

В.С. Хандецький, Г.В. Полухін, І.А. Скуратовський

КОНВЕЄРНА ПЕРЕДАЧА БЛОКІВ ФРЕЙМІВ В ЗАШУМЛЕНИХ КАНАЛАХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ

Анотація. Визначено залежність загальної кількості переданих фреймів n від об'єму додатку, довжини вікна і імовірності його успішної передачі. При невеликому рівні помилок $BER=5 \cdot 10^{-7}$ і використанні вікна з $n=40$ кількість пошкоджених фреймів не перевищує 20%. При $BER=10^{-6}$ ця кількість дорівнює 40% і частина з них увійде до складу третього вікна. Щоб уникнути суттєвого зменшення смуги пропускання, потрібно обмежити довжину вікна до $n=6$ при $BER=5 \cdot 10^{-6}$ і $n=20$ при $BER=10^{-6}$.

Ключові слова: комп'ютерні мережі, передача фреймів, ковзне вікно, завади, бітові помилки.

Введення. Протоколи з очікуванням, в яких відправник посилає окремий фрейм і після чого очікує підтвердження від одержувача про успішний прийом цього фрейму є найбільш завадостійкими, але, у той же час, задають нижню межу швидкості передачі інформації в комп'ютерних мережах. Підвищення швидкодії досягається при використанні двонаправлених протоколів ковзного вікна.

В будь-який момент часу відправник працює з визначеним набором порядкових номерів фреймів, які йому дозволено посилати (вони попадають у вікно, що надсилається). Одержувач працює з приймаючим вікном, що містить фрейми, які йому дозволено прийняти. Ці вікна не обов'язково мають бути однаковими. В одних протоколах розміри вікон фіксуються, в інших вони можуть змінюватись в процесі передачі фреймів [1]. Вимога доставки фреймів мережевому рівню приймаючого вузла в тому ж порядку, в якому вони були одержані від мережевого рівня вузла, що передає, зберігається.

Вікно постійно містить перелік ще непідтверджених фреймів. Збільшення загальної швидкості передачі тут ґрунтується на тому, що навіть при затримці деяких підтверджень передача фреймів продовжується, з надією на те, що через деякий час ситуація зміниться і підтвердження навпаки будуть поступати з більшою швидкістю. Практична статистика виправдовує такі сподівання. Така технологія, коли в процесі передачі знаходиться визначена кількість фреймів, називається конвеєрною обробкою.

Так як фрейми, що знаходяться у вікні відправника можуть бути пошкоджені завадами в процесі передачі, то відправник повинен зберігати їх копії в пам'яті на випадок можливої повторної передачі.

При передаванні фреймів по ненадійному каналу (з завадами) виникає ряд серйозних проблем [2]. Коли пошкодження фрейму відбувається всередині вікна, копія пошкодженого фрейму може поступити одержувачу пізніше, чим надійде один чи декілька фреймів, що розташовані безпосередньо за пошкодженим. Але ж каналний рівень одержувача повинен передавати фрейми мережевому рівню в послідовному порядку. Тому на приймаючій стороні повинна використовуватись буферна пам'ять, кількість комірок в якій перевищує кількість фреймів у вікні, а також застосовуватись механізм сортування.

Найбільш часто на практиці застосовуються два базових підходи до виправлення помилок при конвеєрній обробці.

Перший спосіб називається поверненням на n . Він полягає в ігноруванні усіх фреймів, які передаються за помилковим. Для цих фреймів підтвердження не посилається. Якщо вікно відправника заповниться раніше, чим закінчиться час очікування підтвердження, конвеєр починає простоювати. Коли ж закінчиться час очікування у відправника, він почне передавати повторно відразу ж усі фрейми, які не одержали підтвердження, починаючи з пошкодженого фрейму. Такий підхід при значній інтенсивності завад приводить до втрати значної частини пропускну здатності каналу. При збільшенні вікна одержувача принципових змін тут не відбувається.

Інша загальна стратегія обробки помилок при конвеєрній передачі фреймів називається вибірковою повтором [3]. Вона полягає в тому, що одержувач зберігає в буферній пам'яті усі вірні фрейми, одержані ним після пошкодженого фрейму. При цьому пошкоджений фрейм відкидається. Після закінчення часу очікування підтвердження відправник відправляє копію тільки самого старого фрейму, на який не прийшло підтвердження. Якщо ця спроба вдалася, одержувач буде в змозі передати мережевому рівню накопичені фрейми в належному порядку. Вибірковий повтор часто потребує збільшення пам'яті для каналного рівня одержувача.

Кумулятивний тип підтвердження вважає, що якщо поступає підтвердження на фрейм n , то фрейми $(n-1)$, $(n-2)$ і так далі, тобто усі попередні фрейми, вважаються підтвердженими. Це знижує надійність роботи в каналах з завадами [4].

Як було указано вище, в процесі передачі фреймів даних в зашумлених каналах виникають проблеми, пов'язані з пошкодженням бітів даних завадами. Ці завади можуть мати внутрішню природу, обумовлену інтерференцією сигналів, що передаються в каналах мереж. Особливо це актуально в сучасних високошвидкісних мережах, технології передачі інформації в яких реалізують підвищення щільності сигналів, які передаються. Зовнішні завади в середовищі передачі даних виникають внаслідок дії різноманітних джерел випромінювання електромагнітної енергії, які можуть бути також створені штучно.

Постановка задачі. Дослідити процес конвеєрної передачі блоків фреймів інформації на каналному рівні в зашумлених каналах комп'ютерних мереж. Визначити залежність загальної кількості фреймів переданих успішно і пошкоджених при передачі від об'єму додатку, що передається, довжини вікна і імовірності його успішної пере-

дачі. Визначити обмеження на довжину вікон при різних рівнях інтенсивності бітових помилок.

Основна частина. При дослідженні механізмів передачі інформації в зашумленому середовищі найбільш часто використовують дискретний у часі Гаусовський канал без пам'яті. В такому каналі бітові помилки є незалежними і рівномірно розподіленими по розрядах інформації, що передається [5]. Нехай L та P_b позначають довжину фрейму та імовірність помилки в одному розряді фрейму (bit error rate - BER) відповідно. Тоді імовірність того, що фрейм довжини L буде успішно переданий, тобто переданий непошкодженим, дорівнює:

$$P_{FS} = (1 - P_{b1})(1 - P_{b2})(1 - P_{b3}) \dots (1 - P_{bL}) = (1 - P_b)^L, \quad (1)$$

де $P_{b1} = P_{b2} = P_{b3} = \dots = P_{bL} = P_b$.

Припустимо, що передача інформації здійснюється на каналному рівні комп'ютерної мережі з використанням ковзного вікна довжиною n фреймів. Розглянемо спочатку ситуацію, коли рівень шуму є невеликим – $BER = 5 \cdot 10^{-7}$. Довжину поля даних фрейму прийемо стандартною, відповідно до технології Ethernet вона дорівнює $L = 1,5 \text{ kB} = 12000 \text{ б}$. Заголовок фрейму складає 26 В, тобто приблизно 1,7% від довжини поля даних, тому в подальших розрахунках ми не будемо його приймати до уваги.

Імовірність успішної передачі ковзного вікна з n фреймами згідно формулі (1) дорівнює

$$P_{WS} = (1 - P_b)^{L \cdot n}. \quad (2)$$

Для $n=6$ $P_{WS} = 0,965$. При цьому $n \cdot P_{WS} = 5,79$, тобто в першому наближенні можна вважати, що усі 6 фреймів ковзного вікна успішно проходять до одержувача. Але існує, хоч і достатньо мала, але кінцева імовірність пошкодження фреймів вікна :

$$P_{WD} = 1 - P_{WS} = 0,035. \quad (3)$$

Відповідно до цього при передачі значної кількості фреймів достатньо об'ємного додатку деяка частина фреймів буде пошкоджена.

Розглянемо передачу додатку об'ємом в N_0 фреймів. Розіб'ємо цей додаток на блоки по n фреймів в кожному блоці. Тут розмір блоку співпадає з розміром вікна. Позначимо загальну кількість блоків фреймів, переданих успішно і пошкоджених при передачі як Q_{Σ} . Тоді

$$Q_{\Sigma} = \frac{N_0}{n} + \frac{N_0}{n} \cdot P_{WD} = \frac{N_0}{n} (2 - P_{WS}), \quad (4)$$

де імовірність успішної передачі блока фреймів, тобто фреймів в межах ковзного вікна, визначається формулою (2).

Після даного етапу передачі вікно зсувається на n фреймів, тобто на довжину блока. Пошкоджені в процесі передачі фрейми виявляються відправником або по закінченню тайм-ауту очікування підтвердження АСК, або при одержанні негативного підтвердження NAK. На другому етапі передачі ці пошкоджені фрейми включаються у наступний блок і доповнюються наступними послідовними за номерами фреймами передаваного додатку. Якщо інтенсивність завад є невеликою можна вважати, що другим етапом закінчується передавання пошкоджених на першому етапі фреймів, і після

цього етапу буде можливість розташувати усі фрейми першого блоку в послідовному (за номерами) порядку і відправити на каналний рівень одержувача.

Розглянемо цей процес більш докладно на прикладі. Припустимо, що додаток, який потрібно передати, має об'єм 1,5 МВ, довжина фрейму, як і раніше, – 1,5 кВ. Інтенсивність завад характеризується $BER=5 \cdot 10^{-7}, 10^{-6}, 5 \cdot 10^{-6}$. Довжина вікна змінюється від $n=6$ до $n=40$. Одержані дані представлені в таблиці 1.

Загальна кількість фреймів, переданих успішно і пошкоджених при передачі.

Таблиця 1

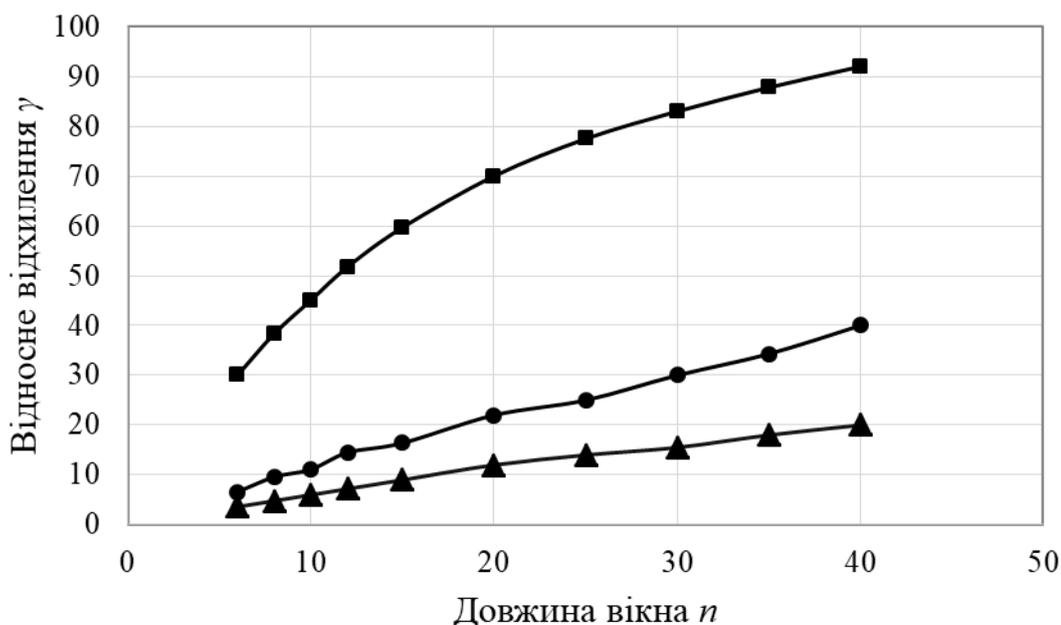
N	BER= $5 \cdot 10^{-7}$			BER= 10^{-6}			BER= $5 \cdot 10^{-6}$		
	P_s	N_0/n	Q_Σ	P_s	N_0/n	Q_Σ	P_s	N_0/n	Q_Σ
6	0,965	167	172	0,931	167	177	0,698	167	216
8	0,953	125	131	0,908	125	137	0,619	125	173
10	0,942	100	106	0,887	100	111	0,549	100	145
12	0,931	83	89	0,856	83	95	0,487	83	126
15	0,914	67	73	0,835	67	78	0,407	67	107
20	0,887	50	56	0,787	50	61	0,301	50	85
25	0,861	40	46	0,741	40	50	0,223	40	71
30	0,835	33	38	0,698	33	43	0,165	33	60
35	0,811	29	34	0,657	29	38	0,122	29	54
40	0,787	25	30	0,619	25	35	0,091	25	48

Як видно з табл.1 при збільшенні довжини вікна відносно відхилення між N_0/n і Q_Σ збільшується. Цей ефект суттєво підсилюється при збільшенні інтенсивності завад, тобто величини BER. Іншими словами, кількість повторних етапів пересилання вікон, необхідних для формування вірної (першочергової) послідовності фреймів збільшується, збільшуючи в свою чергу затримку передачі даних додатка. На рис.1 показані залежності відносного відхилення $\gamma=(Q_\Sigma-N_0/n)/N_0/n$ від довжини вікна n при різних значеннях BER.

Аналіз даних табл.1 і залежностей на рис.1 показує, що при збільшенні довжини вікна і інтенсивності завад (BER) кількість викривлених завадами фреймів, які необхідно передати на другому етапі при заповненні ковзного вікна наступним блоком фреймів, збільшується. Цей наступний блок містить як викривлені на першому етапі фрейми так і наступні за послідовністю фрейми, які передаються перший раз. При порівняно невеликому рівні помилок $BER=5 \cdot 10^{-7}$ навіть при великій довжині вікна $n=40$ кількість копій фреймів, що передаються у складі вікна на другому етапі не перевищує 20%.

При $BER=10^{-6}$ ця кількість вже складає 40% тобто не можна виключити, що частина з цих викривлених на першому етапі передачі фреймів буде повторно викривлена при передачі на другому етапі і увійде в склад третього вікна. Це приведе до помітного збільшення затримки, необхідної для формування вірної послідовності з 40 фреймів потоку, що поступила з мережевого рівня відправника на його каналний рівень.

При підвищеному рівні завад ($BER= 5 \cdot 10^{-6}$) ситуація суттєво погіршується, що відображається верхньою кривою на рис.1. Якщо при невеликому вікні з $n=8$ кількість викривлених на першому етапі передачі фреймів наближується до 40, то при $n=40$ вона вже складає 92%. При цьому існує суттєва імовірність використання третього і четвертого етапів передачі для формування необхідної послідовності фреймів. Щоб уникнути цього явища, яке суттєво зменшує смугу пропускання мережі, потрібно обмежити довжину вікна до $n=6$ при $BER= 5 \cdot 10^{-6}$ і $n=20$ при $BER=10^{-6}$.



Рисцнок 1 - Відносне збільшення загальної кількості фреймів γ від довжини вікна n : ▲ - $BER= 5 \cdot 10^{-7}$, ● - $BER=10^{-6}$, ■ - $BER= 5 \cdot 10^{-6}$.

Висновки. Досліджено процес конвєсрної передачі фреймів інформації на другому рівні в зашумлених каналах комп'ютерних мереж. В якості модельного застосовано гаусовський канал без пам'яті, в якому бітові помилки є незалежними і рівномірно розподіленими по розрядах інформації, що передається. Інтенсивність помилок відображається параметром BER (Bit Error Rate).

Передача інформації здійснюється за допомогою блоків фреймів, розмір блоків співпадає з розміром ковзного вікна. Визначено залежність загальної кількості фреймів переданих успішно і пошкоджених при передачі від об'єму додатку, що передається, довжини вікна і імовірності успішної передачі його блоку.

Показано, що при збільшенні довжини вікна і інтенсивності завад (BER) кількість викривлених завадами фреймів, які необхідно передати на другому етапі при заповненні ковзного вікна наступним блоком фреймів, збільшується.

При порівняно невеликому рівні помилок $BER= 5 \cdot 10^{-7}$ навіть при великій довжині вікна $n=40$ кількість копій фреймів, що передаються у складі вікна на другому етапі не перевищує 20%. При $BER=10^{-6}$ ця кількість вже складає 40% тобто частина з цих фреймів буде повторно викривлена при передачі на другому етапі і увійде в склад

третього вікна. Це приведе до збільшення часу, необхідного для формування послідовності фреймів що поступила з мережевого рівня відправника. При підвищеному рівні завад ($BER=5 \cdot 10^{-6}$) ситуація ще суттєво погіршується. Щоб не допустити суттєвого зменшення смуги пропускання мережі, потрібно обмежити довжину вікна до $n=6$ при $BER=5 \cdot 10^{-6}$ і $n=20$ при $BER=10^{-6}$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kurose, James F., Ross, Keith W. Computer Networking. A Top – Down Approach, 6th edition. New Jersey, Pearson Education, Inc. 2013. 889 P.
2. Khandetskyi, V.S., Karpenko, N.V. (2022). Modeling of IEEE 802.11 Computer Networks at Increased Interference Intensity. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. No. 2. P. 132-139.
3. Tanenbaum, A., Wetherall, D. Computer Networks, 5th edition. New Jersey, Pearson Prentice Hall. 2011. 960 P.
4. Khandetskyi V.S., Sivtsov D.P., Panin K.V. Data transfer rate in noisy channels of wireless networks. *System Technologies*. 2021. No.1 (132). P.136-144.
5. Cover T., Thomas J. Elements of Information Theory. John Wiley & Sons. 1991. 328 P.

REFERENCES

1. Kurose, James F., Ross, Keith W. Computer Networking. A Top – Down Approach, 6th edition. New Jersey, Pearson Education, Inc. 2013. 889 P.
2. Khandetskyi, V.S., Karpenko, N.V. (2022). Modeling of IEEE 802.11 Computer Networks at Increased Interference Intensity. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. No. 2. P. 132-139.
3. Tanenbaum, A., Wetherall, D. Computer Networks, 5th edition. New Jersey, Pearson Prentice Hall. 2011. 960 P.
4. Khandetskyi V.S., Sivtsov D.P., Panin K.V. Data transfer rate in noisy channels of wireless networks. *System Technologies*. 2021. No.1 (132). P.136-144.
5. Cover T., Thomas J. Elements of Information Theory. John Wiley & Sons. 1991. 328 P.

Received 12.01.2026.
Accepted 15.01.2026.

The pipeline transmission of frame blocks in noisy computer channels

The process of pipeline transmission of information frames at the second level in noisy channels of computer networks has been studied. As a model, we use a Gaussian memoryless channel, in which bit errors are independent and uniformly distributed over the bits of the transmitted information. The error intensity is reflected by the BER (Bit Error Rate) parameter. Information is transmitted using frame blocks, the size of the blocks coincides with the size of the sliding window. The dependence of the total number of frames transmitted successfully and damaged during transmission on the volume of the transmitted application, the length of the window and the probability of its successful transmission has been determined. Analysis of the obtained data shows that with increasing window length and interference intensity (BER), the number of frames distorted at the first stage of transmission increases. The distorted frames must be transmitted at the second stage when filling the sliding window with the next block of frames. This next block contains both the frames distorted at the first stage

and the frames following in sequence, which are transmitted for the first time. It is shown that with a relatively small error rate $BER=5 \cdot 10^{-7}$ and the use of the window contained $n=40$ standard frames, the number of copies of damaged frames transmitted as part of the window at the second stage does not exceed 20%. At $BER=10^{-6}$ this number is already 40%, i.e. some of these frames will be re-distorted during transmission at the second stage and will be included in the third window. This will lead to an increase in the time required to form the same sequence of frames that arrived from the third network layer. At higher interference levels ($BER=5 \cdot 10^{-6}$), the situation worsens significantly. If, with a small window of $n=8$, the number of frames distorted at the first stage of transmission approaches 40, then at $n=40$ it is already 92%. In this case, there is a significant probability of using the third and fourth stages of transmission to form the required sequence of frames. To avoid a significant reduction in network throughput, it is necessary to limit the window length to $n=6$ at $BER=5 \cdot 10^{-6}$ and $n=20$ at $BER=10^{-6}$.

Хандецький Володимир Сергійович – д.т.н., професор, зав. кафедри електронних обчислювальних машин Дніпровського національного університету ім. Олесь Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6386-4637>

Полухін Геннадій Володимирович – ст. викл., зав. лабораторії кафедри електронних обчислювальних машин Дніпровського національного університету ім. Олесь Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4705-6105>

Скуратовський Ігор Анатолійович – к.ф.-м.н., доцент кафедри електронних обчислювальних машин Дніпровського національного університету ім. Олесь Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9444-5988>

Khandetskyi Volodymyr Sergievich – Doctor of Sciences, Professor, Head of Computer Systems Department of the Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6386-4637>

Polukhin Gennadiy Volodymyrovich – Senior Lecturer, Head of Laboratory of Computer Systems Department of the Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4705-6105>

Skuratovskyi Ihor Anatoliyovych - candidate of physical and mathematical sciences, docent of Computer Systems Department of the Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9444-5988>