

МОДЕЛЮВАННЯ КАНАЛУ ГІЛБЕРТА–ЕЛІОТА У СИСТЕМІ ЗВ'ЯЗКУ CDMA2000 В УМОВАХ МІСЬКОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

© Вакула Ю.Я., 2014

Розглянуто основні переваги використання алгоритму Гілберта–Еліота для моделювання бітових помилок у каналі зв'язку в мобільних мережах стандарту CDMA2000. Подано характеристику основних чинників, що спричиняють появу бітових помилок, та шляхи їх подальшого математичного моделювання. Розроблено математичний апарат моделі станів для каналу зв'язку із "пакетом помилок" в середовищі програми MatLab 2013 R2. На основі проведених досліджень запропоновано модель зі значним вирашем ефективності порівняно із базовою версією.

Ключові слова: CDMA мережа, алгоритм Гілберта–Еліота, модель Релея, ймовірність бітової помилки BER, модель станів, скінченний автомат, MatLab.

Yu.Ya. Vakula

Lviv Polytechnic National University

CDMA2000 CHANNEL MODELING BASED ON THE GILBERT–ELLIOT ALGORITHM WITHIN URBAN INFRASTRUCTURE

© Vakula Yu. Ya., 2014

Any radio channel transferring information is a subject to data corruption. Especially it's important for 3G mobile networks that use high frequency carrier wave and significantly increased data rate in channel. In this case data loss prediction mechanism gives a lot of opportunities for new network designing as well as for existed network improvement. Statistically a communication channel with error processes can be modelled regarding to one of the predefined patterns which describe particular environment influence on measured parameters of transferred data with a sufficient accuracy. Also some kind of improved models with memory can be implemented for channels where digital packet data are carried. In this paper the main advantages of Gilbert-Elliott algorithm for bit errors simulation in communication channel of cdma2000 mobile network are described. This algorithm is widely used in simulation development of data. The Gilbert-Elliott model is a simple binary case of finite state Markov channel with two states marked as "good" (G) and "bad" (B) states. Each of the states may generate errors with its own error rate e_G and e_B , respectively. As result it is a binary symmetric channel (BSC) with transition probabilities q to switch over from "good" state to "bad" state and p for reverse transition. The article shows that it's possible to display error grouping in packets only if transition probability is much smaller than probability to stay in the same state. Otherwise errors occurring will be observed in random ordering. Error possibility in current state depends on the previous state. In that way the channel gets the memory feature. Few external factors can cause data corruption in radio channel of cdma2000 radio system. They are occurred as result of user movement, multi-path propagation, interaction with large obstacles, interaction with other sources of radio waves or noises, etc. It's free space loss, slow fading, fast fading, interference and noise. Review of these factors that cause bit error occurrence and ways to further mathematical modelling are given. CDMA

system involves a lot of recently developed accomplishments in radio engineering and telecommunication areas. It's the results of impressive improvement of technical characteristics and software acceleration, which moved today cellular systems to absolutely new performance level. But in the same time it requires a professional solution to develop high quality data models. As result a mathematical model of state machine for communication channel with errors burst is developed with MatLab 2013 R2b environment. Simple version of developed model provides good statistical data. But it requires few calculations per each bit of data. It causes a low system performance. Based on the investigation a model with significant performance improvement in comparison with the basic version of model is given.

Key words: CDMA network, Gilbert-Elliot algorithm, Rayleigh model, bit error rate BER, state model, state machine, MatLab.

Вступ. Мобільні мережі третього покоління 3G залишаються найпоширенішими технологіями, що забезпечують радіодоступ до мультимедійних даних та сервісів. Для таких технологій моделювання каналу зв'язку є надзвичайно важливим завданням. Адже радіоканали мереж 3G належать до найуразливіших середовищ передачі даних. А точний розрахунок каналу зв'язку є основним завданням для забезпечення життєздатності мережі мобільного зв'язку, що здатна обслуговувати абонентів та функціонувати в моменти пікового навантаження.

Існує значна кількість чинників, що спричиняють появу бітової помилки в радіоканалі, втрати внаслідок поширення радіохвилі, наявності перешкод чи сторонніх джерел шумів, руху тощо. Поєднання математичних моделей цих чинників дає змогу з достатньо високою точністю відтворити вплив заданого середовища на канал зв'язку та отримати необхідні параметри, що необхідні для функціонування радіоканалу.

Основна кількість споживачів цих послуг – в місцях великих скупчень людей – в містах. Розвиток інфраструктури міста і насиченість електронними приладами, що є джерелами сторонніх електромагнітних хвиль, в рази збільшує ступінь впливу чинників середовища на якість передачі даних в каналі мобільних мереж. Подекуди це робить розрахунок оптимальних параметрів мережі мобільного зв'язку практично неможливим. Саме тому цей сценарій є цінним для моделювання та дослідження.

Із теоретичних джерел відомо, що радіоканал схильний до помилок із нестационарними характеристиками появи помилки. Ймовірність бітової помилки понад 10^{-3} спричиняє надсилання відомостей про нестабільну роботу системи мобільного зв'язку. Для моделювання радіоканалу із такими характеристиками широко використовується алгоритм Гілберта–Еліота. Він реалізовує ланцюг Маркова із двома станами та дозволяє відобразити пульсуючу природу радіоканалу. Для розрахунку параметрів цієї моделі найдоцільніше використати канал із затуханням Релея (Rayleigh Fading Channel). Використання каналу із затуханням Релея доцільне, коли відстань між передавачем і приймачем невелика й існує декілька шляхів поширення радіохвилі, окрім поширення в межах прямої видимості із незначним коефіцієнтом поглинання для відбитих радіохвиль. Саме такі характеристики притаманні радіосигналам, що поширюються в межах міської інфраструктури.

Алгоритм Гілберта–Еліота. У будь-якому радіоканалі, що передає інформацію, можливе пошкодження даних. Згідно зі статистикою комунікаційний канал із наявністю помилок може бути змодельованим відповідно до однієї із моделей передачі даних із відповідною точністю для того чи іншого випадку. Також для деяких каналів із цифровою інформацією може бути доцільним використання моделей каналу із пам'яттю.

У цій статті розглядається модель Гілберта–Еліота [1]. Цей алгоритм широко використовується у симуляції радіоканалів та дозволяє зобразити пульсуючу природу реального каналу передачі даних. Це відбувається за рахунок появи “пакета помилок” – значно більшої кількості помилок протягом деякого періоду порівняно зі звичайним режимом роботи мережі.

Модель Гілберта–Еліота є спрощеним двійковим випадком каналу Маркова із двома станами [2]. Зазвичай їх позначають як “хороший” (G) і “поганий” (B) стани. Кожен зі станів може

генерувати бітові помилки із власною ймовірністю бітової помилки e_G та e_B відповідно. Як результат отримуємо двійковий симетричний канал (BSC) із ймовірністю переходу q для переміщення із “хорошого” стану до “поганого” та p для переходу із “поганого” стану до “хорошого”. Але поєднання помилок у “пакет помилок” можливе, лише якщо ймовірність переходу значно менша за ймовірність перебування у тому самому стані. Інакше поява помилок буде спостерігатись у випадковій послідовності. Тут поява помилки у поточному стані прямо залежить від попереднього стану. Так канал перетворюється на канал із пам'яттю. Модель такого каналу зображена на рис. 1.

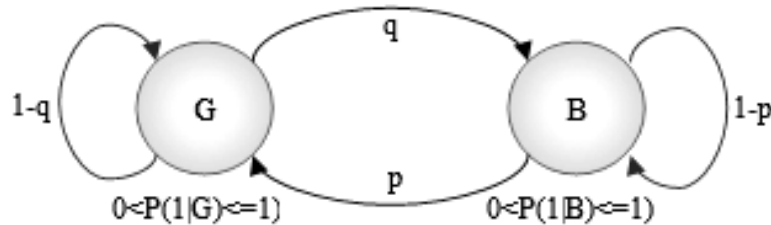


Рис. 1. Модель станів Гілберта–Еліота

Матрицю переходів P для такого каналу можна зобразити за допомогою двох переходів.

$$P = \begin{bmatrix} 1-q & q \\ p & 1-p \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Ймовірність перебування у тому самому стані може бути розрахована згідно із формулою:

$$p_g = \frac{p}{p+q}, p_b = \frac{q}{p+q}. \quad (2)$$

У цьому випадку ймовірність помилки залежить від чотирьох параметрів – двох ймовірностей із матриці P і перехресних ймовірностей e_G та e_B . Це можна зобразити так:

$$P_{err} = p_G \cdot e_G + p_B \cdot e_B, \quad (3)$$

На основі цього виразу можна вивести остаточну формулу для обчислення ймовірності помилки:

$$P_{err} = \frac{p \cdot e_G + q \cdot e_B}{q + p}. \quad (4)$$

Математична модель радіоканалу на основі алгоритму Гілберта–Еліота. У цій роботі розглянемо радіопередачу на несучій частоті 2100 МГц. Ця частота є найвищою частотою, що офіційно використовується стандартом CDMA2000. Вибір цієї частоти є доцільним для міської забудови, оскільки забезпечує зменшення розміру комірок мережі (збільшення кількості користувачів у системі) та покращує властивості поширення радіохвиль за наявності перешкод. Сигнал модульовано за допомогою двійкової фазової модуляції (BPSK), що використовується в CDMA2000 1X EV-DO. Процес появи помилок в такому каналі спричинений декількома феноменами:

Затухання у вільному просторі, спричинене зниженням потужності сигналу між приймачем та передавачем сигналу відповідно до такої формули:

$$P_{np} = P_{np} \cdot x \cdot d^{-\alpha}, \quad (5)$$

де P_{np} – потужність приймача, $P_{пер}$ – потужність передавача, d – відстань між передавачем і приймачем, ξ – константа, що залежить від технологічних особливостей, α – зазвичай варіює між $\alpha=2$ у кращому випадку та $\alpha=5$ у гіршому випадку.

- Швидке завмирання, спричинене рухливістю абонента та багатошляховим поширенням. Зазвичай воно відбувається, коли час когерентності каналу малий порівняно із часом затримки у каналі. За таких умов амплітуда і фаза сигналу в каналі суттєво змінюється протягом періоду передачі.

- Повільне завмирання внаслідок руху поруч із перешкодами значних розмірів, такими як пагорби чи великі будівлі, що затіняють основний шлях сигналу між передавачем і приймачем. Зазвичай воно відбувається, коли час когерентності каналу великий порівняно із часом затримки у каналі. За таких умов амплітуда і фаза сигналу в каналі залишаються порівняно сталими. А зміна потужності на вході приймача може бути зображена за допомогою логнормального розподілу.

- Інтерференція із радіохвилями інших мереж та електронних приладів.
- Шуми.

Мобільна мережа, що працює на такій частоті, використовує невеликі комірки. А отже, можна використати моделі загасання для невеликого масштабу. Існує ряд функцій розподілу, що використовуються для моделювання і дизайну радіосистем невеликого масштабу. Але найчастіше використовуються функції розподілу Релея та Райса. За цих умов доцільно використовувати функцію розподілу Релея, що використовується для моделювання радіоканалу, в якому передавач і приймач не є фіксованими, але змінюють своє розташування із незначною швидкістю, а частота Доплера є значно меншою і порівняно із швидкістю передачі символів; існує декілька шляхів поширення сигналу між передавачем і приймачем, причому шлях поширення сигналу, що переважає, відсутній.

На відміну від розподілу Релея, розподіл Райса передбачає наявність одного шляху поширення радіохвиль, що переважає, розподіл актуальніший для моделювання радіоканалу в місцевості із незначною забудовою (наприклад у сільській місцевості).

Для розрахунку параметрів каналу на основі функції розподілу Релея необхідно здійснити обчислення.

Позначимо відношення сигнал-шум (SNR) на вході приймача, що створюється внаслідок загасання Релея, як SNR_{rel} із функцією розподілу:

$$p_{rel}(SNR_{rel}) = \frac{1}{SNR_m} \cdot e^{\left(\frac{SNR_{rel}}{SNR_m}\right)}, \quad (6)$$

де SNR_m – середнє значення відношення сигнал-шум. Прийемо це значення відповідно до статистичної інформації $SNR_m = 20.5$ дБ.

Позначимо частоту Доплера як

$$f_d = \frac{v}{l}, \quad (7)$$

де v – швидкість руху мобільної станції, $\lambda = 0.143$ м – довжина хвилі для заданої частоти.

Тоді кількість разів протягом однієї секунди, коли рівень сигнал-шум нижчий від заданого рівня SNR_{rel} , а отже, відбувається пошкодження двійкової інформації, можна визначити за допомогою такої формули:

$$N_{SNR} = \sqrt{\frac{2 \cdot p \cdot SNR_{rel}}{SNR_m}} \cdot f_d \cdot e^{\left(\frac{SNR_{rel}}{SNR_m}\right)}, \quad (8)$$

Позначимо ймовірність p_k як:

$$p_k = e^{\left(\frac{SNR_k}{SNR_m}\right)} - e^{\left(\frac{SNR_{k+1}}{SNR_m}\right)}, \quad (9)$$

А перейшовши до інтегрального вигляду, можемо вивести ймовірність помилки в поточному стані:

$$F(SNR_{rel}) = \int_{-\infty}^{SNR_{rel}} \sqrt{\frac{1}{2 \cdot p}} \cdot e^{\left(\frac{-x^2}{2}\right)} dx, \quad (10)$$

$$e_k = \frac{\int_{SNR_k}^{SNR_{k+1}} \frac{1}{SNR_m} \cdot e^{\left(\frac{-x}{SNR_m}\right)} \cdot (1 - F(\sqrt{2x})) dx}{\int_{SNR_k}^{SNR_{k+1}} \frac{1}{SNR_m} \cdot e^{\left(\frac{-x}{SNR_m}\right)} dx} = \frac{d_k - d_{k+1}}{p_k}, \quad (11)$$

де

$$d_k = e^{\left(\frac{SNR_k}{SNR_m}\right)} \cdot (1 - F(\sqrt{2SNR_k})) + \sqrt{\frac{SNR_m}{1 + SNR_m}} \cdot F\left(\sqrt{\frac{2SNR_k(1 + SNR_m)}{SNR_m}}\right), \quad (12)$$

Такий математичний апарат дає змогу створити імітаційну модель каналу зв'язку. Для цього необхідно виконати такі математичні операції відповідно до швидкості передавання даних:

1. Провести експеримент, щоб на основі наведеного математичного апарату та відношення сигнал-шум для заданого стану визначити, чи цей біт пошкоджений. В разі пошкодження додати інформацію до статистичних даних.
2. Провести експеримент для визначення наступного стану моделі Гілберта–Еліота. В результаті зміни стану змінити значення параметрів моделі на актуальні для поточного стану.

Програмна реалізація радіоканалу. Подальше моделювання здійснено за допомогою програмного середовища MatLab 2013 R2b. Передумовою використання цього програмного продукту стала наявність значної кількості моделей, що відтворюють роботу фізичних рівнів провідних радіостандартів. Важливою особливістю є і те, що MatLab підтримує можливість подальшої модифікації вбудованих моделей. Як базову модель для подальшої розробки використано імітаційну модель CDMA2000 1xRTT. Модифікація каналу зв'язку цієї моделі дозволила отримати статистичні результати із доволі високою точністю. Для інтеграції моделі каналу зв'язку із моделлю Гілберта–Еліота необхідно використати додатковий рівень інтеграції. Шлюзом, що здатний поєднати ці складові в середовищі MatLab, є компонента StateFlow – програмне середовище для моделювання комбінаторної та послідовної логіки на основі скінченних автоматів та діаграм потоків. Підхід до об'єднання блоків із бібліотеки Simulink із компонентами StateFlow зображено на рис. 2.

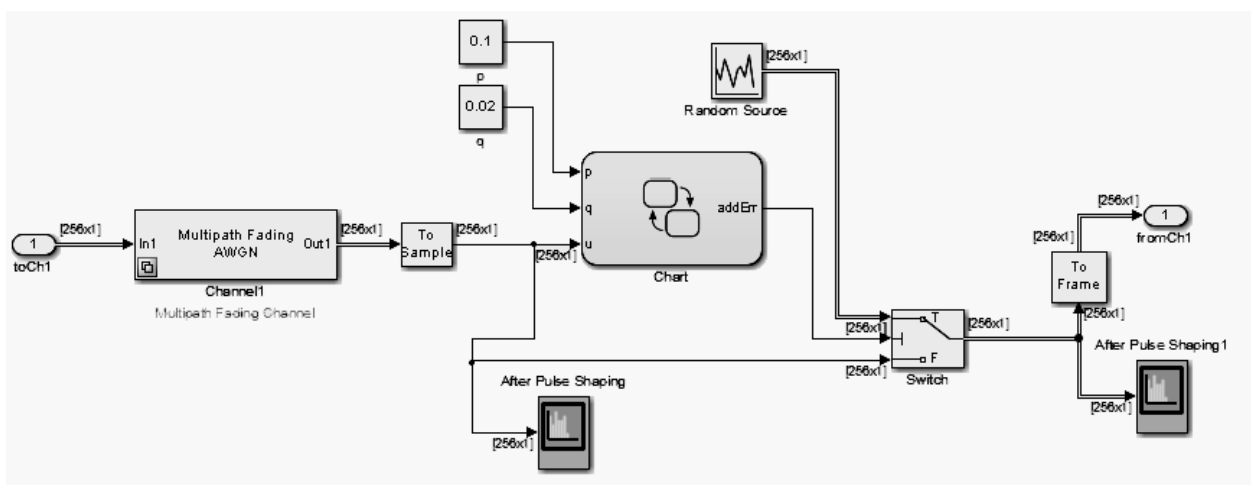


Рис. 2. Модель каналу Гілберта–Еліота в середовищі MatLab

Базову модель CDMA2000 підлагоджено відповідно до описаних вище параметрів мережі, що розміщена в межах міста. Узагальнювальну схему CDMA каналу із модифікованим каналом зв'язку зображено на рис. 3.

Модель Гілберта–Еліота розроблена у вигляді скінченного автомата із двома станами – “хорошим” і “поганим”. Для кожного зі станів на основі наведеного вище математичного апарату проводяться два експерименти Бернуллі для визначення помилковості поточного біта та визначення наступного стану моделі. Остаточний вигляд програмної реалізації моделі Гілберта–Еліота зображено на рис. 4.

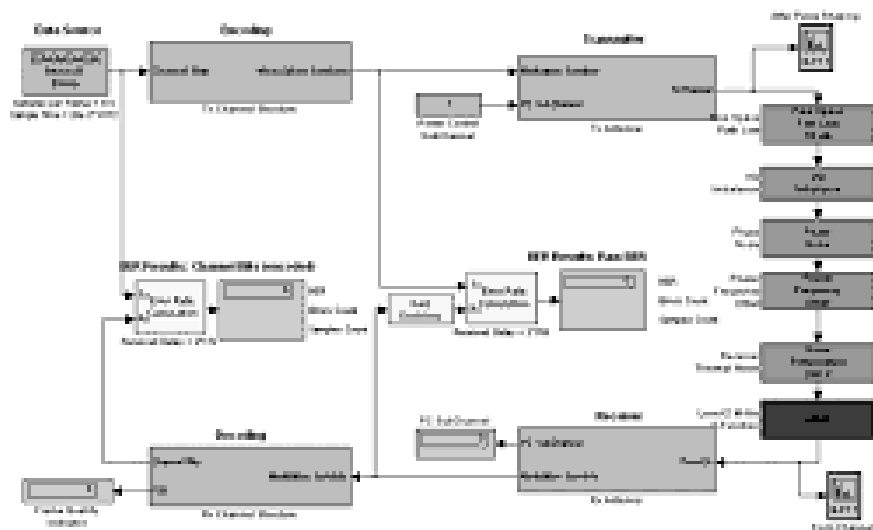


Рис. 3. Модель CDMA2000 1xRTT в середовищі MatLab

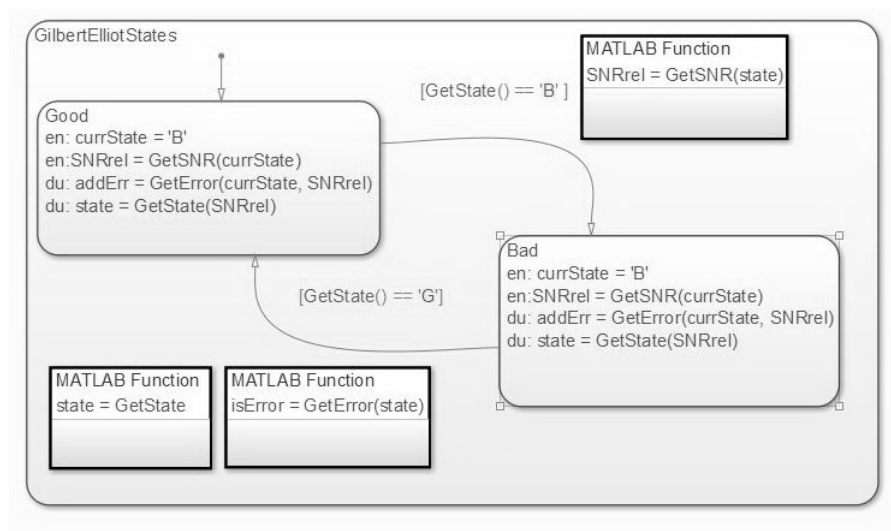


Рис. 4. Програмна реалізація моделі Гілберта–Еліота

Статистичні дані щодо ймовірності бітової помилки відносно кількості інформаційних символів зображено на рис. 5. Стрімкі зміни кривої на графіку спричинені появою “пакетів” помилок, що виникають внаслідок використання моделі Гілберта–Еліота.

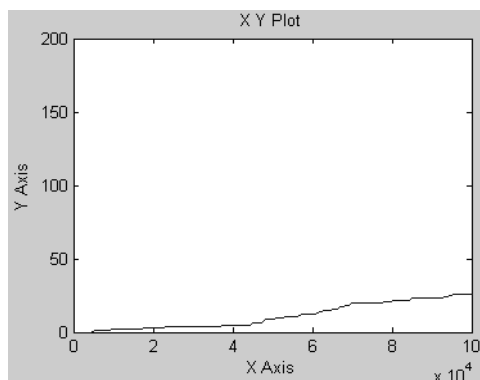


Рис. 5. Залежність кількості бітових помилок від кількості інформаційних символів

Недоліком цієї програмної реалізації є необхідність в наявності значних обчислювальних ресурсів. Для кожного біта інформації, що передається, необхідно здійснити декілька громіздких обчислень, щоб визначити наступний стан та підтвердити неушкодженість поточного біта. Суттєвого покращення швидкодії можна досягнути переходом від моделювання бітової інформації до моделювання пакетної інформації, але тоді достовірність моделювання погіршується в рази. Адже моделювання пакетних даних ігнорує такі властивості каналу, як кодування, структура пакетів та інші. Для значного підвищення швидкодії системи зі збереженням базової точності можна перейти до використання прогнозованих даних, отриманих в результаті

попередньої генерації. Так, для кожного біта необхідно здійснити два статистичні експерименти. Статистичний експеримент для визначення наступного стану легко спрогнозувати, використовуючи звичайний геометричний розподіл ймовірностей. В MatLab існує розроблена функція для спрощення таких обчислень

$$R = \text{geornd}(P,[m,n,...])$$

Подібне удосконалення можна здійснити і для статистичного експерименту для визначення пошкодження поточного біта. В такому випадку функція розподілу ймовірностей відповідає біноміальному розподілу. В MatLab для цього існує така функція

$$R = \text{binornd}(N,P,[m,n,...])$$

На основі цих розподілів можна отримати масиви статистичних даних, що використовуватимуться в подальшому моделюванні. Такі обчислення потребують значно менших обчислювальних ресурсів.

Висновки. Поява радіомереж третього покоління 3G надає користувачам істотні переваги порівняно зі стандартами другого покоління. Але внаслідок використання радіоканалу для передавання високошвидкісних даних характерною є поява численних пошкоджень інформаційних бітів. Проте точний підбір параметрів на етапі планування чи модернізації мережі дає змогу забезпечити стабільну роботу мережі в тому чи іншому середовищі, незважаючи на помилки в радіоканалі. А неточності визначення параметрів мережі можуть стати передумовою до катастрофічних наслідків. Вони можуть спричинити значне підвищення вартості розгортання та підтримки мережі стандарту CDMA2000, а також призвести до повної неспроможності обслуговувати абонентів мережі.

Аналіз показує, що алгоритм Гілберта–Еліота може збільшити точність моделювання втрат даних у каналі CDMA2000 та наблизити модель до реальних статистичних характеристик, а отже, дає змогу максимально точно визначити значення параметрів мережі відповідно до оптимальних для роботи в певній інфраструктурі. Оскільки ця модель належить до моделей з пам'яттю, то це дозволяє змоделювати пульсуючу природу реальної мережі та перейти від класичних функцій розподілу до реалістичніших даних.

Незважаючи на необхідність такого моделювання, ця модель потребує значних обчислювальних ресурсів для здійснення ряду розрахунків над кожним бітом двійкової інформації. Швидкість виконання таких обчислень в десятки разів відрізняється від необхідної для моделювання інформаційного каналу в реальному часі. Тому запропоновано способи удосконалення продуктивності обчислень. Результати моделювання удосконаленої моделі забезпечили значні покращення швидкодії за незмінних характеристик каналу зв'язку.

1. Elliott E. O. *Estimates of error rates for codes on burst-noise channels* // Bell-System, Tech. J, vol.42, Sept 1963, pp. 1977 – 1997. 2. Ebert Jean-Pierre, Willig Andreas A *Gilbert-Elliott Bit Error Model and the Efficient Use in Packet Level Simulation* // TKN Tech Reports Series, Berlin, 1999, pp. 1 – 40. 3. Finaev V. I. *Signals processing and transmission in remote management* // Textbook. Taganrog TSURE 2003. 123 p., pp. 18–24. 4. Sergienko A.B. *Digital signals processing* // SPB: Piter, 2003. – 604 p., pp. 508 – 574. 5. *Stateflow and Stateflow Coder User's Guide*, Copyright 1997 – 2003 by The MathWorks, Inc., pp. 35–58. 6. Fabio Belloni *Fading Models* // S-72.333 POSTGRADUATE COURSE IN RADIO COMMUNICATIONS, Milan, AUTUMN 2004, pp. 1 – 4. 7. Michel C. Jeruchim, Philip Balaban, K. Sam Shanmugan, *Simulation of Communication Systems: Modeling, Methodology and Techniques*. Second Edition, New York, Kluwer Academic / Plenum, 2000. – 907 p., pp.182 – 201.