда дискретная однородная стационарная цепь имеет финальные вероятности.

Таким образом, объектом исследования является источник ошибок в дискретных каналах. Предмет исследования – многомерная математическая стохастическая модель, адекватно описывающая источник ошибок в дискретном бинарном канале электросвязи. Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Получение вектора ошибок в дискретном канале. Данный вектор может быть получен путем натуральных испытаний, в результате которых обычно строят эмпирическую функцию распределения, или на основании имитационного моделирования через линейаризацию эмпирической функции распределения частоты ошибок на бит. Точность линейаризации определяет размерность модели.

2. Обработка вектора ошибок и получение статистических показателей выборки для их оценки и сравнения с теоретическими значениями. При этом необходима оценка допустимых значений погрешностей между теоретическими значениями и статистическими показателями.

3. Сравнение статистических оценок с теоретическими, определение доверительных интервалов и формирование выводов относительно применимости моделей в инженерной практике.

**Сущность и краткий обзор
многомерных моделей**

Суть многомерной математической модели достаточно проста. Канал связи может находиться в одном из m состояний, в которые он попадает с вероятностями: P_1, P_2, \dots, P_m . При этом должно выполняться условие: $\sum_{i=1}^m P_i = 1$. Каждое состояние характеризуется условной вероятностью ошибки на бит: α_i , $i = 1, 2, \dots, m$. $0 < \alpha_i < 1$.

Таким образом, источник ошибок в дискретном канале будет описываться $2m$ параметрами. Предполагается, что в каждом состоянии ошибки независимы по битам. Поток ошибок моделируется на основании дискретного распределения, которое строится по эмпирической функции распределения

частоты ошибок путем ее линейной аппроксимации [7, 10]. При этом в качестве вероятностей α_i выбираются средние точки интервалов линейности на оси абсцисс, а вероятности P_i определяются как разность значений эмпирической функции распределения на концах i -го линейного участка. Методика построения вектора ошибок (бинарная последовательность с единицами на местах возникновения ошибок и нулями на безошибочных местах) приведена в [10]. Аналитические многомерные модели указанного вида могут быть нескольких типов [7, 11]. Наиболее простыми многомерными моделями являются так называемые мультипликативная и аддитивная модели [7]. Первая основана на предположении, что в процессе приема блока данных состояния могут перекрываться. За основу берутся средние длины бинарных подпоследовательностей блока данных из n бит, принятых в том или ином состоянии и равных величинам nP_i . Тогда, согласно закону больших чисел, вероятность приема блока длиной n бит без ошибок вычисляется по формуле:

$$P(n, 0) \approx \prod_{i=1}^m (1 - \alpha_i)^{nP_i}. \quad (1)$$

Аддитивная модель основывается на предположении, что блок данных принимается в одном и только в одном состоянии. Тогда вероятность приема блока без ошибок вычисляется по формуле:

$$P(n, 0) \approx \sum_{i=1}^m P_i (1 - \alpha_i)^n. \quad (2)$$

Эти две модели являются как бы «граничными», между которыми могут быть другие, которые приведены в [11]. Так, одна из них построена исходя из предположения, что состояния канала в процессе приема блока данных фиксированной длины не пересекаются. Другие модели основываются на предположении, что блок данных может приниматься в двух и более состояниях, т.е. аддитивная модель обобщается.

Таблица 1

Пример значений параметров модели

Параметр P	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃
	0,602	0,218	0,165	0,015
Параметр α	α ₀	α ₁	α ₂	α ₃
	0,0078	0,0275	0,095	0,0325

В табл. 1 приведены численные значения параметров четырехмерной модели для дискретного канала радиосвязи декаметрового диапазона. Эти значения справедливы для радиолинии небольшой протяженности (2–3 скачка). Ниже приведены примеры расчетов для такой модели.

Методика исследования моделей

Методика исследований должна основываться на статистике ошибок в реальных дискретных каналах. Поэтому, первый этап исследований – это измерение качества дискретного канала и получение эмпирической функции распределения частоты ошибок [10]. На втором этапе определяются состояния дискретного канала. Методика оценки этих состояний приведена в [11]. Основная цель этого этапа – исследование зависимости или независимости различных состояний. При ярко выраженной зависимости между состояниями необходимо применение моделей, описывающих каналы с памятью, например, цепи Маркова. Другой путь состоит в том, чтобы увеличить число состояний канала, т.е. увеличить точность аппроксимации эмпирической функции распределения частот. Третий этап – определение стохастических показателей статистической выборки о качестве дискретного канала. Четвертый этап – сравнительный анализ стохастических показателей и теоретических.

Стохастические и теоретические показатели качества дискретного канала

К основным показателям, которые следует сравнить для оценок адекватности моделей, относятся:

- вероятность ошибки на бит;
- средняя длина безошибочного интервала;
- вероятность приема блока определенной длины без ошибок и с ошибками;
- вероятность приема блока определенной длины с ошибками определенной кратности.

Обозначим:

W – длина вектора ошибок;

$P(n, 0)$, $P(n, > 1)$, $P(n, i)$ – вероятности соответственно приема блока длины n бит без ошибок, с ошибками и с ошибками кратности i ;

p_0 – вероятность искажения бита данных;

w_1 – число ошибочных бит в векторе из W бит;

$l_i^{(0)}$ – длина i -го безошибочного интервала в векторе ошибок;

N – число безошибочных интервалов в векторе ошибок;

$M[\lambda_0]$ – средняя длина безошибочного интервала;

N_n – число блоков длиной n бит в векторе ошибок;

$N_n(n, 0)$, $N_n(n, > 0)$, $N_n(n, i)$ – число блоков длиной n бит соответственно без ошибок, с ошибками и с ошибками кратности i в векторе ошибок.

Соотношения для теоретических и статистических оценок параметров дискретного канала приведены в табл. 2.

Таблица 2

Соотношения для теоретической и статистической оценок параметров моделей канала

Параметр	Теоретическая	Статистическая
Вероятность искажения бита данных	$p_0 = \sum_{i=1}^m P_i \alpha_i$	$\hat{p}_0 = \frac{w_1}{W}$
Средняя длина без-ошибочного интервала	$M[\lambda_0] = \sum_{i=1}^m P_i \frac{1 - \alpha_i}{\alpha_i}$	$\hat{M}[\lambda_0] = \frac{\sum_{i=1}^N l_i^{(0)}}{N}$
Вероятность приема блока без ошибок	Формулы (1), (2)	$\frac{N_n(n, 0)}{N_n}$
Вероятность приема блока с ошибками определенной кратности	мультипликативная модель: $P(n, t) = \sum_{i=1}^m \left[\prod_{i=1}^m C_{n_i}^t \alpha_i^t (1 - \alpha_i)^{1-t} \right]$ Аддитивная модель: $P(n, t) = \sum_{i=1}^m P_i C_{n_i}^t \alpha_i^t (1 - \alpha_i)^{1-t}$	$\frac{N_n(n, i)}{N_n}$

При определении статистических оценок вероятностей приема блока без ошибок, с ошибками и с ошибками кратности i : $P(n, 0)$, $P(n, > 0)$, $P(n, i)$ на вектор ошибок «накладывается» длина n , подсчитывается число тех или иных блоков, и данная величина ($N_n(n, 0)$, $N_n(n, > 0)$, $N_n(n, i)$) делится на общее число блоков N_n длины n в векторе ошибок.

Примеры расчетов

Ниже приводятся расчеты для случая четырехмерной модели с параметрами из табл. 1. В качестве средней длины кодового блока n взята статистическая оценка (см. табл. 4) равная 20 битам, теоретическое значение параметра p_0 равно 0,029, объем выборки для статистических оценок (длина вектора ошибок W) равный 10^7 . Оценка доверительного интервала для такой вероятности ошибок в соответствии с [12] показывает, что он является весьма малым (расчет проводился для доверительной вероятности 0,99, отличие в четвертых знаках после запятой), т.е. такой объем выборки вполне достаточен.

Данные о параметрах статистики приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики статистической выборки

Параметр	Значение
Длина вектора ошибок	10^7
Число безошибочных интервалов	34173
Число блоков средней длины	1255
Частота блоков с однократной ошибкой	0,35
Частота блоков с двукратной ошибкой	0,159
Частота блоков с трёхкратной ошибкой	0,079
Частота ошибочных блоков	0,083

Расчет частоты приема блоков с ошибками фиксированной кратности (одной, двух и трех) осуществлялся для аддитивной модели (см. табл. 2).

Программы расчета были реализованы на языке программирования C#. Расчеты проводились в среде Visual Studio. Результаты расчетов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Оценки параметров дискретного канала

Параметр	Теоретическая	Статистическая	Погрешность, %
Вероятность искажения бита данных	0,029	0,0312	7
Средняя длина безошибочного интервала	28,22	19,8	23
Вероятность приема блока без ошибок	0,0034	0,0029	13
Вероятность приема блока с однократной ошибкой	0,35	0,32	9
Вероятность приема блока с двукратной ошибкой	0,159	0,124	21
Вероятность приема блока с трёхкратной ошибкой	0,079	0,062	21

Сравнение статистических и теоретических оценок для аддитивной модели по данным табл. 4 показывает, что погрешности не превышают нескольких двоичных порядков, что представляется весьма приемлемым для практических приложений при проектировании систем передачи данных.

Заключення

Рассмотренная методика исследования многомерных моделей может быть использована при проектировании систем передачи данных для достаточно широкого класса задач при наличии эмпирических данных о качестве бинарных каналов.

Литература

1. *Элементы теории передачи дискретной информации [Текст]* / Л. П. Пуртов, А. С. Замрий, А. И. Захаров, В. М. Охорзин. – М. : Связь, 1972. – 232 с.

2. Блох, Э. Л. *Модели источника ошибок в каналах передачи цифровой информации [Текст]* / Э. Л. Блох, О. В. Попов, В. Я. Турин. – М. : Связь, 1971. – 312 с.

3. Wang, H. *Finite-state Markov channel-a useful model for radio communication channels [Text]* / H. Wang, N. Moayeri // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 1995. – vol. 44, no. 1. – P. 163-171.

4. Soury, H. *Average Bit Error Probability of Binary Coherent Signaling over Generalized Fading Channels Subject to Additive Generalized Gaussian Noise [Text]* / H. Soury, F. Yilmaz, A. Mohamed-Slim // *IEEE Communications Letters*. – 2012. – vol. 16, no. 6. – P. 785-788.

5. Логвиненко, Н. Ф. *Многомерная модель источников ошибок в дискретных каналах радиосвязи. [Текст]* / Н. Ф. Логвиненко, В. В. Ефимовская // *Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье : сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Харьковский гос. пед. ун-т им. Г. С. Сковороды. – Харьков, 1999. – Вып. 7, Ч. 3. – С. 295-298.*

6. Логвиненко, М. Ф. *Модельовання дії джерел завад в дискретних бінарних каналах зв'язку. [Текст]* / М. Ф. Логвиненко, Г. Ю. Під'ячий, В. А. Світличний // *Системи обробки інформації : Зб. наук. пр. / М-во оборони України, Харківський ун-т повітр. сил ім. І. Кожедуба. – Харків, 2008. – Вип. 7 (74). – С. 74-77.*

7. Логвиненко, Н. Ф. *Многомерные модели источника ошибок в стационарном дискретном бинарном канале [Текст]* / Н. Ф. Логвиненко // *Вісник нац. техн. ун-ту «ХПІ». Тем. вип. «Техніка і електрофізика високих напруг» зб. наук. пр. / М-во освіти та науки України, НТУ «ХПІ». – Харків, 2008. – № 44. – С. 99- 105.*

8. *Signal-to-Noise Ratio Analysis of a Noisy-Channel Model for a Capacitively Coupled Personal Area Network [Text]* / A. Sasaki, T. Ishihara, N. Shibata, R. Kawano, H. Morimura, M. Shinagawa // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2013. – T. 61, № 1. – P. 390-402.

9. Нурматов, А. Т. *Информационная характеристика дискретного канала связи с источником ошибок [Текст]* / А. Т. Нурматов, Ю. Р. Селихов // *Технические науки - от теории к практике. – 2016.*

– № 58(1). – С. 75-80.

10. Логвиненко, Н. Ф. *Планирование эксперимента по измерениям качества дискретных каналов и обработке их результатов [Текст]* / Н. Ф. Логвиненко // *Системи обробки інформації. – 2008. – Вип. 2(69). – С. 77- 79.*

11. Логвиненко, М. Ф. *Методика визначення станів бінарних дискретних каналів електрозв'язку [Текст]* / М. Ф. Логвиненко // *Системи обробки інформації. – 2010. – Вип. 1(82). – С. 81- 84.*

12. Вентцель, Е. С. *Теория вероятностей [Текст] : учеб. для вузов / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с.*

References

1. Purto, L. P., Zamrii, A. S., Zakharov, A. I., Okhorzin V. M. *Elementy teorii peredachi diskretnoi informatsii* [Elements of the theory of discrete information transmission]. Moscow, Communication Publ., 1972. 232 p.

2. Blokh, E. L., Popov, O. V., Turin V. Ya. *Modeli istochnika oshibok v kanalakh peredachi tsifrovoy informatsii* [Models of sources of error in the transmission channels of digital information]. Moscow, Communication Publ., 1971. 312 p.

3. Wang, H., Moayeri, N. *Finite-state Markov channel-a useful model for radio communication channels. IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1995. vol. 44, no. 1, pp. 163-171.

4. Soury, H., Yilmaz, F., Mohamed-Slim, F. *Average Bit Error Probability of Binary Coherent Signaling over Generalized Fading Channels Subject to Additive Generalized Gaussian Noise. IEEE Communications Letters*, 2012. vol. 16, no. 6, pp. 785-788.

5. Logvinenko, N. F., Efimovskaya, V. V. *Mnogomernaya model' istochnikov oshibok v diskretnykh kanalakh radiosvyazi. [A multidimensional model of error sources in discrete radio channels]. Informatsionnye tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnologiya, obrazovanie, zdorov'e – Proc. of Khar'kov's GPU "Information technology: science, technique, technology, education, health", 1999, vol. 7, no. 3, pp. 295-298.*

6. Lohvynenko, M. F., Pid'yachyy, H. Yu., Svitlychnyy, V. A. *Modelyuvannya diyi dzhерel zavad v dyskretnykh binarnykh kanalakh zv'yazku [Modeling the action of sources of interference in discrete binary communication channels] Systemy obrobky informatsiyi – Proc. of Khar'kov's UPS "Systems of information processing, 2008, vol. 7 (74), pp. 74-77.*

7. Logvinenko, N. F. *Mnogomernye modeli istochnika oshibok v statsionarnom diskretnom binarnom kanale [Multivariate models of sources of error in the stationary binary channels] Visnik nats. tekhn. un-tu «KhPI». – Proc. of NTU "KhPI" "Bulletin of the National Technical University. Special edition "Technique and electro physics of high tensions", 2008, no. 44, pp. 99-105.*

8. Sasaki, A., Ishihara, T., Shibata, N., Kawano, R., Morimura, H., Shinagawa, M. *Signal-to-Noise Ratio*

Analysis of a Noisy-Channel Model for a Capacitively Coupled Personal Area Network. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, vol. 61, no. 1, pp. 390-402.

9. Nurmatov, A. T., Selikhov, Yu. R. Informatsionnaya kharakteristika diskretnogo kanala svyazi s istochnikom oshibok [Information characteristics of discrete communication channel with the source of errors]. *Tekhnicheskie nauki - ot teorii k praktike - Engineering - From Theory to Practice*, 2016, no. 58(1), pp. 75-80.

10. Logvinenko, N. F. Planirovanie eksperimenta po izmereniyam kachestva diskretnikh kanalov i

obrabotke ikh rezul'tatov [Experimental Design for discrete channels measurement as and process their results]. *Sistemi obrobki informatsii – Proc. of Khar'kov's UPS "Systems of information processing"*, 2008, vol. 2(69), pp. 77- 79.

11. Lohvynenko, M. F. Metodyka vyznachennya staniv binarnykh dyskretnykh kanaliv elektrozv'yazku [Method of determining the state of binary discrete channels] *Sistemi obrobki informatsiyi – Proc. of Khar'kov's UPS "Systems of information processing"*, 2010, vol. 1(82), pp. 81- 84.

12. Venttsel, E. S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 576 p.

Поступила в редакцію 20.11.2016, рассмотрена на редколлегии 09.12.2016

ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОВИМІРНОЇ АНАЛІТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЖЕРЕЛА ЗАВАД У ДИСКРЕТНИХ КАНАЛАХ З'В'ЯЗКУ

М. Ф. Логвиненко, В. В. Торяник, А. О. Конвісарова

Запропоновано методику перевірки адекватності стохастичних моделей джерел завад у бінарних дискретних каналах електрозв'язку. Методику засновано на порівнянні теоретичних ймовірнісних характеристик дискретного каналу та відповідних статистичних оцінок цих характеристик. В якості основних оцінювальних показників обрано ймовірність помилки на біт, ймовірність прийому блоку визначеної довжини з помилками та з помилками фіксованої кратності. Виконано розрахунки чотирирівимірної моделі. Визначено співвідношення теоретичних і статистичних оцінок параметрів дискретного каналу.

Ключові слова: дискретний бінарний канал, джерело завад, стан джерела завад, ймовірнісні характеристики, вектор завад, ймовірність спотворення біта.

INVESTIGATION OF MULTIDIMENSIONAL ANALYTICAL MODEL OF SOURCE OF NOISE IN DISCRETE COMMUNICATION CHANNELS

N. F. Logvinenko, V. V. Toryanyk, A. O. Konvisarova

The method of checking the adequacy of the stochastic models of noise sources in binary discrete communication channels is suggested. The technique is based on a comparison of the theoretical probability characteristics of a discrete channel and corresponding statistical estimates of these characteristics. Bit error probability, average error-free interval length and probability of receiving a block of a certain length with errors and errors with fixed multiplicity were chosen as main indexes of estimated characteristics. The calculations for the four-dimensional model were performed. The ratios of theoretical and statistical estimates of the discrete channel parameters were determined.

Key words: discrete binary channel, error sources, error sources condition, probabilistic characteristics, error vector, error bit probability.

Логвиненко Николай Федорович – канд. техн. наук, доцент кафедри систем управління летательными аппаратами, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Торяник Владимир Владимирович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры систем управления летательными аппаратами, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: v.toryanyk@khai.edu.

Конвисарова Анастасия Олеговна – студент кафедри систем управління летательными аппаратами, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Logvynenko Nikolay Fedorovich – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Flying Objects Control Systems, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine.

Toryanyk Vladimir Vladimirovich – Candidate of Physical and Mathematical Science, Assistant Professor of Dept. of Flying Objects Control Systems, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: v.toryanyk@khai.edu.

Konvisarova Anastasiya Olegovna – student of Dept. of Flying Objects Control Systems, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine.