

УДК 681.3

А.С. ВАСЮРА, А.Я. КУЛИК, Ю.Ю. ІВАНОВ

Вінницький національний технічний університет

ЗАСТОСУВАННЯ ЗАВАДОСТІЙКОГО ІТЕРАТИВНОГО ТУРБО-КОДУ В
СТАНДАРТІ ЦИФРОВОГО СУПУТНИКОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ DVB-S

Проведено оцінку основних енергетичних співвідношень у каналах Райса та Релея. Визначено необхідність застосування алгоритму log-MAP у процедурі декодування турбо-кодів та наведено оцінку складності декодування всього коду. Проведене моделювання енергетичної ефективності та характеристик BER в стандарті зв'язку DVB-S із застосуванням ефективною QPSK модуляції.

Ключові слова: DVB-S, турбо-код, відношення сигнал / шум, ймовірність помилки на біт інформації, квадратурно-фазова модуляція, канали Релея та Райса, log-MAP алгоритм.

The estimation of primary energy ratios in Rician and Rayleigh channels is conducted. The need of usage of the log-MAP algorithm in the process of decoding turbo-codes is defined and the assessment of the complexity of decoding all code is presented. The simulation of energy efficiency and BER performance in DVB-S communication standard with usage the effectively QPSK modulation is conducted.

Вступ

Кодові конструкції під назвою «турбо-коди» розглядаються як найбільш ефективні серед відомих завадостійких кодів. Серед сучасних методів корекції помилок вони найближче підходять до теоретичної межі максимальної пропускну здатності зашумленого каналу, а також дозволяють збільшити швидкість передавання інформації, не вимагаючи збільшення потужності передавача [1]. Супутникове телебачення є швидким, надійним і економічним способом передавання телевізійного сигналу високої якості. Однією з особливостей застосування штучних супутників Землі є обмеженість енергетичного потенціалу ретранслятора, тому супутникове мовлення використовує методи оброблення, які вимагають мінімального відношення несуча / шум (Carrier to Noise Ratio – CNR) на вході демодулятора в обмін на смугу частот сигналу. Саме тому для цифрового мовлення застосовують потужне каскадне завадостійке кодування та модуляцію з невисокими кратностями.

Приймання та формування турбо-кода з використанням обчислювальної потужності технічних пристроїв, реалізація розроблених обчислювальних процедур для роботи з даним кодом в техніці, а також дослідження ймовірнісно-енергетичних характеристик передавання інформації з використанням технічних засобів при роботі з турбо-кодами є актуальними теоретичними та прикладними проблемами [1, 2]. Турбо-коди – перспективний метод роботи з інформацією, тому вони стали стандартом для кодування техніки цього тисячоліття, і продовжується покращення їхніх характеристик для застосування в майбутньому [3]. Саме тому, дослідження систем із застосуванням цих кодів актуальні.

Постановка задачі

Мета статті – аналіз роботи супутникового стандарту DVB-S, призначеного для високоякісного передавання аудіо та відео, а також комп'ютерне моделювання залежності ймовірності помилки на біт інформації (Bit Error Rate – BER) від цифрового нормованого значення E_b/N_0 з використанням турбо-кодів різної швидкості, квадратурно фазової модуляції та алгоритму декодування log-MAP.

Аналіз останніх досліджень

Європейський інститут стандартів зв'язку (European Telecommunications Standards Institute – ETSI) випустив DVB-S (Digital Video Broadcasting – Satellite Services) стандарт (рисунок 1), який використовує спеціальні ділянки радіочастотного спектру в сантиметровому діапазоні хвиль (KU-діапазоні) з частотами 11-12 ГГц [4 – 6] та сполучає квадратурно-фазову модуляцію (Quadrature Phase-Shift Keying – QPSK) з кодуванням Ріда-Соломона (Reed-Solomon Codes – RSC). Незабаром після цього ETSI схвалив інші дві схеми модуляції – вісімково-фазову (8-Phase-Shift Keying – 8PSK) і квадратурно-амплітудну (16-Quadrature Amplitude Modulation – 16QAM) [7, 8], які особливо ефективні там, де необхідна дуже висока швидкість передавання даних (широкосмугові мережі передавання даних, телетрансляції високої якості).

Виникає потреба в більш надійних завадостійких кодах, щоб демодулятор, прийнявши сигнал, міг відрізнити інформацію від завади. Більш ефективні коди з прямим виправленням помилок (Forward Error Correction – FEC) [3], такі як потужний ітеративний завадостійкий турбо-код, який спочатку був всього лише математичною моделлю, оскільки висока складність алгоритмів декодування не дозволяла організувати широке промислове і комерційне застосування даного коду через відсутність потужних обчислювальних мікросхем [2]. Але сучасна еволюція процесорів та модулів пам'яті дозволяє впроваджувати досягнення науки, які ще кілька років тому належали виключно області наукової фантастики. Компанія Advanced Hardware Architectures має значні успіхи в побудові мікросхем для турбо-кодів, які розроблялися разом з Efficient Channel Coding, що займалася розробкою алгоритмів декодування з

невеликою складністю та високою ефективністю.

Завдяки узгодженій фільтрації і FEC висока якість приймання інформації досягається навіть в екстремальних умовах, коли рівень мінімального сигналу близький до граничних значень полоси пропускання каналу (Channel Committed Information Rate – CCIR) і CNR. При цьому гарантується не більше однієї помилки на годину, що еквівалентно BER близько 10^{-10} - 10^{-11} на вході демультимплексора MPEG-2 в декодері-приймачі. Система стандарту DVB-S призначена для доставки служб багатoprogramного телевізійного мовлення та їх безпосереднього приймання на домашніх інтегральних декодерах-приймачах [5, 9].

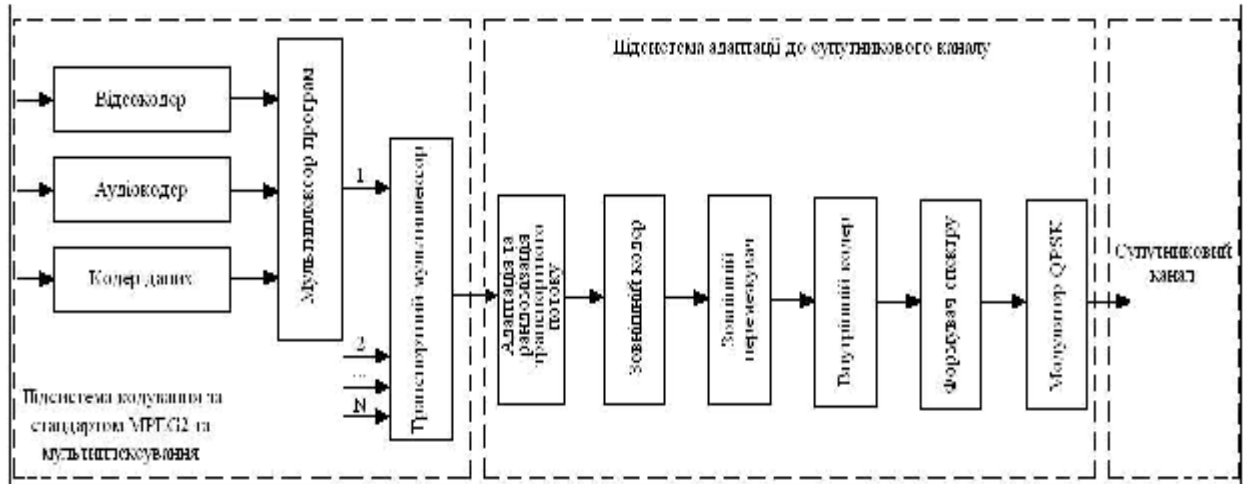


Рис. 1. Структурна схема стандарту DVB-S, яка проводить підготовку до передавання інформації супутниковим каналом зв'язку

Важливою перевагою турбо-коду є незалежність складності декодування від довжини інформаційного блоку, що дозволяє знизити BER шляхом збільшення його довжини. Найкращі результати показують алгоритм декодування по максимуму апостеріорної ймовірності (Maximum A posteriori Probability – MAP) та його логарифмічна форма log-MAP для зниження обчислювальної складності декодування, оскільки BER для них мінімальна [1, 2].

Суттєвим недоліком даного коду є відносно висока складність декодування та велика затримка, які іноді роблять їх використання недоцільним. Але цей недолік не є суттєвим для використання в системах супутникового і мобільного зв'язку, бездротового широкопasmового доступу і цифрового телебачення (ViaSat, HDTV). Турбо-коди знайшли широке застосування в мобільних мережах 3G, які працюють на частотах дециметрового діапазону, передаючи дані зі швидкістю до 3,6 Мбіт/с. Найбільшого поширення в світі набули два стандарти 3G: W-CDMA і CDMA2000, які мають в основі технологію з множинним доступом з кодовим розподілом каналів. Доцільне застосування даного коду в бездротових атмосферних оптичних лініях зв'язку (Free Space Optics – FSO) для покращення характеристик систем, оскільки турбо-код компенсує втрати і шуми в лінії [2, 3].

Розв'язання задачі

На етапі проектування систем і мереж цифрового телевізійного мовлення, виходячи з ряду параметрів, оцінюють межі зон покриття цифровим мовленням. За стандартами DVB-S при розрахунку зон обслуговування може розглядатися до 60 параметрів [5, 6], серед яких: порядок модуляції – M_{order} , відносна довжина захисного інтервалу – Length, відносна швидкість кодування – Rate (1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8), символна швидкість (до $8,33 \cdot 10^6$ символів за секунду), вихідна потужність передавача, обсяг переданої інформації, робочий діапазон частот, ширина смуги каналу мовлення. Якщо приймання на стаціонарну антену відбувається з використанням моделі каналу зв'язку Райса [8], то залежно від заданої BER на виході декодера Вітербі CNR, розраховується за виразом

$$CNR = CNR_{Rician} + \Delta CNR_i = -12,9 + 10 \cdot \lg \left(\frac{(M_{order} + 1 - Rate) \cdot (2 - \lg BER)}{(1 + Length) \cdot (1,25 - Rate)^2} \right) + \Delta CNR_i, \quad \text{дБ}, \quad (1)$$

де ΔCNR_i – енергетичний запас для реального каналу зв'язку (1,4 дБ для QPSK, 1,7 дБ для 16QAM).

Порогове відношення сигнал / шум (Signal to Noise Ratio – SNR), при якому виникає зрив синхронізації і спотворення зображення, знаходиться за формулою

$$SNR = -5,5 + 10 \cdot \lg \left(\frac{M_{order} + 1 - Rate}{(1 + Length) \cdot (1,35 - Rate)^2} \right), \quad \text{дБ}, \quad (2)$$

Експериментальні дослідження показали, що характер дії шумів і перешкод в каналі при організації приймання сигналів на мобільні приймачі відповідає моделі Релея [8]. Причому через неідеальну реалізацію

приймально-передавального обладнання спостерігається відхилення реальних значень CNR від теоретичних на 0,3 – 1,4 дБ залежно від виду модуляції [3]. Величина CNR при мобільному прийманні інформації визначається за співвідношенням

$$CNR = CNR_{\text{Rayleigh}} + \Delta CNR_i = -14,3 + 10 \cdot \lg \left(\frac{(M_{\text{order}} + 1 - \text{Rate}) \cdot (2 - \lg BER)}{(1 + \text{Length}) \cdot (1,02 - \text{Rate})^2} \right) + \Delta CNR_i, \quad \text{дБ}, \quad (3)$$

Спрощене подання розглянутих вище каналів наведено на рисунку 2.

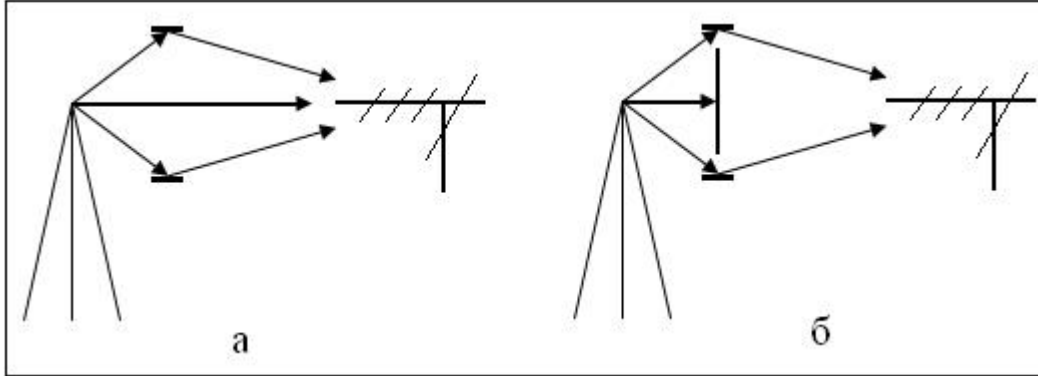


Рис. 2. Спрощене подання каналів: а – канал Райса (пряма видимість, є відбиті сигнали), б – канал Релея (немає прямої видимості, приймання тільки відбитих сигналів)

Щоб конвертувати значення SNR в $\frac{E_b}{N_0}$ [10] потрібно використати формулу

$$\frac{E_b}{N_0} = S \cdot T_b \cdot \frac{N}{W} = \left(\frac{S}{N} \right) \cdot \frac{W}{\text{Rate}}, \text{дБ}, \quad (4)$$

де E_b – енергія біта; N_0 – спектральна щільність потужності шуму; S – середня потужність сигналу; $T_b = 1/\text{Rate}$ – час передавання біта інформації; N – середня потужність шуму; W – ширина полоси пропускання.

Для підвищення енергетичної ефективності та виправлення помилок практично у всіх сучасних цифрових системах застосовується завадостійке кодування цифрових сигналів. Реалізація сучасних завадостійких систем передавання цифрової інформації неможлива без застосування кодерів та декодерів, виконаних за сучасною технологією, здатних працювати на високих тактових частотах, що дозволяє підвищити ефективність використання апаратної реалізації, енергетичну ефективність, завадостійкість, а також позитивно позначається на економічному ефекті. Кодери і декодери завадостійких кодів є найбільш ресурсомістким компонентом апаратури, особливо із зростанням швидкості передавання інформації. В стандарті DVB-S використовується найбільш помітне досягнення в області завадостійкого кодування – турбо-коди. Під час роботи з розглянутим кодом виникає проблема його декодування, а, відповідно, і реалізації цієї процедури [2].

Для надійної роботи в стандарті DVB-S алгоритми декодування турбо-кодів не повинні бути обмеженими використанням “жорсткої” схеми рішень (Hard Decision Decoding – HDD). Тому, для кращого використання інформації в ітераційному процесі застосовують “м’яку” схему декодування (Soft Decision Decoding – SISO) [1]. Одним із ефективних методів, що знижує обчислювальну складність та вирішує складну задачу декодування турбо-кодів, є алгоритм MAP, ідея якого представлена в роботі [2]. Формула для обчислення логарифма відношення правдоподібності (Log Likelihood Ratio – LLR) за цим алгоритмом має вигляд

$$LLR(\bar{U}_i) = \log \left(\frac{p(\bar{U}_i = 1 | \bar{r})}{p(\bar{U}_i = 0 | \bar{r})} \right) = \log \left(\frac{\sum_m \sum_{m'} \alpha_{i-1}(m') \cdot \gamma_i^{(1)}(m', m) \cdot \beta_i(m)}{\sum_m \sum_{m'} \alpha_{i-1}(m') \cdot \gamma_i^{(0)}(m', m) \cdot \beta_i(m)} \right), \quad (5)$$

де \bar{U}_i – початкові дані, які надаються пристрою кодування інформації; \bar{r} – дані після демодуляції, які надходять до пристрою декодування інформації; $\alpha_i(m) = \sum_{m'} \alpha_{i-1}(m') \cdot \sum_{j=0}^1 \gamma_i^{(j)}(m', m)$ – метрика прямого

шляху на гратці коду; $\gamma_i^{(j)}(m', m)$ – метрика ребра; $\beta_i(m) = \sum_{m'} \beta_{i+1}(m') \cdot \sum_{j=0}^1 \gamma_i^{(j)}(m', m)$ – метрика зворотного шляху на гратці коду.

Необхідно зазначити, що метрики ребер залежать від щільності потужності шуму N_0 , тому потрібно знати її оцінку для збереження оптимальності декодера.

Для того, щоб знизити обчислювальну складність MAP алгоритму, можуть бути застосовані логарифми метрик. Алгоритм, який використовує такий перехід, називають log-MAP алгоритмом. Формула для даної процедури декодування в логарифмічній формі має вигляд

$$LLR(\bar{U}_i) = \log\left(\sum_{m'} \sum_{m''} \exp(\log a_{i-1}(m') + \log \gamma_i^{(1)}(m', m) + \log \beta_i(m))\right) - \log\left(\sum_{m'} \sum_{m''} \exp(\log a_{i-1}(m') + \log \gamma_i^{(0)}(m', m) + \log \beta_i(m))\right). \quad (6)$$

Щоб провести оцінку складності декодування всього турбо-коду E_N потрібно за основу взяти складність реалізації методів декодування складових кодів E_1 .

$$E_N = E_1 \cdot V \cdot N, \quad (7)$$

де V – кількість ітерацій декодування; N – кількість складових кодів (два та більше).

Яким чином буде працювати алгоритм декодування log-MAP для турбо-коду з різною швидкістю кодування інформації (1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8) та ефективною QPSK модуляцією [3, 6]? На рисунку 3 наведені результати моделювання енергетичної ефективності та характеристик BER для даного випадку.

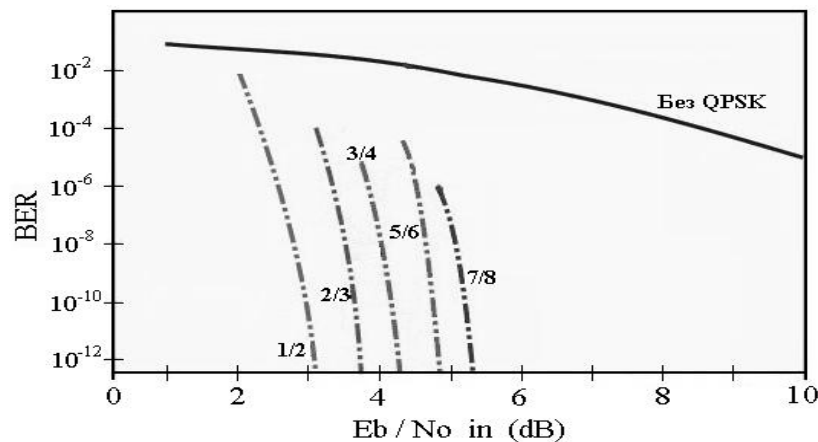


Рис. 3. Моделювання характеристик BER для турбо-кодів стандарту DVB-S

Застосування завадостійких турбо-кодів дозволяє значно знизити необхідне для роботи демодулятора з QPSK відношення E_b/N_0 , але при його збільшенні ефективність турбо-кодів знижується.

При великій вхідній ймовірності помилки ефективність турбо-коду висока, при малій вхідній ймовірності помилки ефективність турбо-коду обмежена. Очевидно, що турбо-коди отримали широке поширення в сучасних розподілених комп'ютерних системах різного функціонального призначення, оскільки показники BER максимально наближені до теоретичної межі.

Висновки

Схеми розподілу ресурсів DVB-S мережі забезпечують максимальну ефективність і гнучкість системи з мінімальними витратами. Даний стандарт характеризується можливістю ефективного захисту інформації у мережах передавання даних, які створюються на базі даної технології.

Ефективним для застосування є турбо-код – каскадний систематичний код, який може виправляти помилки, що виникають під час передавання інформації в каналі зв'язку з шумами. Використання турбо-кодування дозволяє підвищити завадостійкість приймання сигналів при співвідношенні сигнал/шум на 1-3 дБ менше від нормативного залежно від типу сигналів, швидкості, виду кодування, якості каналу зв'язку. Порогові значення у турбо-кодів лежать на 2-3 дБ нижче, ніж у системах, що використовують декодування за алгоритмом Вітербі або Ріда-Соломона. При малій величині E_b/N_0 та QPSK модуляції турбо-код є надзвичайно потужним методом корекції помилок (доцільно використовувати алгоритм декодування log-MAP), але з ростом даного відношення розглянутий код стає неефективним для застосування.

Проведений аналіз підтверджує перспективність використання турбо-кодів у розподілених комп'ютерних системах різного функціонального призначення.

Література

1. Кулик А.Я. Турбо-код: властивості та застосування для завадостійкого кодування / А.Я. Кулик, С.Г. Кривогубченко, Ю.Ю. Іванов // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2011. – № 2 (22). – С. 25-33.
2. Кулик А.Я. Декодування та реалізація алгоритму BCJR для турбо-коду стандартизованого в DVB-RCS / А.Я. Кулик, Д.С. Кривогубченко, Ю.Ю. Іванов // Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки. – Суми: СУМДУ, 2012. – Т. 4. – № 1. – С. 84-93.
3. Sripimanwat K. Turbo Code Applications: A Journey from a Paper to Realization / K. Sripimanwat. – New York: Springer, 2005. – 386 p.
4. Interaction Channel for Satellite Distribution Systems. Guidelines for the Use of ETSI EN 301 790. ETSI TR 101 790V1.3.1 (2006-09) European Standard (Telecommunications series) [Web resource] / Digital Video Broadcasting (DVB). – Access mode: http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/101700_101799/101790/01.03.01_60/tr_101790v010301p.pdf.
5. Second Generation Framing Structure, Channel Coding and Modulation Systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and Other Broadband Satellite Applications (DVB-S2). ETSI EN 302 307 V1.2.1 (2009-08) European Standard (Telecommunications series) [Web resource] / Digital Video Broadcasting (DVB). – Access mode: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/302307/01.02.01_60/en_302307v010201p.pdf.
6. Framing Structure, Channel Coding and Modulation for 11/12 GHz Satellite Services. ETSI EN 300 421 V1.1.2 (1997-08) European Standard (Telecommunications series) [Web resource] / Digital Video Broadcasting (DVB). – Access mode: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300400_300499/300421/01.01.02_60/en_300421v010102p.pdf.
7. Конорев А. Особенности измерения параметров каналов с цифровой модуляцией / А. Конорев // Теле-Спутник. – 2010. – № 9 (179) – С. 14-23.
8. Sudhir Babu A. Evaluation of BER for AWGN, Rayleigh and Rician Fading Channels Under Various Modulation Schemes / A. Sudhir Babu, K.V Sambasiva Rao // International Journal of Computer Applications. – 2011. – V. 26. – № 9. – p. 23-28.
9. Суворовцев А. Спутниковый интернет и телевидение на ноутбуке с помощью Prof DVB-S 1100 USB [Электронный ресурс] / А. Суворовцев. – Режим доступа: http://www.hwp.ru/articles/Sputnikoviy_internet_i_televidenie_na_noutbuke_s_pomoshchyu_Prof_DVB-S_1100_USB1/?SHOWALL_1=1.
10. Песков С.Н. Расчет вероятности ошибки в цифровых каналах связи / С.Н. Песков, А.Е. Ищенко // Теле-Спутник. – 2010. – № 11 (181) – С. 70-75.

Надійшла до редакції
14.11.2012 р.

УДК 004.92

І.В. ТУРЧЕНКО

Тернопільський національний економічний університет

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕТВОРЕННЯ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО СЕНСОРА

Метод ідентифікації індивідуальної характеристики перетворення багатопараметричного сенсора на основі зменшеного набору даних його калібрувань чи перевірок представлено у цій статті. Запропонований метод базується на нейромережевій апроксимації та прогнозуванні точок поверхні індивідуальної характеристики перетворення багатопараметричного сенсора. Кожен модуль нейронної мережі ідентифікує окрему точку поверхні. Отримані результати показали, що використання моделі опорних векторів дозволяє підвищити точність ідентифікації характеристики перетворення. Результати ідентифікації, отримані за допомогою моделі опорних векторів, порівняні з результатами, отриманими за допомогою багатопараметричного перцептронну.

Ключові слова: багатопараметричний сенсор, характеристики перетворення, багатопараметричний перцептрон, метод опорних векторів.

A method of an individual conversion characteristic reconstruction of a multisensor using a reduced number of its calibration/testing results is described in this paper. The proposed method is based on the neural-based approximation and prediction of surface points of multisensor conversion characteristic. Each neural network module reconstructs separate point of the surface. Our results show that the use of a model of Support Vector Machine allows improving the reconstruction accuracy of multisensor conversion characteristic. The reconstruction results obtained by a Support Vector Machine are compared with the results obtained by a multi-layer perceptron.

Вступ

Останнім часом все більшого розповсюдження набувають сенсори, вихідний сигнал яких цілеспрямовано залежить від декількох фізичних величин [1]. Їх називають багатопараметричними