

УДК 621.391:519.72 + 004.942

Ю. Ю. Іванов¹**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ
ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ТУРБО-КОДІВ: ЧИСЛОВІ ОЦІНКИ
ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НОВОГО
СУБОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМУ PL-LOG-MAP**¹Вінницький національний технічний університет

Показано перспективність турбо-кодів у каналах з низькою енергетикою. Проаналізовано імітаційну модель системи передавання цифрових даних з турбо-кодеком. Проведено імітаційне моделювання характеристик завадостійкості для системи з турбо-кодеком та новим субоптимальним алгоритмом декодування PL-log-MAP. Встановлено та проаналізовано експериментальну функціональну залежність $BER = f(E_b/N_0)$ для мультимедійної інформації.

Ключові слова: завадостійке кодування, турбо-код, ітеративне декодування, MAP, log-MAP, PL-log-MAP, SOVA, Bi-SOVA, імітаційне моделювання, BER, програмовані комп'ютерні системи зв'язку.

Вступ

Одним із основних та найперспективніших напрямів у розвитку теорії завадостійкого кодування є захист інформації на основі паралельних каскадних конструкцій згорткових кодів, або турбо-кодів. Термін «турбо» та математичний апарат для турбо-коду вперше запропонований у фундаментальній праці [1], в якій показано результати досягнення $BER = 10^{-5}$ зі швидкістю кодування $R = 0,5$, двійкова фазова модуляція (BPSK — binary-phase shift keying) в каналі з адитивним білим гаусівським шумом (AWGN — additive white Gaussian noise) за відношення енергії біта E_b до спектральної щільності потужності шуму N_0 на рівні 0,7 дБ. Таким чином, турбо-код виявляється найефективнішим методом роботи з інформацією в каналах з низькою енергетикою. Оскільки сучасні технічні можливості вийшли на новий рівень розвитку та дозволяють застосовувати складні обчислювальні алгоритми, які забезпечують високий ступінь виправлення помилок, то результати оригінальної роботи [1] дали потужний поштовх дослідникам для виконання детальних досліджень в області турбо-декодування. Алгоритми турбо-декодування застосовуються в разі використання демодулятора з м'якими рішеннями на вході, що дозволяє досягти максимально можливого енергетичного виграшу від декодування. Слід зазначити, що з переходом до ітеративних процедур оброблення інформації турбо-декодер за своїми характеристиками максимально наближається до відомої із загальної теорії зв'язку межі С. Е. Shannon. Всі алгоритми декодування турбо-подібних кодів можна інтерпретувати як реалізацію техніки, відомої як обмінні ймовірнісні алгоритми (MPA — message passing algorithms) або алгоритм з розповсюдженням довіри (BPA — belief propagation algorithm). Для опису стратегії, яка втілена в ітеративному декодуванні турбо-кодів, німецький вчений J. Hagenauer ввів поняття «турбо»-принципу [2]. Турбо-коди з ймовірнісними алгоритмами декодування дозволяють здійснити високоефективне передавання даних практично в будь-якій системі зв'язку: телебаченні (DVB-RCS, DVB-RCT, DVB-SSP), телеметрії, бездротових локальних мережах (WiMAX), SDR системах (software defined radio — програмно визначених радіосистемах), мобільних (3G, 4G LTE, Inmarsat) і космічних (CCSDS) комунікаціях [3, 4].

Завдяки конструктивним особливостям турбо-коди дозволяють отримати кращі показники енергетичної ефективності для системи передавання даних. Вони можуть бути використані для зменшення необхідної потужності при передаванні даних із заданою швидкістю, що, безумовно, робить їх застосування перспективним. Важлива перевага турбо-коду — незалежність складності декодування від довжини інформаційного блоку, що дозволяє знизити частоту виникнення помилок (BER — bit error rate) шляхом збільшення довжини послідовності бітів. Недоліком турбо-

декодування є висока складність, що призводить до зниження швидкості оброблення інформації за рахунок збільшення кількості операцій декодування, які приходяться на один інформаційний символ. Загальним недоліком турбо-кодів є порівняно невелика кодова відстань d_f , що призводить до того, що за великої (малої) BER ефективність турбо-кодів висока (обмежена) [3, 5].

У роботі [6] розглянуті теоретичні залежності BER від відношення E_b/N_0 , як асимптоти кодової відстані для різних кодів та показано, що за високого показника BER = $10^{-5} \dots 10^{-7}$ (від 0 до 3 дБ), кращим з розглянутих кодів є турбо-код. Причому на високих значеннях BER цей код дозволяє досягти енергетичного виграшу близько 7...9 дБ. Оскільки відсутній адекватний математичний апарат, який дозволив би розрахувати практичні характеристики завадостійкості турбо-коду, то використовують комп'ютерне імітаційне моделювання. У працях [7—9] виконується моделювання характеристик завадостійкості турбо-коду в ході класичних експериментів зі зміною параметрів турбо-кодека в системі передавання цифрових даних, але не розглянуто порівняння ефективності різних алгоритмів турбо-декодування.

Метою роботи є проведення імітаційного моделювання процесу передавання даних в каналах з низькою енергетикою для дослідження важливих з інженерної точки зору експериментальних залежностей $BER = f(E_b/N_0)$ для турбо-коду з використанням розробленого нами в роботі [10] ітеративного алгоритму декодування PL-log-MAP для зниження обчислювальної складності без значного зниження якості декодування в ході розв'язання задач аналізу, синтезу та експлуатації програмованих розподілених комп'ютерних систем зв'язку різного функціонального призначення.

Опис моделі імітаційної системи передавання цифрових даних з турбо-кодеком

Класична імітаційна модель системи зв'язку, яка буде використовуватись для проведення моделювання показана на рис. 1 [8].

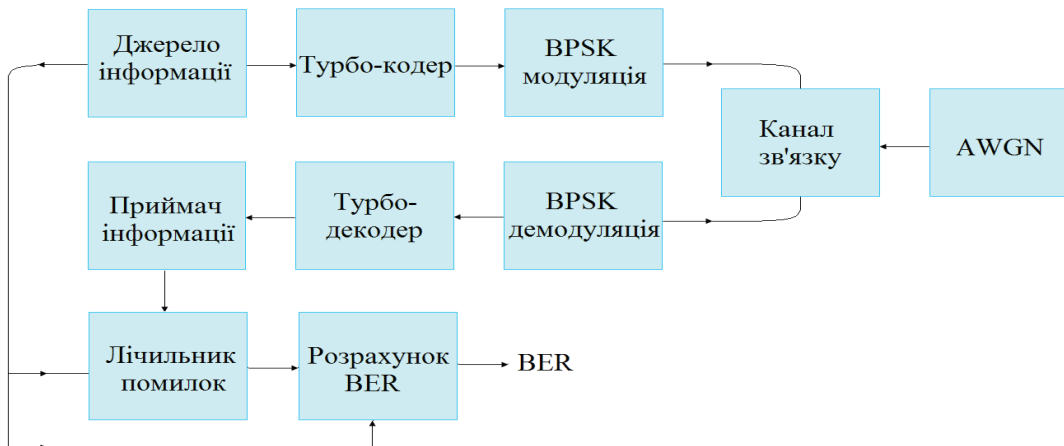


Рис. 1. Структурна схема системи передавання цифрових даних з турбо-кодеком для імітаційного моделювання

За *джерело інформації* використано генератор псевдовипадкових послідовностей (ГПП) з генерацією рівномірно розподілених випадкових величин за методом S. K. Park та K. W. Miller [11]. *Приймач інформації* отримує її декодовану версію, після чого *лічильник помилок* підраховує помилки в бітах за ідеальним теоретичним критерієм «магії джина» (magic GENIE) [12]. На виході схеми розраховується *коефіцієнт BER* у вигляді відношення помилок до загальної кількості бітів.

Головний принцип побудови *турбо-кодера* — використання двох паралельно працюючих компонентних рекурсивних систематичних згорткових (RSC — recursive systematic convolutional) кодерів. З виходу всього турбо-кодера без процедури перфорації на модулятор спочатку надходить біт з систематичного виходу верхнього кодера $d_{k,1}$, а потім два перевіірочних біти: спочатку з першого кодера $d_{k,2}$, потім — з другого $d_{k,3}$. Завдяки використанню RSC-кодерів в кодовому блоці можна явно виділити систематичну і перевіірочну частини. Більш того, можна вважати, що в канал зв'язку передаються два кодові блоки: перший блок, який складається з інформаційної частини $X = d_k$ і перевіірочної частини $d_{k,2}$ кодера 1, і другий кодовий блок, що складається з перемішаної інформаційної частини $\pi(d_k)$ і перевіірочної частини $d_{k,3}$ кодера 2 [3]. Формування послідовності бітів розміром q з виходу інтерлівера π у процесі моделювання підкоряється псевдовипадковому закону за методом ГПП, аналогічного тому, який використовується для джерела інформації.

Закінчення кодування інформаційного блока повинне відбуватися за нульових станах кодерів

(занулення, або термінація кодерів), оскільки численні результати моделювання показують істотну перевагу характеристик завадостійкості для турбо-кодів з такими параметрами [5].

У ході моделювання будемо використовувати *BPSK-модем* [3, 5]. Аналітичне моделювання більшої частини каналів передавання даних у теорії завадостійкого кодування припускає гаусівський розподіл завад *AWGN*, що означає статистичну незалежність потоку помилок за центральною граничною теоремою. Для реальних каналів зв'язку це припущення не завжди є правильним, оскільки помилки в таких системах мають виражену тенденцію до групування у пакети помилок. Подібне явище викликає труднощі під час декодування завадостійких кодів, але саме для їх подолання (декореляції інформаційної послідовності у часі), отримання квазівипадкових послідовностей та збільшення максимуму мінімальної відстані $\max(\min(d_i))$ використовується принцип інтерлівінгу [13]. У роботі [14] показано оптимальні алгоритми (наприклад, алгоритм Ziggurat), які допомагають генерувати випадкові значення шуму за нормальним законом розподілу ймовірностей у каналі з *AWGN*, не вимагаючи великих обчислювальних потужностей. Також для алгоритму декодування необхідно оцінити значення каналної інформації $LLR_{\text{кан}}$, яке в каналі з *AWGN* залежить від дисперсії шуму σ (рис. 2) [4]. На основі рис. 2 можна зробити висновок, що зі зменшенням E_b/N_0 значення σ збільшується, а $LLR_{\text{кан}}$ зменшується, тобто каналні показники слабо впливають на обмін апіорної та апостеріорної інформації з декодерів в зашумлених каналах, але їх дія посилюється в хороших каналах, тому за малих значень E_b/N_0 турбо-коди показують кращі результати.

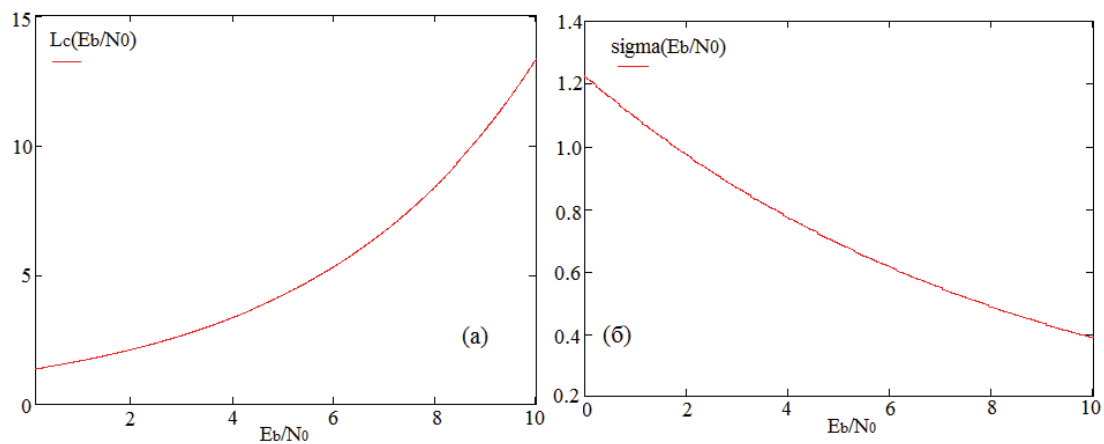


Рис. 2. Зміна значень $LLR_{\text{кан}}$ (а) та σ (б) залежно від E_b/N_0 (б), $R = 1/3$

Декодування турбо-коду здійснюється *ітеративним декодером*, компонентні декодери якого здійснюють імовірнісне декодування з використанням м'яких рішень. Під час декодування турбо-декодером із загального потоку даних виділяють два зашумлені кодові блоки $(x_k, x_{k,2})$ та $(x_k, x_{k,3})$, причому інформаційні частини цих двох блоків ідентичні (x_k) . Декодовану інформацію першого (другого) декодера $LLR_{\text{зовн.}}(d_k)$ (зовнішня інформація) з урахуванням перемішування π можна використовувати як апіорну інформацію $LLR_{\text{ап.}}(d_k)$ для другого (першого) декодера з метою уточнення результату декодування, тобто інформація обертається петлею до того моменту, поки м'які рішення не сходяться на стабільному наборі значень. Зазвичай під час першої ітерації дані вважаються рівноймовірними ($LLR_{\text{ап.}}(d_k) = 0$). У багаторазовому повторенні розглянутих операцій і полягає принцип ітеративного декодування. Надійність м'яких рішень d_k визначається їх абсолютним значенням $|LLR(d_k)|$, причому чим воно далі від нуля тим вища надійність. Відповідно знак $LLR(d_k)$ показує, яке жорстке рішення отримано на певному етапі ($\text{sign}(LLR(d_k)) > 0$, то $d_k = 1$, інакше $d_k = 0$) [3, 4].

На практиці розрахунок апостеріорного $LLR(d_k)$ відбувається із застосуванням алгоритмів декодування. Для знаходження максимально правдоподібної послідовності бітів використовуються алгоритм SOVA [4] та модифікація Bi-SOVA [15]. Оптимальним є алгоритм побітового декодування за максимумом апостеріорної імовірності MAP [3, 4] та його модифікації для зниження обчислювальної складності log-MAP та апроксимації max-log-MAP [4, 16], PL-log-MAP [10, 17] та інші. Декодери MAP показують кращу енергетичну ефективність, але складніші в реалізації, ніж SOVA декодери. У цій роботі для імітаційного моделювання автор застосував ефективний субоптимальний PL-log-MAP алгоритм [10, 17], який використовує кусково-лінійну апроксимацію коректуральної функції $f_{\text{кор}}$ у складі логарифму Якобіана для розрахунку метрик та м'яких рішень, а та-

кож дуже точно корелює з оригіналом ($r = 0,9994$). Основною зручністю запропонованої апроксимації є заміна компенсувальної функції іншою функціональною залежністю, значення якої дуже наближені до оригіналу, і яка має меншу обчислювальну складність, не використовуючи для обчислення складні функції (логарифм, сума експонент). Запропонований авторами у роботі [10] метод апроксимації коректувальної функції $f_{\text{кор}}$ є точнішим, ніж інші методи, такі як: дробова (на 0,11 %), квадратична (на 0,2 %), комбінована гібридна (на 0,37 %), таблиця пошуку Robertson-Wang (на 0,54 %), лінійна Зайцева (на 0,65 %), гібридна (на 0,69 %), лінійна (на 1,36 %), багатокрокова (на 2,44 %), лінійна з рядом С. MacLaurin (на 6,88 %), константна (на 11,78 %), — компенсувальні функції. Графічні порівняння та математичний аналіз запропонованої апроксимації подані у роботі [10].

Закінчення процесу декодування відбувається або після виконання заданої кількості ітераційних циклів (6...10 ітерацій), або після того, як величина результату декодування за певним критерієм зупинки досягне встановленого порогу (за зміною знаку $LLR_{\text{зовн}}(d_k)$, на основі м'яких та жорстких рішень; за зміною перехресної ентропії на основі відстані S. Kullback та R. Leibler; з розрахунком контрольної суми з використанням циклічного надлишкового коду тощо) [12].

Результати моделювання методом Монте-Карло для системи з турбо-кодеком

Подана імітаційна модель (рис. 1) піддається багатократним випробуванням з подальшим статистичним обробленням отриманих результатів для оцінювання параметрів досліджуваного процесу. На мові програмування для інженерних і математичних розрахунків M-language розроблено програмне забезпечення для дослідження характеристик завадостійкості турбо-коду [18, 19]. Вхідними даними є інформаційний блок довжиною $N = q - m$, параметри компонентних кодерів, проект інтерлівера, модель перфорації бітів, крок зміни значення E_b/N_0 , мінімальне та максимальне значення E_b/N_0 . Вихідні дані — послідовність бітів на виході декодера, значення BER залежно від E_b/N_0 .

Експеримент № 1. Досліджено роботу різних алгоритмів турбо-декодування: MAP, log-MAP, PL-log-MAP, SOVA та Bi-SOVA. Для цього запропоновано загальну модель експерименту: використано фрейми розміром 1024 біта, два компонентні RSC-кодери з генератором $(7,5)_8$, $R = 1/3$, псевдовипадковий інтерлівер, застосовано термінацію 1-го кодера за допомогою «хвостовика» з $m = 2$ бітів, BPSK модуляція, канал з AWGN, максимум 8 ітерацій декодування. Моделювання проведено від 0 до 3 дБ з кроком 0,25 дБ. Умовою закінчення процесу моделювання для кожного значення E_b/N_0 є число пакетів або кадрів, в яких наявні помилки у бітах (наприклад, 10 фреймів). Крім того, тривалість сеансу моделювання обмежено кількістю переданих бітів. Результати роботи цього експерименту показані на рис. 3.

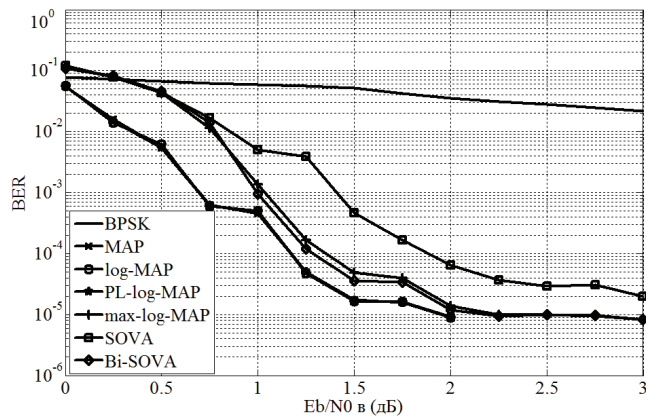


Рис. 3. Результати імітаційного моделювання методом Монте-Карло для експерименту № 1

Проаналізувавши показники BER для алгоритмів декодування MAP, log-MAP, PL-log-MAP, можна оцінити статистичні показники (MAE — середня абсолютна помилка, SSE — сума квадратів помилок, $RMSE$ — середня квадратична помилка, r — лінійний коефіцієнт кореляції К. Пірсона класичних алгоритмів (MAP та log-MAP) та розробленого нами PL-log-MAP алгоритму (табл.).

Числові оцінки для імітаційного моделювання методом Монте-Карло для алгоритмів декодування MAP, log-MAP, PL-log-MAP

Порівняння алгоритмів	MAE	SSE	$RMSE$	r
MAP / PL-log-MAP	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,8414 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-4}$	0,9997
log-MAP / PL-log-MAP	$2 \cdot 10^{-4}$	$2,8483 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-4}$	0,9998

Аналізуючи рис. 3 та табл., можна побачити, що PL-log-MAP алгоритм дозволяє досягнути значень BER оригінального log-MAP та MAP алгоритмів, але є простішим в обчислювальному плані, оскільки не застосовує складних для обчислення функцій, таких як логарифм та сума експоненціальних складових [10]. Відповідно розроблений алгоритм краще інших апроксимуючих алгоритмів на малих показниках E_b/N_0 , до яких log-MAP алгоритм досить чутливий. На великих значеннях

$E_b/N_0 > 3...4$ дБ показник BER не дуже залежить від коректувальної функції, тому значення точних алгоритмів наближаються до величин BER max-log-MAP алгоритму. Алгоритми MAP, log-MAP, PL-log-MAP максимально наближені один до одного та дають можливість отримати суттєвий енергетичний вигравш порівняно з SOVA (0,5...0,6 дБ в районі $BER = 10^{-3}...10^{-4}$ та близько 1,3 дБ для $BER = 10^{-5}$). Алгоритми типу MAP також дають вигравш порівняно з Bi-SOVA та max-log-MAP близько 0,1...0,7 дБ, поступово наближаючись до показників останнього. Також можна побачити, що алгоритм Bi-SOVA дещо краще (приблизно 0,06 дБ), ніж max-log-MAP на відрізку від 0,8 до 2,25 дБ (до цього max-log-MAP дещо кращий за Bi-SOVA), але загалом ці два алгоритми дуже близькі (майже однакові показники $BER \approx 8...9 \cdot 10^{-6}$ з 2,25 дБ). Наприклад, для Bi-SOVA на $E_b/N_0 = 2$ дБ показник $BER \approx 9,48 \cdot 10^{-6}$, а для max-log-MAP $BER \approx 10^{-5}$. Алгоритм SOVA дозволяє досягти енергетичного вигравшу порівняно з некодованою кривою BPSK, але програє іншим алгоритмам, наприклад, своїй модифікації Bi-SOVA та max-log-MAP близько 0,1...0,8 дБ, починаючи з величини $E_b/N_0 = 1$ дБ для $BER = 10^{-3}...10^{-4}$. Також на рис. 3 видно різкий спад («waterfall») в області низьких показників E_b/N_0 , але з ростом цієї величини поступово досягається «поріг помилок» («error floor»).

Експеримент № 2. Промодельовано роботу алгоритму PL-log-MAP залежно від різної кількості ітерацій декодування $Q = 1...8$. Результати цього дослідження показані у вигляді функції $BER = f(E_b/N_0)$ на рис. 4а, а рис. 4б відображає тривимірний графік залежності $BER = f(Q, E_b/N_0)$.

З рис. 4 можна побачити, що результат декодування за алгоритмом PL-log-MAP поліпшується зі збільшенням Q , покращуються також енергетичні характеристики. Наприклад, на 4 ітераціях роботи декодера $BER = 1,95 \cdot 10^{-5}$ (2 дБ), але практично це ж значення BER досягається на 7 ітераціях декодування на показнику $E_b/N_0 = 1,75$ дБ, тобто енергетичний вигравш від збільшення кількості ітерацій складає близько 0,25 дБ. Але зі збільшенням показника E_b/N_0 зменшується кількість ітерацій декодування, які потрібні для досягнення необхідної величини BER. Крім того, слід зазначити, що збільшення кількості ітерацій декодування більше 8 приводить до досить незначного енергетичного вигравшу при певній величині BER в межах моделювання до 1 дБ (близько 0,06 дБ), а в каналі з високою енергетикою ще менше (близько 0,01 дБ). Саме тому для всіх експериментів використовувався максимум з восьми ітерацій декодування.

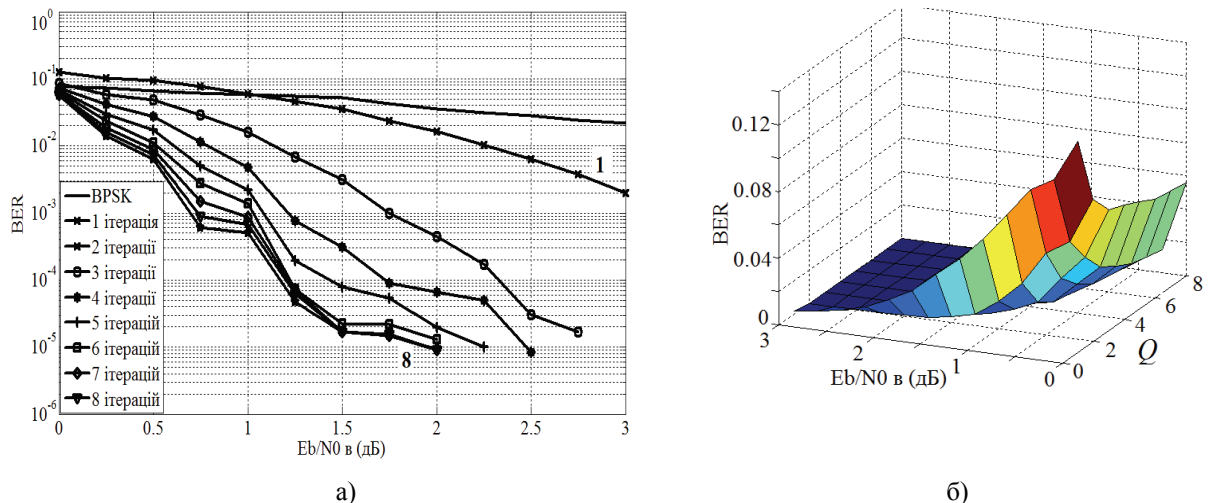


Рис. 4. Результати імітаційного моделювання методом Монте-Карло для експерименту № 2

Експеримент № 3. Досліджено роботу алгоритму PL-log-MAP залежно від різних швидкостей кодування, а саме 0,5 та 1/3. Результати виконання цього дослідження для 1, 4 та 8 ітерацій декодування, а також 256, 1024, 4096 бітів у фреймі показані на рис. 5а та 5б.

З рис. 5 робимо висновок, що як і з будь-яким кодером, результат роботи поліпшується зі збільшенням швидкості кодування R . Однак це зниження одночасно приводить до збільшення надлишковості. Зменшення швидкості кодування R дозволяє досягти енергетичного вигравшу в середньому 0,25 дБ для першої ітерації кодування; приблизно 0,5 дБ для 4-х ітерацій та для 8-ми ітерацій близько 0,75 дБ на рівні $BER \approx 1,4 \cdot 10^{-5}$ (рис. 5а). Якщо проаналізувати рис. 5б, то можна зробити висновок, що для пакету розміром 256 бітів енергетичний вигравш від застосування швидкості 1/3

порівняно з 0,5 складає близько 0,5 дБ; для пакету з 1024 бітів для $BER \approx 10^{-5} \dots 1$ дБ; для 4096 бітів при $BER \approx 4 \cdot 10^{-6} \dots 0,75$ дБ. На основі рис. 5б можна сказати, що за великих розмірів перемішування q можуть бути досягнуті менші значення BER, тобто існує вигреш від інтерлівера. Наприклад, для $R = 1/3$ та пакету з 4096 бітів величина $BER \approx 9,98 \cdot 10^{-6}$ досягається з показником $E_b/N_0 = 1$ дБ, а близьке значення $BER \approx 8,98 \cdot 10^{-6}$ для пакета з 1024 бітів виникає на 2 дБ (вигреш приблизно в 1 дБ), а для фрейму з 256 бітів відповідне $BER \approx 8,04 \cdot 10^{-6}$ на 3 дБ (вигреш близько 2 дБ).

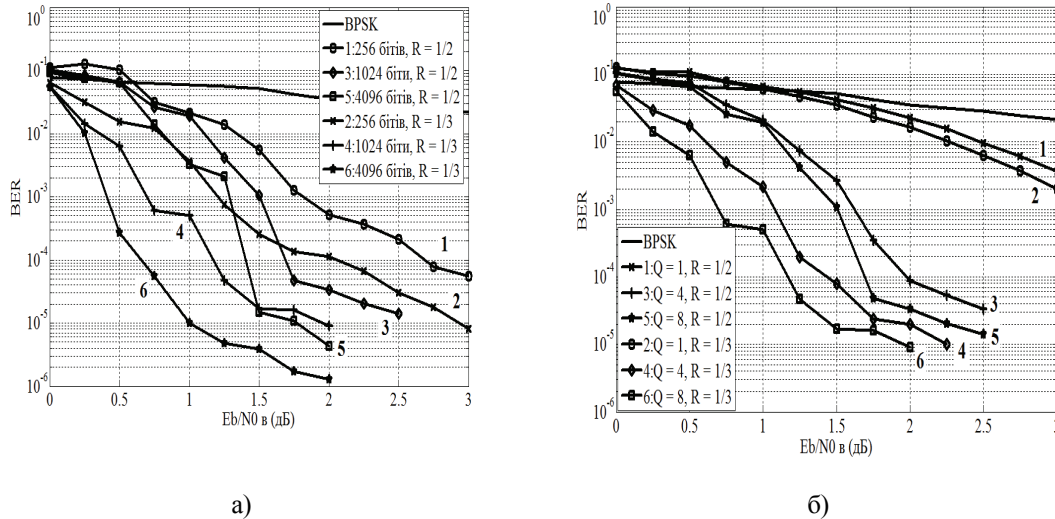


Рис. 5. Результати імітаційного моделювання методом Монте-Карло для експерименту № 3

Експеримент № 4. Досліджено роботу алгоритму PL-log-MAP для різної кількості комірок пам'яті кодера («хвостовики» $m = 3, 4, 5$) та різних генераторів коду ($(g_{зв}/g_{пр})_8$), а саме: $(7,5)_8$, $(15,17)_8$, $(37,21)_8$. Результати цього дослідження показані на рис. 6.

З аналізу рис. 6 бачимо, що характеристики роботи алгоритму PL-log-MAP покращуються зі збільшенням кількості комірок пам'яті m кодера. Отже, вибір згорткових кодів не тільки визначає складність реалізації декодерів, але впливає і на завадостійкість турбо-коду. В асимптотичній області кращим є турбо-код з більшою кількістю комірок пам'яті компонентного коду. Якщо розглянути показник $E_b/N_0 = 1$ дБ на рис. 6, то отримаємо, що в середньому вигреш від збільшення комірок пам'яті складає близько 0,25 дБ на величині $BER \approx 10^{-5}$.

Слід зазначити, що зі збільшенням кількості ітерацій декодування Q , бітів N у фреймі, кількості комірок пам'яті m кодера відбувається суттєве збільшення часових затримок, які пов'язані з обробкою інформації. Відповідно, щоб досягти кращої ефективності турбо-коду, потрібно багато часу, але оскільки швидкість передавання даних велика, то часова затримка може бути зроблена малою. Але для малих затримок робота турбо-коду все ще ефективніша від звичайних кодерів подібної складності [7—9].

Експеримент № 5. Виконано моделювання роботи турбо-кодека із застосуванням комп'ютерних зображень у середовищі Mathworks MatLab R2013a на показнику $E_b/N_0 = 1$ дБ. Для цього використано 3 зображення: (а — «lena.jpg» (кольорове) — модель Lena Soderberg, 768 фреймів, 4096 біти у пакеті; б — «VNTU.jpg» (білий фон) — модель Vinnytsia National Technical University, 681 фрейм, 3632 бітів у пакеті; в) «Emblem.jpg» (колір, білий фон, текст) — модель емблеми ВНТУ, 768 фреймів, 4096 бітів у пакеті), застосовано алгоритм декодування PL-log-MAP з 1, 4, 8 ітераціями декодування. Інші умови експерименту аналогічні умовам першого дослідження.

Експериментальні залежності показані на рис. 7а результати цього дослідження у мультимедійному вигляді показані на рис. 8, де у правому верхньому куті вказано кількість ітерацій декодування за

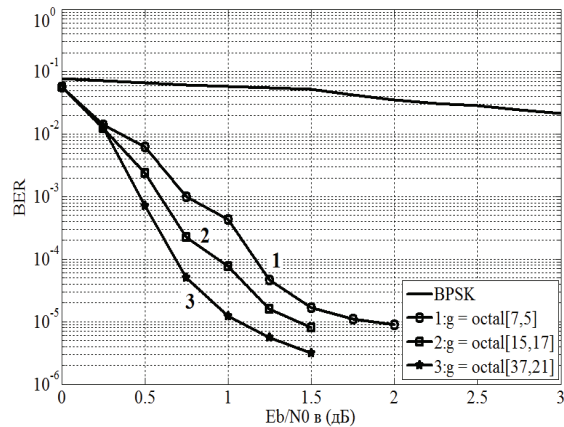


Рис. 6. Результати ІМ методом Монте-Карло для експерименту № 4

алгоритмом PL-log-MAP, знизу перша цифра вказує на кількість бітових, а цифра в дужках — на кількість символівних помилок.

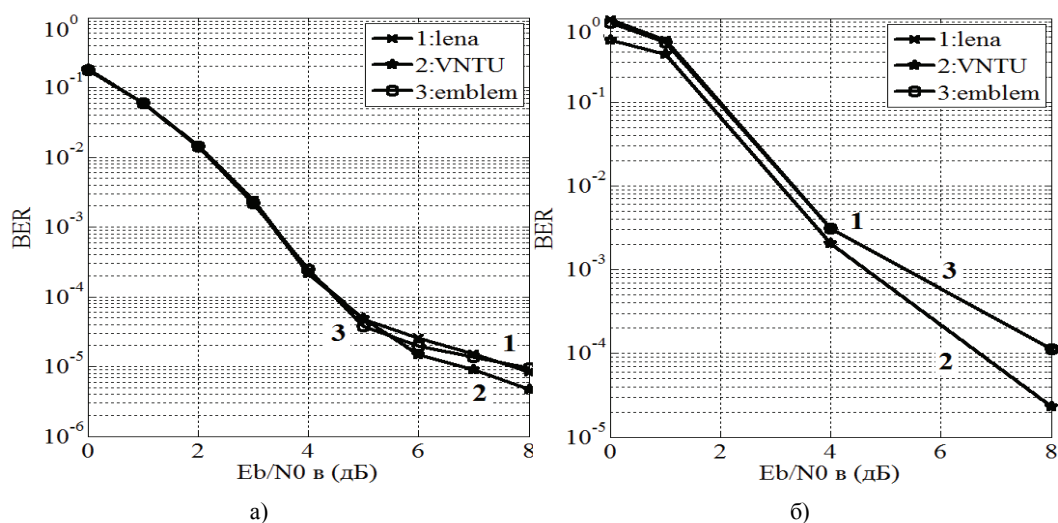


Рис. 7. Експериментальні залежності: а — для бітів $BER = f(Q)$; б — для символів $SER = f(Q)$

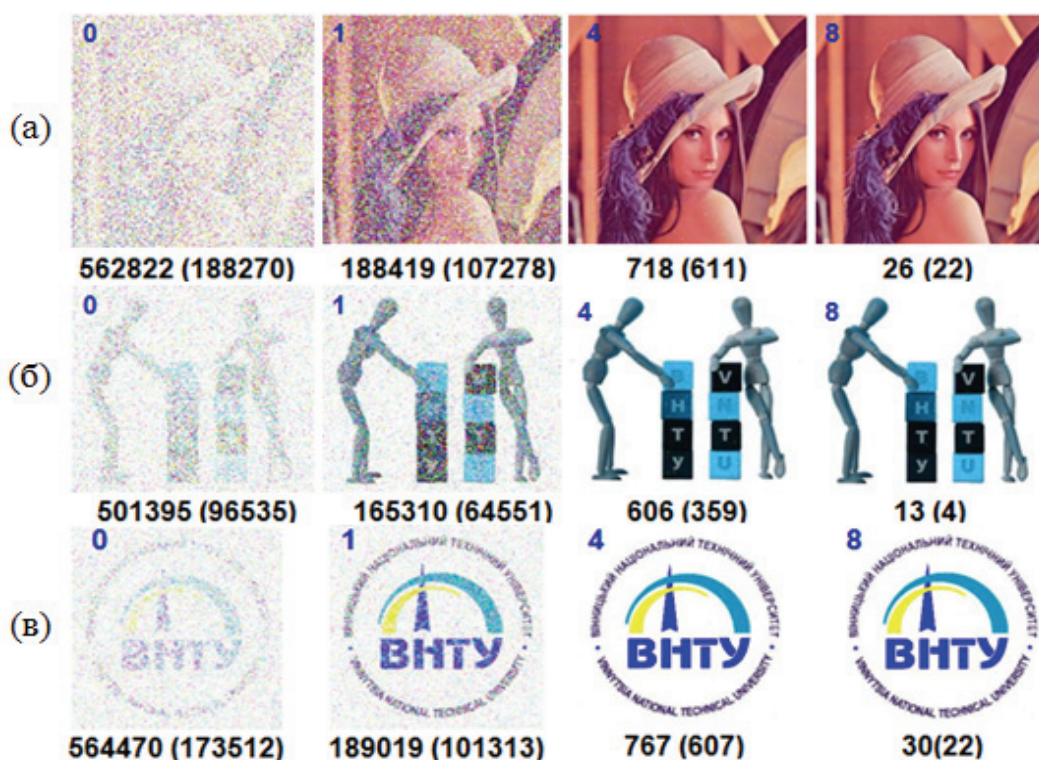


Рис. 8. Результати роботи турбо-кодера для експерименту № 5 у мультимедійному вигляді

Найкращі результати показали експерименти над зображенням «VNTU.jpg», що за однакових експериментальних умов може пояснюватись кращою роботою псевдовипадкового інтерлівера, який дозволив досягти кращого розсіювання пакетних помилок та збільшення ваги кодових слів на виході другого RSC-кодера. Також можна побачити, що з кожною наступною ітерацією якість переданого зображення покращується, кількість помилок зменшується. На 4—8 ітераціях зображення суттєво не змінилося, але кількість помилок значно зменшилась. Результати експериментів використані під час розроблення програмованої розподіленої комп'ютерної системи оброблення зображень органів людини на ТОВ «Медичний центр «Альтамедіка плюс» та під час розроблення системи охоронної телесигналізації на ПП «ТВА-Сервіс», що дозволило підвищити ефективність передавання цифрових даних в умовах завод, досягти необхідного відношення E_b/N_0 та показника BER в каналах з низькою енергетикою.

Висновки

Для розв'язання задач аналізу, синтезу та експлуатації турбо-кодів у розподілених комп'ютерних системах різного функціонального призначення побудовано імітаційну модель системи передавання даних з турбо-кодеком. Після проведеного імітаційного моделювання методом Монте-Карло отримано та досліджено характеристики завадостійкості турбо-коду за допомогою експериментальних функцій $BER = f(E_b/N_0)$. Особливий інтерес становить зниження обчислювальної складності без значного зниження якості декодування. Саме тому у роботі розглянуто ефективніший за інші модифікації кусково-лінійний алгоритм турбо-декодування PL-log-MAP, який є чутливим до показника E_b/N_0 та під час досліджень показав характеристики завадостійкості близькі до характеристик MAP ($RMSE = 4 \cdot 10^{-4}$, $r = 0,9997$) та log-MAP ($RMSE = 5 \cdot 10^{-4}$, $r = 0,9998$) алгоритмів декодування за тієї ж енергетичної ефективності.

Таким чином, проведені експерименти для системи цифрового зв'язку з турбо-кодеком показали, що подана імітаційна модель адекватно описує процеси передавання цифрових даних. Результати моделювання підтверджують високу ефективність турбо-коду та алгоритму декодування PL-log-MAP і можуть бути використані для вибору параметрів турбо-кодів у процесі планування їх експлуатації у програмованих розподілених комп'ютерних системах різного призначення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Berrou C. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes / C. Berrou, A. Glavieux, P. Thitimajshima // Proceedings of the ICC'93. — Switzerland, Geneva: 1993. — P. 1064—1070.
2. Иванов Ю. Ю. О некоторых аспектах итеративной стратегии декодирования турбо-кодов: ретроспектива и «турбо»-принцип / Ю. Ю. Иванов, А. Я. Кулик // Информационные технологии и компьютерная инженерия (ИТКИ) : IV Междунар. научно-практ. конф. : матер.— Винница : ВНТУ, 28—30 мая, 2014 года. — С. 157—160.
3. Иванов Ю. Ю. Декодування та реалізація алгоритму BCJR для турбо-коду стандартизованого в DVB-RCS / Ю. Ю. Иванов, А. Я. Кулик, Д. С. Кривогубченко // Вісник Сумського державного університету. [Суми : СУМДУ]. — 2012. — Т. 4. — № 1. — С. 84—94. — (Технічні науки).
4. Channel Coding: Theory, Algorithms, and Applications / [D. Declercq, M. Fossorier, E. Biglieri and others]. — Academic Press Library in Mobile and Wireless Communications, Elsevier, 2014. — 690 p.
5. Банкет В. Л. Дискретная математика в задачах теории цифровой связи / В. Л. Банкет. — Одесса : ОНАС, 2008. — 118 с.
6. Розенвассер Д. М. Сравнение помехоустойчивых кодов ВОСП / Д. М. Розенвассер // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. — 2010. — № 1. — С. 134—137.
7. Васильев В. И. Турбо-код — основные характеристики, особенности применения и моделирования / И. В. Васильев, Х.Т. Ха // Весник ВГУ. [Воронеж]. — 2004. — № 2. — С. 8—15. — (Физика, математика).
8. Экспериментальное исследование процедур кодирования / декодирования турбокодов / В. Л. Банкет, С. Д. Прокопов, А. Г. Постовой, Ф. В. Топорков // Зв'язок : наук. журнал. [К. : Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій]. — 2004. — № 6. — С. 57—58.
9. Имитационное моделирование характеристик помехоустойчивости системы передачи информации с турбокодами / С. В. Зайцев, С. П. Ливенцев, Б. В. Горлинский, А. И. Артюх // Зв'язок : наук. журнал. [К. : Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій]. — 2006. — № 7. — С. 38—42.
10. A Novel Suboptimal Piecewise-Linear-log-MAP Algorithm for Turbo Decoding / Yu. Yu. Ivanov, A. N. Romanyuk, A. Ia. Kulyk, O.V. Stukach // Proceedings on XI IEEE International Siberian Conference on Control and Communications, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. — Omsk: Omsk State Technical University, 21—23 May, 2015. — P. 1—8.
11. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing / W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery. — Cambridge : Cambridge University Press, 2002. — P. 278.
12. Ivanov Yu. Principles and Comparison of Stopping Rules for Turbo Decoders / Yu. Ivanov, A. Kulyk // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія (ІТКИ-2015) : V Міжнар. науково-практ. конф. : матер. — Івано-Франківськ—Вінниця : ФОП Голіней О. М., 27—29 травня, 2015 року. — С. 87—88.
13. Кулик А. Я. Методи оцінювання ефективності інтерліверів у турбо-кодовій конструкції / А. Я. Кулик, Ю. Ю. Иванов // Обчислювальні методи і системи перетворення інформації (ОМСП-2014) : III Науково-техн. конф. : матер. — Львів : Фізико-механічний інститут Г. В. Карпенка НАН України, 25—26 вересня, 2014 року. — С. 161—164.
14. Simulating the Operation of Turbo Codes through the Monte Carlo Method, Comparison between MATLAB, C and C# / H. Balta, A. Isar, D. Isar, M. Balta // Advances in Intelligent and Soft Computing. — Springer, 2012. — V. 133. — P. 1127—1139.
15. Bi-directional SOVA Decoding for Turbo-codes / J. Chen, M. P. C. Fossorier, S. Lin, C. Xu // IEEE Communications Letters. — V. 4 (12). — P. 405—407.
16. Модифікації для зниження вычислительной сложности алгоритма декодирования BCJR MAP в турбо-кодовых конструкциях / О. В. Стукач, А. Н. Романюк, А. Я. Кулик, Ю. Ю. Иванов // Наукові праці ДонНТУ. — [Красноармійськ : ДонНТУ]. — 2015. — № 1 (20). — С. 107—112. — (Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка).
17. Алгоритм турбо-декодування PL-log-MAP для цифрової системи передавання даних у складі телемедичного комплексу / А. Я. Кулик, С. Г. Кривогубченко, Ю. Ю. Иванов, І. Ю. Иванов // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах : III Міжнар. наук. конф. : матер.— Винниця: 27—29 жовтня, 2015 р. — С. 118.
18. А. с. № 60431.І. Україна. Комп'ютерна програма «Цифрова система передавання даних з використанням турбо-кодових конструкцій в медичному телеметричному комплексі» / Ю. Ю. Иванов, І. Ю. Иванов ; заявл. 01.07.2015.

19. А. с. № 60433. Україна. Комп'ютерна програма «Емулятор роботи цифрової розподіленої комп'ютерної системи зв'язку з використанням турбо-кода та субоптимального кусочно-лінійного алгоритму декодування log-MAP» / Ю. Ю. Іванов ; заявл. 01.07.2015.

Рекомендована кафедрою автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 20.05.2016

Іванов Юрій Юрійович — аспірант кафедри автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки, e-mail: Yura881990@yandex.ru.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Yu. Yu. Ivanov¹

Experimental Research of Turbo-Codes Error-Correction Characteristics: Numerical Estimations and Simulation for Novel Suboptimal PL-LOG-MAP Decoding Algorithm

¹Vinnytsia National Technical University

The article shows the effectiveness of turbo-codes in channels with low-energy consumption. The simulation model for digital data transmission with turbo-codec has been analyzed. The simulation of the error-correction characteristics has been done for system with turbo-codec and novel suboptimal PL-log-MAP decoding algorithm. There have been established and analyzed experimental functional dependencies $BER = f(E_b/N_0)$ for multimedia information.

Keywords: error-correcting coding, turbo-code, iterative decoding, MAP, log-MAP, PL-log-MAP, max-log-MAP, Bi-SOVA, SOVA, simulation, BER, programmable computer communication systems.

Ivanov Yurii Yu. — Post-Graduate Student of the Chair of Automation and Informational-Measuring Instruments, e-mail: Yura881990@yandex.ru

Ю. Ю. Иванов¹

Экспериментальное исследование помехозащищенности турбо-кодов: численные оценки и имитационное моделирование для нового субоптимального алгоритма PL-LOG-MAP

¹Винницкий национальный технический университет

Показана перспективность турбо-кодов в каналах с низкой энергетикой. Проанализирована имитационная модель системы передачи цифровых данных с турбо-кодеком. Проведено имитационное моделирование характеристик помехоустойчивости системы с турбо-кодеком и новым субоптимальным алгоритмом декодирования PL-log-MAP. Установлены и проанализированы экспериментальные функциональные зависимости $BER = f(E_b/N_0)$ для мультимедийной информации.

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, турбо-код, итеративное декодирование, MAP, log-MAP, PL-log-MAP, max-log-MAP, Bi-SOVA, SOVA, имитационное моделирование, BER, программируемые компьютерные системы связи.

Иванов Юрий Юрьевич — аспірант кафедри автоматики та інформаційно-вимірювальної техніки, e-mail: Yura881990@yandex.ru