

КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

B. Chevchuk

MODELS AND METHODS OF PROCESSING, CODING AND INFORMATION TRANSFER FOR BUILDING INFORMATION-EFFECTIVE COMPUTER NETWORKS

On the basis of an integrated approach, the models and methods of construction of efficient computer networks to transfer minimized for the duration of crypto and noise immunity data packets.

На основе комплексного подхода предложены модели и методы построения информационно-эффективных компьютерных сетей с передачей минимизированных по длительности криптоустойчивых и помехоустойчивых пакетов данных.

На основе комплексного подхода запропоновані моделі і методи побудови інформаційно-ефективних комп'ютерних мереж з передачею мінімізованих за тривалістю крипостійких та завадостійких пакетів даних.

© Б.М. Шевчук, 2009

УДК 681.31

Б.М. ШЕВЧУК

МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ОБРОБКИ, КОДУВАННЯ І ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ПОБУДОВИ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕФЕКТИВНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ

Розвиток мікроелектроніки, комп'ютерних та телекомунікаційних технологій призвів до появи високошвидкісних оптоволоконних, проводових та безпроводових комп'ютерних мереж різного призначення та застосування. Прикладом динамічного розвитку комп'ютерних мереж є стрімке впровадження у повсякденну діяльність фізичних осіб, різноманітних підприємств, установ та закладів прогресивних Інтернет-технологій, мереж супутникового та мобільного зв'язку (GEO-, MEO- та LEO-мереж, VSAT-, USAT-мереж, UMTS-, CDMA-, GSM-мереж), безпроводових мереж персонального, локального та регіонального зв'язку (WPAN, WLAN, WMAN, WRAN, включаючи мережі Wi-Fi, WiMAX), сенсорних мереж (ZigBee та ін.) [1–4]. Перспективою розвитку комп'ютерних мереж є впровадження мереж WiMAX з застосуванням технології MIMO, супутникових мереж з мережевою технологією MPLS [2], UWB-мереж [1, 4], персональних терміналів стільникових мереж з інтелектуальними антенами [5], технології побудови програмного радіо та когнітивних радіомереж, включаючи мереж стандарту IEEE 802.22 [2, 5], високошвидкісних mesh-радіомереж промислового призначення з самоорганізацією та великим радіусом зв'язку, включаючи мереж стандарту IEEE 802.11s, регіональних безпроводових мереж з багатосекторними антенами [2], регіональних та глобальних мереж на базі висотних аероплатформ [2], сенсорних та ло-

кальних мереж з ентропійними методами маніпуляції сигналів [6].

Широке використання та впровадження комп'ютерних мереж у різноманітних галузях людської діяльності вимагає від розробників створення високонадійних, завадостійких мереж передачі інформації. Надійність зв'язку передбачає інтеграцію сенсорних, локальних, регіональних та глобальних мереж у спільну мережу з наявністю резервних каналів зв'язку (проводових/безпроводових) та шляхів доставки інформації між віддаленими абонентами. Ефективне використання інтегрованих мереж вимагає від абонентів реалізації багатофункціональної обробки та кодування вхідних даних. Актуальність роботи полягає у вирішенні проблем підвищення надійності та якості передачі даних за рахунок реалізації абонентами швидкодіючих та точних методів і алгоритмів обробки та кодування даних в місцях їх утворення.

Мета роботи – розробка методів підвищення інформаційної ефективності роботи абонентів та мережі в цілому. В результаті реалізації абонентами таких методів в інтегровану мережу відправляються достовірні та компактні пакети інформації, що суттєво підвищує якість та надійність зв'язку в мережі.

Методологічні основи та моделі побудови інформаційно-ефективних комп'ютерних мереж. Підвищення ефективності функціонування комп'ютерних мереж ґрунтується на вирішенні комплексу проблем, пов'язаних з введенням (відбором) інформації в мережу, обробкою, кодуванням та передачею двійкових масивів даних у ланці “джерело інформації ↔ засоби введення інформації ↔ абонентська (об'єктна) система мережі ↔ мережа передачі даних ↔ центральна станція мережі (інші абоненти)”. Незалежно від виду мережі передачі даних (проводова, оптоволоконна, безпроводова, лазерна, гідроакустична та ін.) при заданих величинах виділеної (робочої) смуги частот каналу зв'язку F та ймовірності помилкового прийому елементарного дискретного сигналу або кодової послідовності P_D ефективність роботи мережі характеризується поточною швидкістю передачі інформації R , яка залежить від рівня шумів у каналі зв'язку та є функцією багатьох параметрів. Тобто

$$R = f(F, P_n, E_b / N_0, B, K_c),$$

де E_b / N_0 – відношення енергії сигналу на один біт (питомої енергії одного біту) до густини потужності на один герц (спектральної густини потужності шуму), $E_b = S \cdot T_b$, S – потужність сигналу, T_b – тривалість бітового сигналу, $N_0 = N / F$, N – потужність шуму; $B = F \cdot T_b$ – база сигналу (коефіцієнт розширення спектра сигналу); $K_c = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$ – сумарний коефіцієнт стиску даних, що підлягають до передачі інформаційних пакетів (ІП) та в процесі передачі ІП, k_1 – коефіцієнт стиску даних з втратами (характерний при обробці сигналів і зображень, при стиску масивів даних $k_1 = 1$), k_2 – коефіцієнт стиску даних без втрат, k_3 – коефіцієнт стиску даних у процесі формування та передачі ІП, величина

якого у випадку використання бінарних (простих та завадостійких) схем маніпуляції може досягати величини $k_3 \geq 1.6...2$ [7].

На частоту помилок на один біт, яка для якісних каналів зв'язку задається величиною $P_n \leq 10^{-6}...10^{-12}$, впливає тільки енергетичне співвідношення E_b / N_0 . При обмеженій смузі частот F необхідна величина $E_b / N_0 \geq (2^r - 1) / r$ [8], де $r = R/W$ – спектральна швидкість, яка вимірюється в бітах в секунду на герц. Показники P_n , E_b / N_0 і r – є найважливішими характеристиками цифрової системи передачі даних, при цьому ефективнішою є мережа, яка при заданих величинах F і $P_n \leq 10^{-6}$ забезпечує досягнення максимальної величини $r \rightarrow r_{\max}$ при використанні менших потужностей абонентських передавачів (радіопередавачів). Дослідження Найквіста показали [3], що для сигналу з шириною смуги F (Гц) найбільша швидкість передачі не перевищує величину $2F$ (біт/с), а ефективність використання смуги частот $\xi = \kappa = 2$ біт/с/Гц [3]. При передачі найбільш високочастотних двійкових послідовностей ...1010... або ...0101... з тривалістю двійкового символу T_b секунд (період повторення двійкових послідовностей $t_n = 2T_b$, відповідно $F \neq 1/t_n = 1.2$ б) максимальна канална швидкість передачі інформації $v_{\kappa \max} = R_{\max} = 1/T_b$ біт/с. Реальна пропускна здатність цифрових каналів зв'язку знижується з ідеальних 2-х до 1,8...1,4 символ/с/Гц [3], що пов'язано з виникненням міжсимвольної інтерференції під час передачі цифрових сигналів по каналу зв'язку. В результаті цього фронти цифрових (імпульсних) сигналів "розмиваються" та накладаються на сусідні інтервали передачі двійкових сигналів, що, в свою чергу, призводить до підвищення ймовірності появи похибок у процесі прийому даних. Для зменшення похибок при прийнятті рішення щодо прийому відповідного двійкового символу необхідно збільшувати ширину смуги каналу зв'язку з урахуванням заданої якості відновлення крутизни фронтів імпульсних сигналів. Тобто $F = k_s v_k / 2$, де $k_s = (F + F_o) / F_o$ – коефіцієнт, що враховує якість відновлення фронтів цифрових сигналів ($k_s > 1,4...1,8$), F_o – надлишкова смуга частот, v_k – канална швидкість передачі інформації ($v_k = R$). Підвищення швидкості v_k при обмеженій смузі частот досягається за рахунок збільшення кількості елементів сигналу, що передається несучою. Слід зазначити, що ширина спектра прямокутного відеоімпульса, тривалістю T частот визначається першим нулем спектра. Тобто $F = 1/T$, ($F \cdot T = 1$), а якщо ширина спектра такого сигналу знаходиться за умови отримання 99 % енергії, то $F \approx 10/T$ [9]. При побудові безпроводових мереж на сьогоднішній день не існує єдиного визначення ширини смуги частот радіоканалу. Найбільш популярною мірою ширини смуги радіоканалу є ширина основного спектрального пелюстка, в якому зосереджена основна потужність сигналу, проте для деяких видів модуляції спостерігається відсут-

ність явно вираженого пелюстка з центром на несучій частоті. Тому основний критерій визначення величини F пов'язано з вмістом у смузі частот певної частоти сумарної потужності сигналу. Наприклад, згідно вимог Федеральної комісії по засобам зв'язку США (FCC) смуга частот обмежується шириною, за межами якої знаходиться 1 % потужності сигналу. Існують оцінки смуги частот з урахуванням величини спектральної густини потужності за рівнем x децибел, наприклад, 35 дБ, 50 дБ [10].

Підвищення швидкості передачі інформації R при обмеженій смузі частот F досягається за рахунок попереднього стиску даних, збільшення кількості елементів M каналного сигналу (КС), що передається несучою, а також за рахунок формування та передачі L ортогональних сигналів у спільному спектрі частот F . Відповідно максимальна швидкість передачі інформації визначається виразом

$$R_{\max} = K_c \cdot \frac{1}{T_b} \cdot \frac{L}{B} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_i \cdot \log_2 M_m \cdot \frac{1}{T_b} \cdot \frac{L}{B},$$

де k_i – коефіцієнт підвищення швидкості передачі інформації за рахунок кодування та формування інтервально-імпульсних сигналів на інформаційному рівні [7]; M_m – кількість станів КС (рівнів маніпуляції), яка визначає розмір набору КС за рахунок багаторівневої маніпуляції несучої; $L \leq B/4$ [11].

Формування M елементів КС можливе на інформаційному рівні ($M = M_i$) та рівні модуляції (маніпуляції) несучої ($M = M_m$), а також за рахунок реалізації комбінованого кодування, при якому $k_3 = k_i \cdot k_m$, де $k_i = f(M_i)$ – коефіцієнт підвищення швидкості передачі інформації за рахунок кодування та формування інтервально-імпульсних сигналів, M_i – кількість інформаційних елементів (дискретів) КС, $k_m = \log_2 M_m$ – коефіцієнт підвищення швидкості передачі інформації за рахунок реалізації багаторівневої маніпуляції несучої. Фактично мова йде про додатковий стиск двійкових масивів даних без втрат у процесі передачі пакетів інформації. Один із ефективних способів формування $M = M_i$ полягає у використанні нерівномірного кодування двійкових даних в темпі введення, обробки та передачі даних або з накопиченням відповідних підмасивів даних, при цьому короткі інтервали використовуються для передачі відповідних послідовностей бітів, що апріорно або з визначеною ймовірністю частіше зустрічаються, а більш тривалі – для передачі послідовностей, які менш частіше зустрічаються [7]. Прикладом ефективного формування $M = M_m$ елементів КС на рівні модуляції несучої є застосування методу множини несучих в локальних та локально-регіональних мережах стандартів IEEE 802, коли робочий діапазон F розбивається на підканали з різними частотами OFDM (Orthogonal Frequency

Division Multiplexing) та OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) [1, 2], по яким передається потік даних паралельними каналами. Широкого застосування отримали методи маніпуляції несучої BPSK (Binary Phase Shift Keying, $M_m = 2$ – один біт на символ), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying, $M_m = 4$ – два біта на символ), QAM (Quadrature Amplitude Modulation), включаючи 16-QAM ($M_m = 16$ – чотири біта на символ), 64-QAM ($M_m = 64$ – шість біт на символ). У стандарті IEEE 802.16 передбачено використання 256-рівневої квадратурної модуляції 256-QAM [1].

Зі збільшенням швидкості передачі дискретної інформації R при обмеженій смузі пропускання каналу зв'язку F зменшується енергія КС, що призводить до зменшення завадостійкості передачі даних. Ступінь правильності інформації, яка передається по дискретному каналу з шумами оцінюється ймовірністю правильного/неправильного прийому кожного КС (двійкового елемента або групи двійкових елементів), при цьому $p_b + p_n = 1$, де p_b – ймовірність правильного прийому КС, p_n – ймовірність помилкового прийому КС. Статистичні дослідження роботи дискретних каналів зв'язку різного типу та дальності дії виявили такі типи помилок [3, 5, 8]: незалежні спотворення послідовностей дискретних елементів; групові помилки; спалахи помилок на досить тривалому інтервалі, який визначається сотнями-тисячами елементарних інтервалів дискретних елементів. За реальними умовами в каналі зв'язку виявляються всі типи помилок, при цьому чим вища його якість ($E_b / N_0 \geq (E_b / N_0)_n$, де $(E_b / N_0)_n$ – необхідне енергетичне співвідношення сигналу до шуму, відповідно $p_b > p_n$), тим більшу долю помилок складають одиночні (незалежні) помилки, а чим більше канал піддається впливу імпульсних завад, тим нижчою є його якість і основну долю помилок утворюють пакети помилкових рішень. При цьому важливо своєчасно виявити тривалі інтервали наближення $p_n \geq 0.5$. Оскільки ймовірність помилок у каналі зв'язку є функцією суми завад (теплого шуму, широкосмугового гауссового шуму, утвореного від роботи сусідніх станцій, джерел промислових та імпульсних завад), то необхідне енергетичне співвідношення $(E_b / N_0)_n$ у каналі зв'язку для підтримки заданого рівня ймовірності помилок P_n можна записати як відношення $E_b / (N_0 + J_0)$, де $J_0 = J / F \gg N_0$ [3], J – середня потужність сумарних завад. Тому основою для вибору максимальної каналної швидкості R_{\max}^j , j – номер поточного пакета інформації, за заданою ймовірністю P_n є підтримка та корекція необхідного співвідношення $(E_b / N_0)_n$ за рахунок оперативної зміни бази КС пакетів інформації, оскільки $(E_b / J_0)_n = S \cdot T_b / (J / F) = (S / J) \cdot B$. Ефективним способом підтримки необхідного енергетичного співвідношення $(E_b / N_0)_n$ у каналах зв'язку безпроводових мереж є використання абонентів-ретрансляторів (повнофункціональних пристроїв у сенсорних мережах стандарту ZigBee, точок доступу в локальних мережах стандарту IEEE 802, супутникових ретрансляторів та ін.) [1–4].

Універсальним методом досягнення необхідного співвідношення $(E_b / N_0)_n$ при обмежених потужностях абонентських передавачів є реалізація широко розповсюджених операцій каналного кодування [3, 5, 8], включаючи рандомізацію (скремблювання) даних, завадостійке кодування та перемішування (інтерлівінга) даних. Остання операція дозволяє мінімізувати дію пакетних помилок на масиви даних інформаційних кадрів, що передаються по каналу зв'язку з шумами, які на прийомній стороні, після виконання зворотної операції перетворюються в масиви даних з незалежними (одиночними) помилками. Для боротьби з помилками широкого розповсюдження отримали коди Ріда – Соломона, каскадні коди з зовнішнім кодом Ріда – Соломона та внутрішнім згортковим кодом, блокові турбокоди [1, 3]. Наприклад, в засобах стандарту IEEE 802.16 (WiMAX) залежно від рівня шумів у каналі зв'язку використовується одна із чотирьох схем кодування, серед яких у базовому алгоритмі кодування Ріда – Соломона формуються блоки даних за розміром 2040 біт, із яких 128 перевірових біт (приблизно 6,3 % блоку даних), що дозволяють виправити 64 пошкоджених біт (3,1 % блоку даних) або виявити до 120 пошкоджених біт (до 5,8 % блоку даних). Ефективним завадостійким методом кодування даних є використання шумоподібних сигналів при передачі двійкових послідовностей [9]. Таке кодування даних призводить до суттєвого зменшення швидкості передачі інформації. Перспективним способом завадостійкої передачі пакетів інформації є передача даних без несучої та шляхом використання ефективних надширококутєвих методів зв'язку [1–4, 12].

Таким чином, побудова інформаційно-ефективних комп'ютерних мереж ґрунтується на реалізації абонентами мережі комплексу методів та алгоритмів компактного, криптистійкого та завадостійкого кодування даних з оперативною адаптацією параметрів КС до поточного рівня шумів у каналі зв'язку. З урахуванням централізованого/децентралізованого керування доступом абонентів (об'єктних систем) безпроводової мережі до абонентів-ретрансляторів математична модель реалізації інформаційно-ефективної передачі даних у комп'ютерних мережах описується системою виразів

$$\begin{cases} P_{nd} \leq P_{nc}; P \rightarrow 1, \\ (E_b / J_0)_n \geq (S / J) \cdot B_{\min}^j, \\ t_{dr}^j + T_p + t_{pk} \rightarrow t_{dr \min}^j + t_{ip \min}^j + t_{pk \min}^j, \\ R_{\max}^j = K \cdot L / (T_b \cdot B_{\min}^j), \end{cases}$$

де P_{nd} – допустима величина ймовірності помилкового прийому КС; P_{nc} – ймовірність безконфліктної передачі пакетів інформації у процесі множинного доступу абонентів мережі до спільних ресурсів (моноканалів, абонентів); B_{\min}^j – мінімально необхідна база каналних сигналів для підтримки необхідного енергетичного співвідношення $(E_b / J_0)_n$ в точці прийому для j -го пакета; t_{dr} – інте-

рвал доступу абонентів до спільних ресурсів мережі; T_{ip} – тривалість інформаційного пакета; T_{pk} – тривалість пакета-квитанції.

У залежності від способів оперативної підтримки якості каналу зв'язку (поточної величини $(B_b / J_0)_n$) максимальна швидкість передачі інформації R_{\max}^j може змінюватись від КС до КС або від пакета до пакета інформації. Таку величину R_{\max}^j доцільно визначити як кількість інформації в бітах, яка передається на протязі тривалості поточного інтервалу зайнятості каналу зв'язку t_z , тобто $R_{\max}^j = I_{IP} / t_z = I_{IP} / (t_{dr} + T_{ip} + T_{pk})$.

Формування і передача компактних, криптостійких та завадостійких пакетів даних. Підвищення ефективності функціонування комп'ютерних мереж досягається за рахунок реалізації у місцях зародження інформаційних потоків методів та алгоритмів багатофункціональної обробки і кодування даних (сигналів, відеосигналів, масивів даних) з урахуванням мінімізації вихідних потоків ПП. Пакети даних мають бути компактними (з мінімальною тривалістю), криптостійкими та завадостійкими [7, 13]. Природа більшості процесів, що підлягають контролю та дослідженню, є неперервною часовою функцією. Кожний введений сигнал характеризується мінімальними і максимальними значеннями амплітудних і частотних параметрів, відповідно X_{\min} , X_{\max} та f_{\min} , f_{\max} . Найбільш інформативними (суттєвими) відліками сигналів (відеосигналів) є екстремуми та точки зміни опуклості обвідної, які крім амплітудно-часових значень, характеризуються додатковими параметрами, такими як поточне вхідне співвідношення сигнал/шум в околиці суттєвих відліків $[c/w]_m$ та параметрами поточної динаміки обвідної. Дані величини визначають вибір частоти введення (дискретизації) сигналів f_d та кількість біт q для кодування відліків сигналів. Мінімум необхідні параметри $f_d^n = 2nK_f^m f_{\max}^m$ і $q_i = \lceil \log_2 X_{\max}^j / X_{\min}^j \rceil$ [7, 13] визначають первинні інформаційні потоки даних, подальше зменшення яких на абонентських системах без втрати якості введення точної і достовірної інформації досягається шляхом прорідження введених відліків сигналів на величину коефіцієнта прорідження $k_p = f([c/w]_{in}, \Delta X_{ij}^f)$, i – поточний суттєвий відлік j -го сигналу, $j = \overline{1, n}$, n – кількість каналів введення сигналів, K_f^m – коефіцієнт підвищення частоти дискретизації за Котельниковим f_{dK}^m найбільш високочастотного m -го сигналу з частотою f_{\max}^m ($f_{dK}^m = 2f_{\max}^m$), $m < n$ (в залежності від параметрів вхідного фільтра нижніх частот (ФНЧ) $K_f \geq 8 \dots 10$ при $q_{\max} \geq 10$), ΔX_{ij}^f – поточна величина приростів відфільтрованого сигналу j -го каналу. При стиску аналогових сигналів з контрольованими втратами виявлені суттєві відліки на чистих від

шумів ділянках сигналів, що кодуються більш точно в порівнянні із зашумленими відліками. Формат вихідних даних сучасних відеосенсорів суттєво залежить від технології розміщення світлофільтрів перед чутливим елементом, який реагує на яскравість світла. Первинний потік даних з відеосенсора суттєво залежить від формату відеокадру $M \cdot N$ (M – кількість пікселів у рядку, N – кількість пікселів у стовпчику), прийнятої схеми кольорового відеокодування, топології побудови світлофільтрів, кількості біт для кодування градацій яскравості світла. Сумарний потік даних з відеосенсора визначається виразом

$$V_{\text{вс}} = K_v \cdot M \cdot N \cdot q(C_c),$$

де K_v – кількість кадрів/с; $M \cdot N$ – роздільна здатність відеосенсора; $q(C_c)$ – кількість біт, виділених для кодування кольорових сигналів у залежності від схеми кодування відеоданих C_c .

Компактне кодування суттєвих і несуттєвих відліків сигналів та відеосигналів здійснюється в темпі введення даних або з накопиченням необхідної вибірки даних з наступною їх обробкою та кодуванням. Додатковий стиск масивів первинних даних здійснюється за рахунок безтратних методів стиску інформації. Ефективним способом захисту інформації є гаміювання даних з довготривалими псевдохаотичними послідовностями, які від пакета до пакета є змінними. При цьому закони генерації абонентських псевдопослідовностей можуть бути різноманітними та локально визначеними на короткому інтервалі часу. Кодові ключі генерації абонентських псевдопослідовностей задаються бітами секретного ключа асиметричної криптосистеми. Для завадостійкого кодування інформаційних кадрів ІІІ у залежності від якості каналу зв'язку доцільно використовувати різноманітні за ефективністю, швидкодією та складністю алгоритми Ріда – Соломона, каскадного кодування, турбокодування, багатопорогового кодування.

Висновки. При обмеженій робочій смузі частот функціонування інформаційно-ефективних комп'ютерних мереж ґрунтується на мінімізації тривалості та кількості ІІІ, що передаються в спільному каналі зв'язку мережі, з урахуванням підтримки абонентами мережі необхідного енергетичного співвідношення каналного сигналу до шуму за рахунок оперативної зміни бази каналних сигналів. Основою формування і передачі компактних, криптостійких та завадостійких ІІІ є реалізація абонентами мережі алгоритмів стиску сигналів і зображень з допустимими втратами, стиску даних без втрат, стиску даних у процесі формування і передачі ІІІ на інформаційному та модуляційному рівнях, захисту інформації з використанням шифрів з одноразовим ключем та маскуванню ІІІ в шумах каналу зв'язку, а також завадостійкого кодування ІІІ.

1. *Шахнович Н.В.* Современные технологии беспроводной связи, 2-е изд.: – М.: Техносфера, 2006. – 288 с.
2. *Ільченко М.Ю., Кравчук С.О.* Сучасні телекомунікаційні системи. – К.: НВП Вид-во Наук. думка НАН України, 2008. – 328 с.

3. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение, 2-е изд.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2003. – 1104 с.
4. *Ильченко М.Е., Бунин С.Г., Войтер А.П.* Сотовые радиосети с пакетной радиосвязью. – Киев: Наук. думка, 2003. – 266 с.
5. *Весоловский К.* Системы подвижной радиосвязи. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 536 с.
6. *Мельничук С.І.* Теорія ентропійних методів маніпуляції сигналів // Матеріали проблемно-наукової міжгалузевої конф. "Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання" (ПНМК-2009). – Бучач: Бучачський інститут менеджменту і аудиту, 2009. – Вип. 5. – Том. 1. – С. 6–9.
7. *Шевчук Б.М.* Теоретичні основи побудови високоінформативних інтелектуальних радіомереж обробки і передачі інформації // Праці міжнар. конф. “Питання оптимізації обчислень (ПОО-XX111)”. – К.: Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України. – 2007. – С. 310–311.
8. *Блейхут Р.* Теория и практика кодов, контролирующих ошибки: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 576 с.
9. *Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
10. *Бадалов А.Л., Михайлов А.С.* Нормы и параметры электромагнитной совместимости РЭС: Справочник. – М.: Радио и связь, 1990. – 272 с.
11. *Голяницкий И.А.* Математические модели и методы в радиосвязи / Под ред. Ю.А. Громакова. – М.: Эко-трендз, 2005. – 440 с.
12. *Урядников Ю.Ф., Аджемов С.С.* Сверхширокополосная связь. Теория и применение. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 368 с.
13. *Шевчук Б.М.* Методи оперативної обробки та кодування сигналів і відеосигналів для побудови інтелектуальних сенсорів та відео сенсорів // Матеріали проблемно-наукової міжгалузевої конф. "Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання" (ПНМК-2009). – Бучач: Бучачський інститут менеджменту і аудиту, 2009. – Вип. 5. – Том. 1. – С. 10–14.

Отримано 19.08.2009