

МЕТОДИ ТА СПЕЦПРОЦЕСОРИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕНТРОПІЇ СПЕКТРАЛЬНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛІВ

A. I. Segin¹, O. M. Zastavnyi², N. Ya. Vozna³, Yu.I. Popik⁴

Західноукраїнський національний університет

11, Львівська, Тернопіль, 46009, Україна

Emails: andriy.segin@gmail.com¹, olegz80@gmail.com², nvozna@ukr.net³, yur@wunu.edu.ua⁴

Ентропійний аналіз є ефективним інструментом, який може використовуватися в найрізноманітніших сферах науки і техніки. На сьогоднішній день він дещо недооцінений, внаслідок розвитку інших інформаційних технологій, таких як нейронні мережі, штучний інтелект, методи обробки великих даних та інших. Проте, використання ентропії можна поєднувати з перерахованими інформаційними технологіями, досягаючи хороших результатів. Крім того, оцінку ентропії можна використовувати як самостійний інструмент аналізу інформаційних характеристик сигналів. Інформація відіграє дедалі більше значення в усіх сферах діяльності людини. З розвитком інтернету, комунікаційних та комп'ютерних мереж, мобільного зв'язку та інших безпроводних телекомунікаційних технологій обсяг інформації, яку необхідно обробляти, невпинно зростає. При цьому, оцінки ентропії в різних її варіаціях, як один з елементів теорії інформації, є сильним засобом обробки та аналізу інформаційних характеристик потоків даних даних. В статті акумульовано розрізнену інформацію про різноманітні оцінки ентропії та показано розвиток теоретичних положень. Представлено також дослідження властивостей ентропії дискретних сигналів. Показана можливість організації ліній передачі даних на основі ентропійно-маніпульованих сигналів, за рахунок чого можна досягнути високої завадозахищеності. Крім того, запропоновано використовувати ентропійно-маніпульовані сигнали, які базуються на обчисленні ентропії не амплітуди сигналів, а їх спектральних характеристик. Для визначення ентропії спектру сигналів розроблено структуру спецпроцесора та описано принцип його функціонування. Визначення ентропії по частоті сигналу дозволяє підвищити криптографічну стійкість та завадозахищеність передавання інформації. Запропонований спецпроцесор призначений для використання в системах прийому/передавання даних в каналах з підвищеною завадостійкістю.

Ключові слова: ентропія, спецпроцесори, теорія інформації, спектр сигналу, телекомунікаційні системи, завадозахищені сигнали, ентропійно-маніпульовані сигнали.

Вступ. З часу опублікування відомої статті Клода Шенона [1], в якій він визначив поняття ентропії, вона в основному використовувалася для оцінок інформаційних характеристик джерел інформації, повідомлень, каналів зв'язку, кодів [2] та іншого. З розвитком комп'ютерної та мікропроцесорної техніки її застосування стає все частішим в найрізноманітніших сферах. Так, оцінка ентропії використовується в системах діагностування медичного призначення [3], захисту даних в інформаційних каналах [4], завадозахищеному передаванні даних [5], для чисельної оцінки образного сенсу вербальних конструкцій [6].

Розширення сфери застосувань ентропійних оцінок потребує подальшого розвитку теорії, методів та пристроїв її визначення. Це обумовлюється потребою в адаптації самої оцінки у відповідності до конкретної сфери її використання, необхідністю підвищення точності та швидкості її розрахунку та іншими вимогами. В даній роботі проведено аналіз існуючих оцінок ентропії та представлено архітектуру вдосконаленого спецпроцесора обчислення ентропії, який характеризується

підвищеною швидкістю, що особливо актуально для кібер-фізичних систем реального часу, які використовують ентропійні характеристики.

Огляд літератури. Виокремленням теорії інформації в самостійний напрямок вважається стаття Клода Шенона «Математична теорія зв'язку» в технічному журналі Bell System, в якій математично сформульовані основні положення, в тому числі визначено поняття ентропії в її інформаційному аспекті. В подальшому вона була розвинута в його наступних публікаціях [7].

Л. Г. Лапи в своїх працях [8] відмітив, що необхідні детальні характеристики кореляційних зв'язків між різними символами для точнішого визначення ймовірнісних показників джерел інформації (ДІ). Він довів, що збільшення кореляційних зв'язків між станами ДІ, веде до збільшення нерівноймовірності розподілу умовної ймовірності у виразі визначення ентропії ДІ з залежними станами, що в свою чергу, призводить до зменшення ентропії джерела. Оскільки властивість ергодичних ДІ визначається розповсюдженням кореляційних зв'язків на скінченну кількість символів, то для визначення ентропії необхідно включити кореляційну функцію на цю скінченну кількість символів.

В роботі Л. Г. Лапи також звертається увага на те, що функція ентропії Шенона використовує виключно одновимірні розподіли імовірностей, в той час як кореляційна функція використовує двовимірні ймовірнісні розподіли. Тому принципово оцінка ентропії на базі кореляційної функції змістовніша, ніж функція ентропії Шенона.

До подібних висновків приходять Ж. Макс [9], визначаючи вплив коефіцієнта кореляції на оцінки ентропії. Ф. Г. Ланге [10] доводить, що врахування математичного сподівання двовимірної щільності ймовірності – кореляція, дозволяє точніше здійснити оцінку ентропії, ніж середні одновимірної щільності.

С. Голдман [11], розширюючи теорію інформації Шенона, доводить, що кореляційний аналіз зв'язує спектральну теорією з теорією інформації.

На базі доведень та висновків зазначених авторів, стає очевидним необхідність врахування кореляційних зв'язків у визначенні шенонівської оцінки ентропії. В подальшому, теорію визначення ентропії розвивав Николайчук Я. М. [12] та його наукова школа. Ним було запропоновано визначення ентропії на основі структурної функції Колмогорова [13], а в подальшому – на основі кореляційної функції еквівалентності [14]. Узагальнений аналіз та розвиток теорія побудови ентропійних моделей здійснено в роботі [15].

Мета роботи. Метою цієї роботи є вдосконалення спецпроцесорів визначення ентропії, які можуть використовуватися в телекомунікаційних системах для підвищення завадостійкості передачі сигналів. Для досягнення мети потрібно вирішити наступні завдання:

- аналіз оцінок визначення ентропії на основі кореляційних функцій;
- аналіз існуючих пристроїв визначення ентропії та їх характеристик;
- розробка методу визначення ентропії сигналів на основі їх частотного представлення;
- розробка структури спецпроцесора визначення ентропії спектральних характеристик сигналу.

Теоретичні положення визначення ентропії. Ентропія за Шеноном для дискретних сигналів визначається відомим виразом:

$$H = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \cdot \log_2 p(x_i) \quad (1)$$

де x_i – дискретні значення сигналу;

$p(x_i)$ – імовірність появи дискретного відліку x_i ;

n – загальна кількість відліків дискретного сигналу.

Д. Мідлтон [16] в розвиток шенонівської ентропії для дискретних сигналів, які

формується послідовністю символів довільної довжини в певному порядку розподілених в часі, запропонував власну оцінку ентропії. Для дискретного випадкового сигналу $X = \{x_i\}$, кожен із відліків якого x_i , може приймати одне з l_i різних значень ($1 \leq l_i \leq L; i = 1, 2, \dots, n$), отримав вираз для апіорної невизначеності $x_1, \dots, x_i, \dots, x_n$:

$$H(X) = -\sum_{l_1}^L \dots \sum_{l_n}^L p(X) \log p(X); \quad (2)$$

де сума здійснюється по всім можливим варіантам кожного з відліків x_i сигналу.

Для дискретних сигналів з статистично залежною послідовністю значень Д. Мідлтон запропонував вираз середньої умовної ентропії:

$$H(X/Y) = \sum_{l_1}^L \dots \sum_{l_n}^L \sum_{m_1}^M \dots \sum_{m_k}^M p(x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m) \cdot \log p(x_1, \dots, x_n / y_1, \dots, y_m); \quad (3)$$

де x_i, y_i – статистично залежні стани ДІ.

З останнього виразу випливає, що для розрахунку ентропії таких ДІ необхідно знати сумісні щільності імовірностей різного порядку $W_1(y_1, t_1), W_1(y_1, t_1; y_2, t_2), \dots, W_1(y_1, t_1; \dots; y_n, t_n)$. При вивченні статистичних характеристик сигналів обґрунтовано, що на практиці вони не є настільки статистично складними, щоб їх описувати багатомірними розподілами. Тому для достатньо повного опису ергодичних стаціонарних сигналів достатньо застосовувати тільки двомірні розподіли. Зрозуміло, що їх ентропія і швидкість передачі повідомлень, за рахунок кореляційних зв'язків між різними послідовностями символів і нерівномірності розподілу їх імовірності, виявляються меншими в порівнянні з ентропією Шенона.

Багаторазовими дослідженнями [17] реальних об'єктів управління і джерел інформації показано, що стохастичні параметри дискретних сигналів на локальних проміжках часу досить точно описуються моделлю гаусівського закону розподілу ймовірностей.

Оцінка ентропії джерел з корельованими станами, які мають гаусівський закон розподілу, визначається за виразом [15]:

$$h[x(t), x(t + \tau)] = \log_2 \left(2\pi\sigma_x^2 \sqrt{1 - \rho_{xx}^2(\tau)} \right) + \frac{1}{1 - \rho_{xx}^2(\tau)} \log_2 e - \frac{\rho_{xx}^2(\tau)}{1 - \rho_{xx}^2(\tau)} \log_2 e = \log_2 \left(2\pi e \sigma_x^2 \sqrt{1 - \rho_{xx}^2(\tau)} \right) \quad (4)$$

Розрахунок ентропії дискретного сигналу з нерівноймовірними корельованими станами здійснюється за виразом:

$$H[x_i, x_{i+j}] = \log_2 2\pi e + \log_2 \sigma_x^2 + \frac{1}{2} \log_2 [1 - \rho_{xx}^2(j)]; \quad (5)$$

де перший доданок є константою, що пов'язана із типом закону розподілу випадкової величини, другий доданок визначає дисперсію:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(x_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right)^2,$$

а третій елемент характеризує взаємну ентропію корельованих нерівноймовірних відліків сигналу на основі квадрату нормованої функції автокореляції:

$$\rho_{xx}(j) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(x_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right) \cdot \left(x_{i+j} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right)}{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(x_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right)^2}. \quad (6)$$

Розрахунок ентропії дискретного сигналу на базі нормованої автокореляційної функції $\rho_{xx}(j)$ є незручним при обчисленні в зв'язку з необхідністю центрування послідовності x_i у відповідності до (6). Тому для визначення ентропії сигналу пропонується на основі структурної функції Колмогорова і відповідно формула (5) набуде вигляду вигляду:

$$\begin{aligned} H(x_i, x_{i+j}) &= \log_2 2\pi e \sqrt{D_x^2 - D_x^2 \cdot \rho_{xx}^2(j)} = \\ &= \log_2 2\pi e + \frac{1}{2} \log_2 \left(\left[D_x^2 - R_{xx}(j) \right] \cdot \left[D_x^2 + R_{xx}(j) \right] \right); \end{aligned} \quad (7)$$

де $R_{xx}(j) = D_x \cdot \rho_{xx}(j)$ – кореляційна функція сигналу.

Кореляційна функція для стаціонарних процесів $R_{xx}(j)$ легко можна виразити через коваріаційну функцію $K_{xx}(j)$, яка швидше в обчисленні через відсутність операції центрування. Тоді визначення ентропії на основі коваріаційної функції матиме вигляд:

$$\begin{aligned} H(x_i, x_{i+j}) &= \log_2 2\pi e \sqrt{D_x^2 - D_x^2 \cdot \rho_{xx}^2(j)} = \\ &= \log_2 2\pi e + \frac{1}{2} \log_2 \left(\left[D_x - K_{xx}(j) \right] \cdot \left[D_x + K_{xx}(j) \right] \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Аналітичне співвідношення структурної та автокореляційної функцій визначається виразом

$$C_{xx}(j) = 2 \left| D_x + M_x^2 - K_{xx}(j) \right| = 2 \left[D_x - R_{xx}(j) \right]$$

Підставивши його в (7), отримаємо оцінку ентропії:

$$H(x_i, x_{i+j}) = \log_2 2\pi e + \frac{1}{2} \log_2 \left[\frac{C_{xx}(j)}{2} \left(2D_x - \frac{C_{xx}(j)}{2} \right) \right]. \quad (9)$$

Якщо визначити середнє значення ентропії сигналу, отримаємо робочу формулу міри ентропії

$$\overline{H(x_i, x_{i+j})} = \frac{1}{2T} \sum_{j=1}^T \log_2 (2\pi e)^2 \left[\frac{C_{xx}(j)}{2} \left(2D_x - \frac{C_{xx}(j)}{2} \right) \right],$$

або

$$\overline{H(x_i, x_{i+j} x_i)} = \frac{1}{2T} \sum_{j=1}^T \log_2 (2\pi e)^2 \left[C_{xx}(j) \left(D_x - \frac{C_{xx}(j)}{4} \right) \right]; \quad (10)$$

де T – інтервал усереднення.

Дослідження властивостей ентропії дискретних сигналів. Ентропія кожного окремого відліку дискретного сигналу за Шеноном визначається виразом:

$$H_i = - p(x_i) \cdot \log_2 p(x_i). \quad (11)$$

де $p_i = \frac{n_i}{N}$ – імовірність появи i -го відліку; H_i

n_i – кількість відліків x_i з загальної вибірки сигналу.

Якщо прийняти, що загальна кількість відліків дискретного сигналу N , то для зручності подальшого дослідження (11) можна переписати в іншому вигляді:

$$H = -\frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N} = \frac{n_i}{N} (\log_2 N - \log_2 n_i). \quad (12)$$

З даного виразу (12) можна визначити розподіл ентропії при різних кількостях появи x_i значення. Якщо для наочності представлення результатів прийняти $N = 256$ і вважати, що всі дискретні відліки є статистично незалежними, тоді графік ентропії згідно (12) матиме вигляд представлений на рис. 1, де по осі абсцис відраховується кількість значень x_i з загального об'єму вибірки N , а по осі ординат – відповідне значення ентропії.

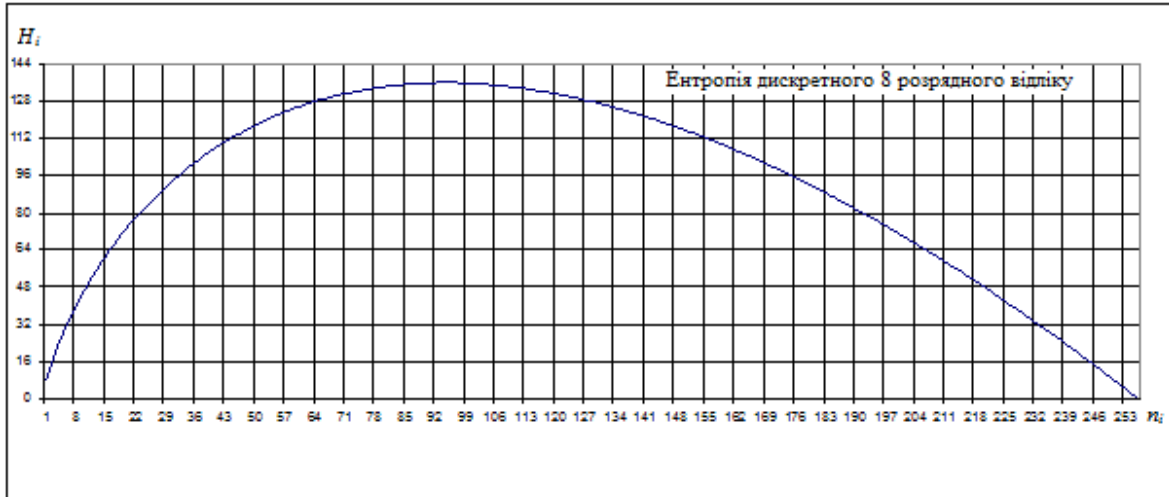


Рис 1. Графік ентропії при різних значеннях n_i появи x_i , для $n_i = \overline{1, N}$

Як видно з представленою графіку на рис. 1 та проведених розрахунків, максимальне значення ентропії буде при $n_i = 94$, при всіх інших значеннях n_i ентропія приймає попарно однакові значення. Цю властивість можна використати для побудови АЦП та спецпроцесорів для отримання ентропійно-маніпульованих сигналів.

До цього часу розглядалися міри визначення ентропії амплітуди сигналів. Проте відомо, що цифрова обробка сигналів здійснюється в основному в їх частотному представленні. Тому природним розвитком є визначення ентропії для спектральних характеристик сигналу, тобто визначається ентропія спектральних значень.

Якщо деякий сигнал представлений в часовому просторі:

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} s(i \cdot \Delta t) \cdot s_0(t - \Delta t),$$

де $s(t)$ – аналоговий сигнал;

Δt – крок дискретизації,

то його спектральна характеристика буде мати вигляд:

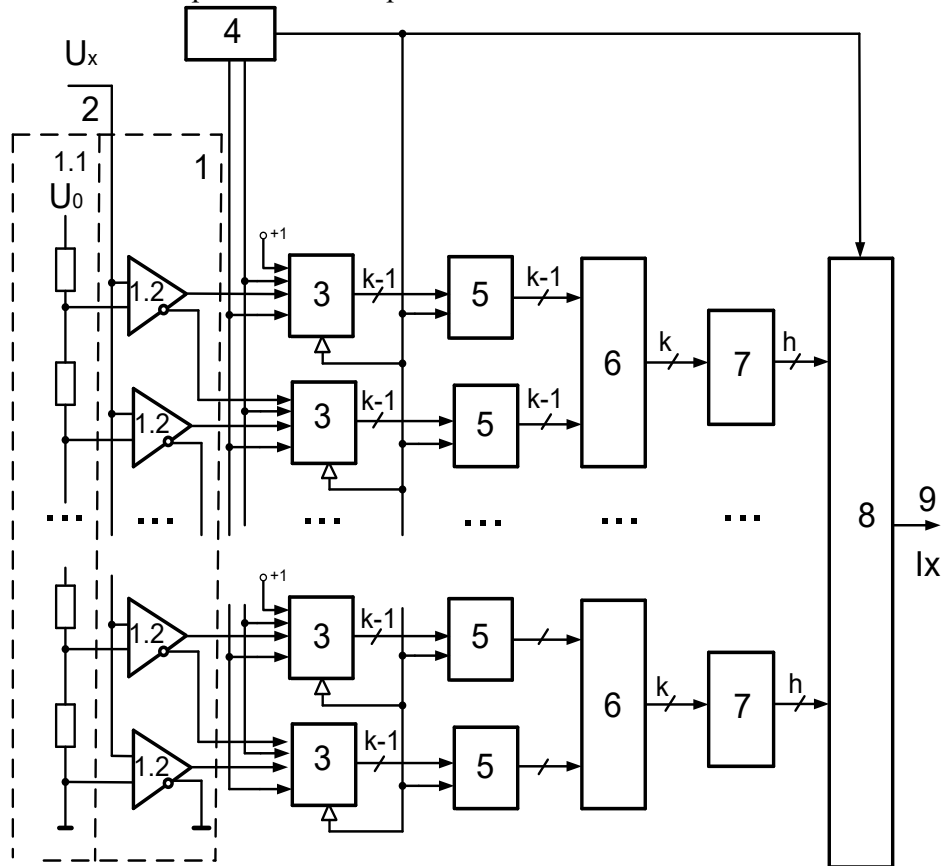
$$S(\omega) = \frac{s(t)}{\Delta t} \sum_{j=-\infty}^{\infty} S\left(\omega - \frac{2 \cdot \pi \cdot j}{\Delta t}\right).$$

Якщо повернутися до прийнятих позначень дискретного сигналу: $x_i = s(\Delta t \cdot i)$, то йому буде відповідати дискретна частотна характеристика: $s_j = S(\Delta \omega \cdot j)$. Відповідно, при обчисленні ентропії будемо використовувати замість значень ймовірностей відліків амплітуди сигналу $p(x_i)$, значення ймовірностей його спектру $p(s_j)$. Тоді ентропія спектру сигналу буде визначатись за виразом:

$$H_i = - p(s_j) \cdot \log_2 p(s_j). \quad (13)$$

Таким чином, для організації ліній передачі даних на основі ентропійно-маніпульованих сигналів можна досягнути високої завадозахищеності, оскільки завади на певних частотах не будуть призводити до критичної зміни ентропії спектру. Для реалізації таких ліній зв'язку на основі ентропійно-маніпульованих сигналів, в яких ентропія визначається не по амплітудних, а частотних характеристиках сигналу необхідно спроектувати відповідний спецпроцесор для обчислення ентропії спектру.

Структура спецпроцесора визначення ентропії частотних характеристик сигналів та його функціонування. Структура розробленого спецпроцесора базується на прототипі, схему якого подано на рис. 2 [18]. Представлений пристрій складається з АЦП 1, на вхід якого подається вхідний сигнал $x(t)$, який фактично нормалізований до відповідного діапазону напруги U_x . Дискретизовані значення з АЦП надходять на входи лічильників 3, робота яких узгоджується синхронізатором 4, відповідні значення підраховані лічильниками значення через визначену кількість тактів передаються в регістри пам'яті 5, шифраторів а з них на пірамідальні суматори 6. Отримані суми перетворюються шифраторами 7 у відповідний код та подаються на входи пірамідального суматора, на виході якого формується значення ентропії сигналу, позначеного на рисунку I_x . В якості компонентів суматорів 6 та пірамідального суматора 8 використаний й однорозрядний двійковий суматор з прямими входами та виходами структурна схема якого представлена на рис. 3.



1 - АЦП, 2 - інформаційний вхід пристрою, 1.1 - група взірцевих резисторів, 1.2 - компаратори з парафазними виходами (прямим та інверсним), 3 - лічильники, 4 - синхронізатор, 5 - регістри пам'яті, 6 - суматори; 7 - шифратори, 8 - пірамідальний суматор, 9 - вихід пристрою

Рис. 2. Структурна схема пристрою визначення ентропії із застосуванням парафазних компараторів

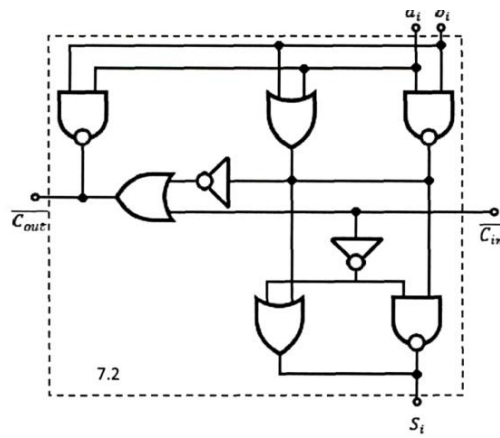
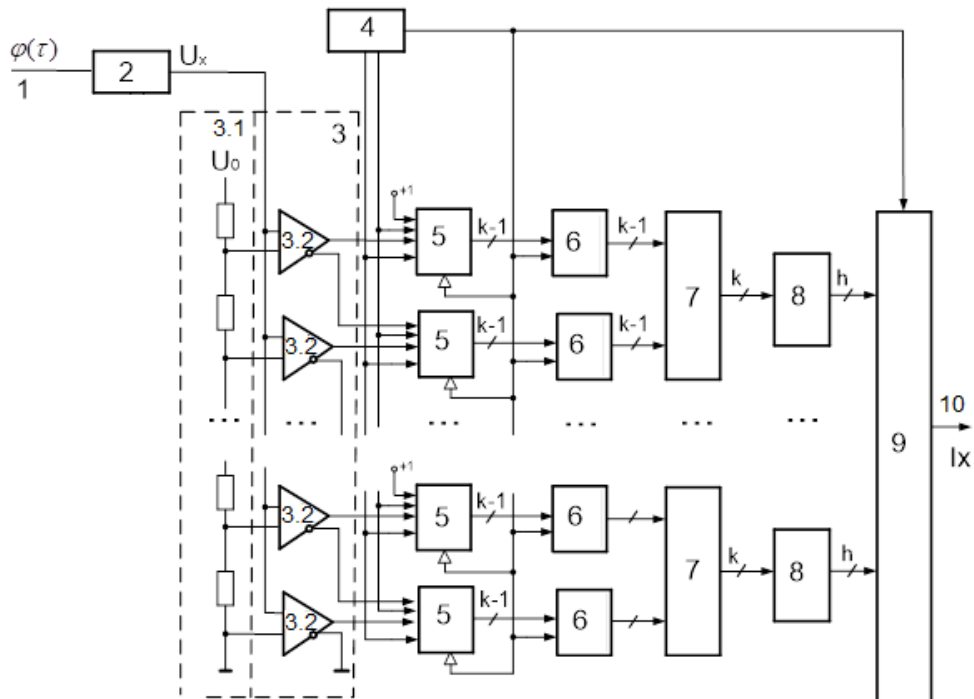


Рис. 3. Структура двійкового суматора з прямими входами та виходами

Підвищення швидкодії досягається застосуванням парафазних компараторів, швидкодія яких на порядок вища за традиційні JK-тригери, а також впровадженням паралельної обробки результатів через два $(k-1)$ -розрядні регістри пам'яті та k -розрядний суматор з часовим зсувом тактування. Завдяки цим удосконаленням, загальна швидкодія пристрою зросла приблизно у три рази

В розробленому спецпроцесорі (рис. 4), на відміну від представленого на рис. 2, пропонується визначати ентропію частоти сигналу. На вхід пристрою подається значення спектральної характеристики, які за допомогою перетворювача частоти 2 приводяться до сигналу напруги U_x яка передається на вхід АЦП 3. Подальша робота пристрою аналогічна до прототипу представленого на рис.2.



1 – вхід пристрою, 2 – перетворювач частот, 3 - АЦП, 3.1 – група взірцевих резисторів, 3.2 - компаратори з парафазними виходами, 4 - синхронізатор, 5 – лічильники, 6 – регістри пам'яті, 7 – суматори; 8 – шифратори, 9 - пірамідальний суматор, 10 – вихід пристрою.

Рис. 4. Структурна схема спецпроцесора визначення ентропії частотних характеристик сигналу

Визначення ентропії по частоті сигналу дозволяє підвищити криптографічну стійкість та завадозахищеність передавання інформації.

В результаті, на виході запропонованого пристрою отримуємо ентропію не амплітуди сигналу, а його частотної характеристики. Це забезпечить завадостійкість сигналу, що передається, навіть при наявності сильних завад на відповідних частотах. Це обумовлено тим, що при спотворенні сигналу на певних частотах його амплітудна характеристика сильно зміниться, проте на ентропію частоти це значно не вплине.

Очевидно, що запропонований пристрій втрачатиме у швидкодії, проте характеризується розширеними функціональними можливостями за рахунок визначення ентропії частоти сигналів. Його можна використовувати у системах прийому/передавання даних в каналах з підвищеною завадостійкістю.

Висновки. В роботі представлено перспективи розвитку та застосування ентропійного аналізу. Здійснено узагальнення теоретичного розвитку визначення ентропії та проаналізовано можливості їх застосування в різних сферах. Досліджено властивості ентропії дискретних сигналів та запропоновано її використання для створення завадозахищених каналів передачі даних. Для швидкого розрахунку ентропії сигналів представлено спецпроцесори визначення ентропії. Також запропоновано використовувати ентропійно-маніпульовані сигнали, які базуються на розрахунку ентропії не амплітуди сигналів, а їх спектральних характеристик. Розроблено архітектуру спецпроцесора для обчислення ентропії частотних характеристик дискретних сигналів.

Список літератури

1. Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379–423, 623–656.
2. Николайчук Я.М. Теорія джерел інформації. Тернопіль: ТНЕУ, 2008. 536с.
3. Мельничук С.І., Василик В.М. Можливості використання оцінок ентропії при опрацюванні сигналів в інформаційних діагностичних системах. *Вісник Хмельницького національного університету* '2011. №3. С. 175—179.
4. Мельничук С. І., Козленко М. І., Гарматій О. Б. Ентропійні методи захисту даних в інформаційних каналах комп'ютерних систем. *Проблемно-наукова міжгалузева конференція Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання. Бучач, Україна. 2008.* URL: DOI: 10.5281/zenodo.5520045
5. Козленко М. І., Мельничук С. І. Дослідження завадостійкості способу передавання та приймання інформації на основі широкосмугових сигналів зі змінною ентропією для дискретних повідомлень. *Електроніка та зв'язок. 2007. № 2(37). С. 82 - 92.*
6. Бісікало О. В., Кондратюк Н.В. Застосування поняття ентропії для чисельної оцінки образного сенсу вербальних конструкцій. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/28825/1/verbal%20constructions.pdf>
7. Шенон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: Иностранная литература, 1963, 830с.
8. Лапа В. Г. Математичні основи кібернетики. К.: «Вища школа», 1974. 452с.
9. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: М.: Мир, 1983. Т. 1. 311 с.; Т. 2. 256 с.
10. Ланге Ф. Статистические аспекты построения измерительных систем. М.: Радио и связь, 1981. 168с.
11. Голдман С. Теория информации. М.: Изд-во иностранной литературы, 1975. 382 с.
12. Николайчук Я.М. Розробка теорії і комплексу технічних засобів формування, передачі і обробки цифрових повідомлень в низових обчислювальних мережах автоматизованих систем: дис.д-ра .техн. наук. Івано-Франківськ, ІФІНГ, 1991. 573 с
13. Колмогоров А. Н. Теория вероятности и математическая статистика. М.: Наука, 1986. 534 с.

14. А. с. 1317455 СССР, МКИ G 06 F 15/36. Многоканальное устройство для вычисления функции эквивалентности./ Я.Н. Николайчук и С.М. Ищеряков; Оpubл. 30.04.87, Бюл. № 22.
15. Сегін А. І., Николайчук Я. М. Сабадаш І. О. Теорія побудови ентропійних моделей складних об'єктів управління на базі кореляційних функцій. Оптико-електрон. інформ.-енерг. технології. 2002. № 1. С. 69-79.
16. Миддлтон Д. Введение в статистическую теорию связи. М: Советское радио, 1961. 768 с
17. Кузьмин И. В., Кедрус В. А. Основы теории информации и кодирования. К.: Выща школа, 1986. 238 с
18. Николайчук Я.М., Сегін А.І., Возна Н.Я., Грига В.М. Пристрій для визначення ентропії: Пат.156501 Україна МПК G06F 17/10 (2006.01). № u2023 05558 заявл. 20.11.2023; опубл. 03.07.2024 Бюл. №27.

METHODS AND SPECIAL PROCESSORS FOR DETERMINING THE ENTROPY OF THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF SIGNALS

A. I. Segin¹, O. M. Zastavny², N. Ya. Vozna³, Yu.I. Popyk⁴

West Ukrainian National University
11, Lvivska Str., Ternopil, 46009, Ukraine
Emails: andriy.segin@gmail.com¹, olegz80@gmail.com², nvozna@ukr.net³,
yup@wunu.edu.ua⁴

Entropy analysis is an effective tool that can be used in a wide variety of fields of science and technology. Today, it is somewhat underestimated, due to the development of other information technologies, such as neural networks, artificial intelligence, big data processing methods, and others. However, the use of entropy can be combined with the listed information technologies, achieving good results. In addition, entropy estimation can be used as an independent tool for analyzing the information characteristics of signals. In the modern world, information plays an increasingly important role in all areas of human activity. With the development of the Internet, communication and computer networks, mobile communications and other wireless telecommunication technologies, the amount of information that needs to be processed is constantly growing. At the same time, entropy estimation in its various variations, as one of the elements of information theory, is a powerful tool for processing and analyzing the information characteristics of data streams. The presented article accumulates disparate information on various estimates of entropy and shows the development of theoretical positions. The study of the properties of entropy of discrete signals is also presented. The possibility of organizing data transmission lines based on entropy-manipulated signals is shown, due to which it is possible to achieve high noise immunity. In addition, it is proposed to use entropy-manipulated signals, which are based on calculating the entropy not of the amplitude of signals, but of their spectral characteristics. To determine the entropy of the signal spectrum, the structure of a special processor has been developed and the principle of its operation is described. Determining entropy by signal frequency allows to increase cryptographic stability and noise immunity of information transmission. The proposed special processor is intended for use in data reception/transmission systems in channels with increased noise immunity.

Keywords: entropy, special processors, information theory, signal spectrum, telecommunication systems, noise-protected signals, entropy-manipulated signals.