«Системні технології» 2 (145) 2023 «System technologies»
DOI 10.34185/1562-9945-2-145-2023-10
УДК 004.627

Є.С. Сулема, А.І. Дичка

ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ БАГАТОКОЛІРНИХ ШТРИХКОДОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Анотація. Багатоколірні штрихові коди дозволяють у декілька разів підвищити інформаційну щільність подання даних порівняно з чорно-білими штриховими кодами. Однак, при цьому ускладнюються процеси розпізнавання та декодування багатоколірних штрихкодових зображень. Метою дослідження є розробити систему контролю спотворень графічних компонентів багатоколірного штрихкодового зображення, яка б забезпечувала надійне відтворення даних при скануванні багатоколірного штрихового коду великої ємності. Показано, що для надійного зберігання даних в багатоколірних штрихкодових зображеннях великої ємності необхідно проєктувати ШК-позначки з двома рівнями забезпечення завадостійкості. Запропоновано метод підвищення завадостійкості багатоколірних штрихових кодів, який ґрунтується на застосуванні дворівневого контролю помилок з використанням двох многозначних коректувальних кодів: коду БЧХ – на рівні штрихкодових знаків (нижній рівень), та коду Ріда-Соломона – на рівні штрихкодової позначки (верхній рівень). Це дає можливість створювати багатоколірні штрихові коди з поліпшеними характеристиками завадостійкості, які забезпечують надійне відтворення даних під час сканування багатоколірних штрихкодових зображень великої ємності в системах автоматичної ідентифікації.

Ключові слова: штрихове кодування, багатоколірні штрихові коди, многозначний код БЧХ, код Ріда-Соломона, автоматична ідентифікація.

Постановка проблеми

Штрихове кодування даних є одним з видів автоматичної ідентифікації. Маючи безперечні переваги – високу швидкість введення даних, низьку вартість виготовлення штрихкодових позначок (ШК-позначок), зручність застосування – штрихкодова технологія дозволяє значно повніше реалізувати можливості автоматизованих систем керування. Пройшовши певну еволюцію – лінійні штрихові коди (ШК), стекові, матричні – штрихкодова технологія автоматичної ідентифікації продовжує бути перспективною комп'ютерною технологією, яка охоплює дедалі ширші сфери людської діяльності. Протягом останнього десятиліття спостерігається стійка тенденція до розширення сфери

© Сулема Є.С., Дичка А.І., 2023

застосування багатоколірних штрихових кодів, оскільки багатоколірні штрихкодові зображення дозволяють у декілька разів підвищити інформаційну щільність подання даних порівняно з чорно-білими ШК без зміни геометричних розмірів елементів зображення [1 - 5, 8]. Однак, при застосуванні багатоколірних ШК ускладнюються процеси розпізнавання та декодування штрихкодових зображень. Дослідники в [4 - 7] зазначають, що причинами цього можуть бути: спотворення геометричних розмірів елементів зображення з різним забарвленням під час зчитування через певні оптичні ефекти; старіння барвників; згортання та розпливання фарби при виготовленні ШК-позначок тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Предметом дослідження в [6] стала спектральна відмінність в колірних каналах пристроїв друкування ШК-позначок, де використовують колірну палітру C, M, Y (C – cyan, блакитний; M – magenta, пурпуровий; Y – yellow, жовтий), та колірних каналах пристроїв зчитування ШК-позначок, в яких використовують палітру R, G, B (R – red, червоний; G – green, зелений; B – blue, синій). Щоб пом’якшити вплив міжканальних завад в колірних каналах при друкуванні ШК-позначок та колірних каналів пристроїв зчитування, автори розробили алгоритм усунення завад при реалізації процесів друкування та сканування. Внаслідок цього вдалось істотно знизити ймовірність помилок та підвищити швидкість декодування.

Інші дослідники, зокрема в [9, 10] запропонували способи збільшення інформаційної щільності QR-кодів за рахунок використання в структурі QR-коду багатоколірності штрихкодових елементів, а в працях [1, 11] пропонується застосовувати мультиплексування та багатошаровість колірних штрихкодових зображень.

У багатоколірному штриховому кодуванні надзвичайно важливою є проблема забезпечення завадостійкості штрихкодових зображень. Аналіз останніх досліджень і публікацій, зокрема [2, 12, 13 - 15], в яких започатковано розв’язання даної проблеми, свідчить про те, що комплексне вирішення даного питання відсутнє, наявні лише окремі пропозиції, що не утворюють єдиного цілого. Невирішеним завданням є відсутність системного підходу при забезпеченні надійності зберігання інформації у вигляді багатоколірних ШК.

Мета дослідження

Для забезпечення надійного зберігання даних в багатоколірних штрихкодових зображеннях великої ємності (декілька тисяч алфавітно-цифрових

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

символів) необхідно проєктувати ШК-позначки з двома рівнями завадостійкості: 1) нижній рівень (рівень найменших структурних одиниць – ШК-знаків, коли ШК-знаки створюють так, щоб вони мали властивість завадостійкості у випадку спотворення одного-двох елементів знака; 2) верхній рівень (рівень усієї ШК-позначки), коли у випадку спотворень певної кількості ШК-знаків, таких, які неможливо усунути в межах нижнього рівня, забезпечується цілісність зчитуваних даних.

Метою дослідження є створення системи контролю спотворень компонентів багатоколірного штрихкодового зображення, яка б забезпечувала надійне відтворення даних при скануванні багатоколірного штрихового коду великої ємності.

Виклад основного матеріалу дослідження

Структурно ШК-позначка складається з масиву ШК-знаків, упорядкованих у вигляді прямокутника або квадрата (рис. 1).

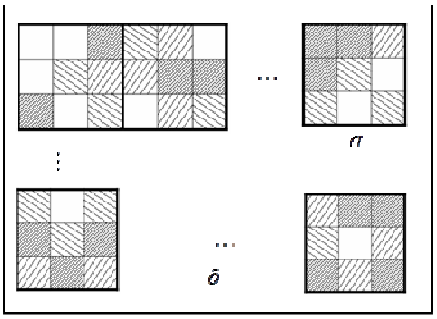


Рисунок 1 - Структура багатоколірної штрихкодової позначки:
а – ШК-знак; *б* – ШК-позначка

Будь-який ШК має свій набір ШК-знаків, кожен з яких позначає символ (або комбінацію символів) комп'ютерного алфавіту. Цей набір ШК-знаків називають символікою штрихового коду.

Нехай необхідно створити символіку завадостійкого багатоколірного матричного ШК з параметрами q, s; де q – кількість використовуваних кольорів для розфарбовування елементів ШК-знака, коли $q>2$; s – кількість елементів (чарунок) у ШК-знаку (див. рис. 1).

Кольори, якими можуть бути забарвлені елементи ШК-знаків, позначатимемо цифрами: 0, 1, 2, ..., q-1. ШК-знаку, що складається з s елементів, поставимо у відповідність цифровий еквівалент – вектор ШК-знака

$Z=(z_0z_1...z_{s-1})$, де $z_i \in \{0, 1, 2, ..., q-1\}$.

Для того, щоб ШК-знак був завадостійким, його вектор Z має бути кодовим словом многозначного ($q>2$) коректувального коду, здатного виправляти

спотворення (помилки). Вважатимемо, що під час зчитування з носія ШК-знаків найбільш ймовірними є випадки ушкодження (спотворення) одного або двох елементів у межах ШК-знака. У такому разі вектор Z ШК-знака має бути кодовим словом коректувального коду з мінімальною кодовою відстанню $d_{\min}$=5. Таким коректувальним кодом може бути многозначний (q-ковий) код БЧХ (код Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема), q>2.

Код БЧХ є циклічним коректувальним кодом, у якому кодування інформації зводиться до множення многочлена $B(x)=\sum_{i=0}^{u-1} b_i x^i$ степеня u-1, який відповідає q-ковому u-розрядному інформаційному слову $B=(b_0 b_1 \cdots b_{u-1})$, на твірний (генераторний) многочлен $g(x)=\sum_{i=0}^{v} g_i x^i = g_0+g_1 x+\ldots+g_v x^v$ степеня v:

$$Z(x)=B(x)g(x),$$

де $Z(x)=\sum_{i=0}^{s-1} z_i x^i$ - многочлен степеня s-1, що відповідає s-розрядному q-ковому кодовому слову $Z=(z_0 z_1 \cdots z_{s-1})$, який є цифровим еквівалентом ШК-знака; $s = u + v$; $b_i, g_i, z_i \in GF(q)$ [15].

Якщо відомий твірний многочлен $g(x)$, то твірну матрицю $G_{(s,u)}$ (s, u)-коду БЧХ подають у вигляді:

$$G_{(s,u)}=\begin{Vmatrix} g(x) \\ xg(x) \\ \vdots \\ x^{u-1}g(x) \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} g_0 g_1 \ldots & g_v & 0 & \ldots 0 \\ 0 & g_0 \ldots & g_{v-1} & g_v 0 \cdots 0 \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 \ \ldots 0 & g_0 & g_1 \ \ldots g_v \end{Vmatrix},$$

вона має розмірність $u\times s$.

Деякі q-кові (q>2) повні коди БЧХ з $d_{\min}$=5 наведено в табл. 1. Код БЧХ називають повним, якщо $s=q^m$-1.

Нехай q=4 (випадок 4-колірного ШК). Розглянемо, наприклад, четвірковий (15, 9)-код БЧХ (див. табл. 1).

Для побудови такого коду використовують два поля: $GF(2^2)$ – поле символів (рис. 2) та $GF((2^2)^2)$ – поле локаторів (табл. 2), яке є розширенням над $GF(2^2)$.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Таблиця 1

Деякі повні q-кові (s, u)-коди БЧХ

Кількість кольорів	q=3	q=4	q=5	q=7	q=8
Поле символів	$GF(3)$	$GF(2^2)$	$GF(5)$	$GF(7)$	$GF(2^3)$
(s, u)-код БЧХ	(8, 3)- (26, 17)-	(15, 9)-	(24, 16)-	(48, 40)-	(63, 55)-
Поле локаторів	$GF(3^2)$ $GF(3^3)$	$GF((2^2)^2)$	$GF(5^2)$	$GF(7^2)$	$GF((2^3)^2)$

У полі $GF(2^2)$ оперують з чотирма символами: 0, 1, 2, 3.

На основі твірної матриці $G_{(15,\ 9)}$ коду БЧХ з $d_{\min}$=5 можна побудувати символіку завадостійкого штрихового коду з можливістю корекції двократних помилок у ШК-знаках.

Для цього u-розрядне інформаційне q-кове слово $B=(b_0 b_1 \dots b_{u-1})$ необхідно перетворити в s-розрядне кодове слово $Z=(z_0 z_1 \dots z_{s-1})$, яке є вектором (цифровим еквівалентом) ШК-знака, тобто закодувати слово B (s, u)-кодом БЧХ, а потім вектору Z поставити у відповідність ШК-знак.

Операцію кодування задають рівнянням $Z=B\cdot G_{(s,u)}$ та виконують за правилами поля $GF(2^2)$.

ШК-знаки наносять на носій, формуючи ШК-позначку.

На основі твірної матриці $G_{(15,\ 9)}$ коду БЧХ можна побудувати символіку ШК потужності 4^9=262144 ШК-знаки. Однак, для практичних потреб штрихового кодування даних необхідно мати символіки менших потужностей. Для їх отримання слід розглядати скорочені (неповні) коди БЧХ.

Щоб отримати скорочений код БЧХ необхідно скоротити твірну та перевірну матриці повного коду БЧХ (всі зазначені в табл. 1 коди є повними).

Наприклад, якщо в твірній матриці $G_{(15,\ 9)}$ повного (15, 9)-коду БЧХ викреслити два крайні стовпці справа та 2 нижні рядки, а в перевірній матриці $H_{(15,9)}$ – два стовпці справа, то отримаємо твірну матрицю $G_{(13,\ 7)}$ та перевірну матрицю $H_{(13,7)}$ четвіркового скороченого (13, 7)-коду БЧХ.

Послідовно викреслюючи в $G_{(15,\ 9)}$ праві стовпці та нижні рядки, а в $H_{(15,9)}$ – відповідні праві стовпці, отримаємо низку четвіркових скорочених кодів БЧХ: (14, 8)-; (13, 7)-; (12, 6)-; (11, 5)-; (10, 4)-; (9, 3)-; (8, 2)-.

На основі цих скорочених кодів БЧХ можна синтезувати символіки завадостійких штрихових кодів різної потужності.

Наприклад, на основі твірної матриці $G_{(9,\ 3)}$ (рис. 3), отриманої з $G_{(15,\ 9)}$, побудуємо символіку чотириколірного завадостійкого штрихового коду з можливістю корекції двократних помилок у ШК-знаках.

$$G_{(9,3)}=\left\|\begin{array}{ccccccccc} z_0 & z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 & z_6 & z_7 & z_8 \\ 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 2 & 1 & 1 & 3 & 1 \end{array}\right\|$$

$$H_{(9,3)}=\left\|\begin{array}{ccccccccc} z'_0 & z'_1 & z'_2 & z'_3 & z'_4 & z'_5 & z'_6 & z'_7 & z'_8 \\ 0 & 1 & 1 & 3 & 1 & 0 & 2 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 & 2 & 1 & 2 & 0 & 3 & 3 \\ 0 & 1 & 1 & 2 & 1 & 0 & 3 & 3 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 0 & 3 & 3 & 1 & 3 & 0 \\ 0 & 3 & 2 & 2 & 3 & 0 & 3 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 0 & 2 & 1 & 1 & 2 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 1 & 3 & 1 & 0 & 2 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 3 & 1 & 0 & 2 & 2 & 1 & 2 \end{array}\right\|$$

Рисунок 2 - Твірна (*G*) та перевірна (*H*) матриці четвіркового скороченого (9, 3)-коду БЧХ

ШК-знаки складаються з 9-ти елементів (рис. 4), кожен елемент може бути розфарбований одним з чотирьох кольорів. ШК-знаку відповідає 9-розрядний вектор ШК-знака $Z=(z_0z_1z_2z_3z_4z_5z_6z_7z_8)$.

Для отримання вектора ШК-знака $Z=(z_0z_1\ldots z_8)$ необхідно виконати множення інформаційного слова $B=(b_0b_1b_2)$ на твірну матрицю $G_{(9,3)}$ в полі $GF(2^2)$ (див. рис. 2): $Z=B\cdot G_{(9,3)}$.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

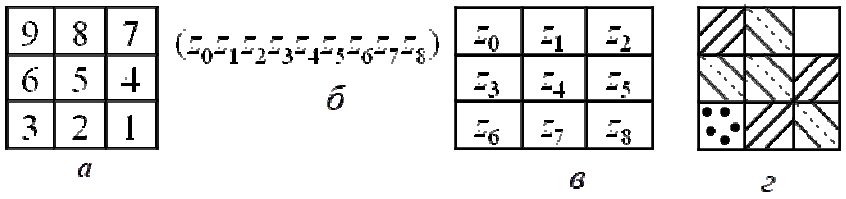


Рисунок 3 - Формування ШК-знаків 4-колірного завадостійкого ШК з можливістю виправлення двократних спотворень (помилок) у ШК-знаках: *а* – структура ШК-знака; *б* – вектор ШК-знака; *в* – порядок заповнення ШК-знака; *г* – ШК-знак, якому відповідає вектор *Z*=(2 3 0 3 3 2 1 2 3)

Нехай *B*=(2 0 3).

Тоді: z_0=2·1+0·0+3·0=2; z_1=2·2+0·1+3·0=3; z_2=2·2+0·2+3·1=0; z_3=2·1+0·2+3·2=3; z_4=2·1+0·1+3·2=3; z_5=2·3+0·1+3·1=2; z_6=2·1+0·3+3·1=1; z_7=2·0+0·1+3·3=2; z_8=2·0+0·0+3·1=3.

Отже, *Z*=(2 3 0 3 3 2 1 2 3).

Ми отримали кодове слово в несистематичній формі (місцезнаходження контрольних розрядів – невідоме).

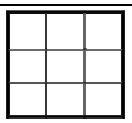
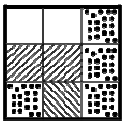
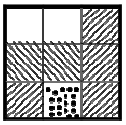
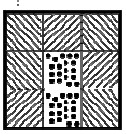
Отриманому кодовому слову *Z* відповідає ШК-знак на рис. 4*г*.

Беручи всі можливі значення інформаційного слова *B* – від 0 0 0 до 3 3 3 та виконуючи множення слова *B* на матрицю $G_{(9,3)}$ отримаємо 4^3=64 різні ШК-знаки, які утворюють символіку завадостійкого 4-колірного ШК, в якому в ШК-знаках при їх зчитуванні з носія можливе виправлення одно- або двократних спотворень елементів (помилок) (табл. 2). Цій символіці можна поставити у відповідність числову множину Ω={0, 1, 2, …, 62} (ШК-знак, якому відповідає *B* = 0 0 0, не використовується).

Для створення ШК-позначки алфавітно-цифрову послідовність, яка підлягає поданню в штрихкодовому вигляді, перетворюють у числову форму, використовуючи числа з діапазону 0 – 62, а потім кожному числу ставлять у відповідність ШК-знак з табл. 2. Далі ШК-знаки наносять на носій.

Таблиця 2

Структура символіки 4-колірного завадостійкого ШК з можливістю виправлення двократних помилок у ШК-знаках

Інформаційне слово	Вектор ШК-знака	ШК-знак	Номер ШК-знака в символіці
000	000000000		–
001	001221131		0
002	002332212		1
⋮		⋮	
333	323312213		62

Нехай у штрихкодовому вигляді необхідно подати k ШК-знаків, що утворюють інформаційне слово $A=(a_{k-1}\ a_{k-2}\ldots\ a_1\ a_0)$, якому поставимо у відповідність многочлен $a(x)=\sum_{i=0}^{k-1} a_i x^i$. Кожен ШК-знак утворено на основі коду БЧХ. Для забезпечення цілісності даних (оскільки ШК-позначка є відкритим носієм інформації, що може піддаватися небажаним зовнішнім впливам, завадам) застосуємо коректувальний код Ріда-Соломона, який долучає до інформаційного слова A r контрольних розрядів. Внаслідок цього на носій буде нанесено n ШК-знаків, які утворюють кодове слово $C=(c_{n-1}\ a_{n-2}\ldots\ c_1\ c_0)$, якому поставимо у відповідність многочлен $c(x)=\sum_{j=0}^{n-1} c_j x^j$, де $n-k=r$. Слово C отримують як результат процедури кодування: $c(x)=a(x)\ \varphi(x)$, де $\varphi(x)$ – твірний многочлен коду Ріда-Соломона. Вважатимемо, що операції над коефіцієнтами многочленів виконують за модулем простого числа P. Якщо потужність символіки ШК становить $W=q^u$ ШК-знаків, то P має задовольняти умову $P<W$. При цьому P ШК-знаків символіки використовують для подання даних на носії, а решта $R=W-P$ ШК-знаків є службовими, і використовуються для настроювання сканера штрихового коду. Вважатимемо, що максимальна ємність ШК-позначки не перевищує P-1 ШК-знаків, тобто $n\leqslant P$-1.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Твірний многочлен $\varphi(x)$ коду Ріда-Соломона визначають як

$$\varphi(x)=(x-\beta)(x-\beta^2)\cdot\ldots\cdot(x-\beta^r)=x^r+\varphi_{r-1}x^{r-1}\cdot\ldots\cdot\varphi_1x+\varphi_0,$$

де β – примітивний елемент поля $GF(P)$. Примітивним елементом поля $GF(P)$ є ціле число всі можливі степені якого за модулем P дають всі ненульові елементи поля, тобто числа 1, 2, … , P-1.

Код Ріда-Соломона має мінімальну кодову відстань $d^*=n-k+1=r+1$. З іншого боку, відомо, що коректувальний код з мінімальною кодовою відстанню d^* дозволяє декодувати будь-яку конфігурацію з t помилок та ρ стирань за умови, що $d^* \geqslant 2t+1+\rho$, де під помилкою розуміють таке спотворення у слові C, коли не відоме ні його місцезнаходження у слові, ні його величина; а під стиранням – спотворення, місцезнаходження якого у слові відоме, але не відома тільки його величина (у данному разі стирання є математичним поняттям, а не фізичним) [16].

Отже,

$$r \geqslant 2t+\rho \qquad (1)$$

Це співвідношення дає можливість користувачу обирати потрібну кількість контрольних розрядів для захисту цілісності даних залежно від ємності ШК-позначки та середовища використання штрихового коду, регулюючи таким чином рівень захищеності.

Наприклад, якщо є потреба виправляти в словах t = 2 помилки та ρ=3 стирання, то кількість контрольних розрядів має становити 7.

Зі співвідношення (1) випливає, що для корекції кожної помилки в коді Ріда-Соломона витрачаються два контрольні розряди, а для корекції кожного стирання – один контрольний розряд.

Нехай у штрихкодовому вигляді необхідно подати повідомлення, якому відповідають 6 ШК-знаків чотириколірного ШК, символіка якого наведена в табл. 2. Вважатимемо, що в цій символіці для подання даних використовують 59 ШК-знаків, занумерованих від 0 до 58, а решта ШК-знаків – службові. Невелика довжина повідомлення (6 ШК-знаків) обрана для спрощення прикладів кодування-декодування; реальні ШК-позначки у своєму складі налічують від кількох сотень до кількох тисяч ШК-знаків.

Вважатимемо,що повідомленню відповідає 6-розрядне інформаційне слово $A=(a_5a_4a_3a_2a_1a_0)=(31\quad 28\quad 0\quad 12\quad 58\quad 4)$, розряди якого є цифровими еквівалентами відповідних ШК-знаків символіки з табл. 2. Задамо кількість контрольних розрядів, наприклад, r =6. Така кількість контрольних розрядів дозволяє виправляти такі конфігурації помилок (t) та стирань (ρ) : t = 3, ρ=0; t

= 2, ρ=2; t = 1, ρ=4; t = 0, ρ=6. Тоді твірний многочлен коду Ріда-Соломона дорівнює $\varphi(x)=(x-2)(x-2^2)\cdot\ldots\cdot(x-2^6)= x^6-8x^5+16x^4-13x^3+42x^2-33x+56= x^6+51x^5+16x^4+46x^3+42x^2+26x+56$ (коефіцієнти обчислено за mod 59) .

Закодуємо слово A коректувальним кодом Ріда-Соломона:

$c(x)=a(x)\varphi(x)=(31x^5+28x^4+12x^2+58x+4)\cdot(x^6+51x^5+16x^4+46x^3+42x^2+26x+56)=$

$=31x^{11}+16x^{10}+36x^9+57x^8+15x^7+3x^6+18x^5+25x^4+41x^3+47x^2+48x+47.$

Кодове слово дорівнює:

$$C=(31\ \ 16\ \ 36\ \ 57\ \ 15\ \ 3\ \ 18\ \ 25\ \ 41\ \ 47\ \ 48\ \ 47) \qquad (2)$$
$$c_{11}\ c_{10}\ c_9\ c_8\ \ c_7\ c_6\ c_5\ c_4\ \ c_3\ \ c_2\ \ c_1\ \ c_0.$$

Кожному розряду слова C відповідає ШК-знак з табл. 2. ШК-знаки послідовно наносять на носій формуючи прямокутну ШК-позначку, що містить 12 ШК-знаків.

Під час зчитування багатоколірного штрихкодового зображення послідовно виокремлюють ШК-знаки, формуючи n-розрядне слово (одновимірний массив ШК-знаків) $C'=(c'_{n-1}\ c'_{n-2}\ \ldots\ c'_1\ c'_0)$. Причому, на момент декодування декодеру коду Ріда-Соломона відомі параметри n та r (n – загальна кількість ШК-знаківу ШК-позначці, r – кількість контрольних ШК-знаків). При декодуванні зчитаного слова C' декодер має виправляти спотворення двох видів – стирання та помилки.

Процес декодування розглянемо на прикладі зчитування ШК-позначки, якій при її формуванні та нанесенні на носій відповідало кодове слово (2). Нехай внаслідок ушкоджень зазнали спотворень чотири ШК-знаки, а саме ШК-знак c'_9 та c'_5 ідентифіковані як стираня, а c'_7 та c'_2 як помилки:

$$L:\ \ 42\ \ 21\ \ 40\ 20\ 10\ \ 5\ \ 32\ 16\ \ 8\ \ 4\ \ 2\ \ 1$$
$$\beta^l:\ \ 2^{11}\ 2^{10}\ \ 2^9\ \ 2^8\ 2^7\ \ 2^6\ 2^5\ 2^4\ \ 2^3\ \ 2^2\ 2^1\ 2^0$$
$$C'=(31\ \ 16\ \ \mathbf{0}\ \ 57\ \underline{43}\ \ 3\ \ \mathbf{0}\ \ 25\ \ 41\ \underline{18}\ \ 48\ \ 47) \qquad (3)$$
$$c'_{11}\ c'_{10}\ c'_9\ c'_8\ c'_7\ c'_6\ c'_5\ c'_4\ c'_3\ \ c'_2\ c'_1\ c'_0$$

Для зручності декодування стирання замінені декодером коду Ріда-Соломона на нульові значення (це загальновизнаний прийом), які виділено жирним, а помилкові розряди підкреслено. Кожному розряду слова C' ставлять у відповідність локатор, який подають або у степеневому вигляді β^l, або у вигляді десяткового числа $L=(\beta^l) mod\ P$.

Декодування провадять в такій послідовності.

1. Обробляючи слово C' (3) справа наліво декодер фіксує номери розрядів ε_1=5 та ε_2=9, що містять стирання, а також кількість стирань ρ=2. Перевіряють відношення $\rho \leqslant r$. Якщо $\rho > r$, то кількість стирань перевищує коректувальну зда-

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

тність коду, і декодування слід припинити через невиправні спотворення. Якщо ρ⩽*r*, то знаходять локатори стирань $L_{\varepsilon_1} = 2^5 = 32, \quad L_{\varepsilon_2} = 2^9 = 40$ (за mod 59).

2. Знаходять многочлен локаторів стирань

$$\lambda(x) = \prod_{i=1}^{\rho}(1 - L_{\varepsilon_i} x) = (1 - 32x)(1 - 40x) = 41x^2 + 46x + 1.$$

3. Визначають, яку максимальну кількість помилок *t* ще може виправити декодер після виявлення ρ стирань: *t*=int((*r* - ρ)/2).

Наявна кількість μ помилок у зчитаному слові має задовольняти умову μ⩽*t*.

Оскільки *r*=6, то максимальна кількість *t* помилок, яку може виправити декодер після виявлення двох стирань, становить *t*=int((6 - 2)/2)=2.

4. Обчислюють компоненти Ψ_1, Ψ_2, ..., Ψ_r синдрому спотворень $\Psi=(\Psi_1\Psi_2 \ldots \Psi r)$: $\Psi_w = c'(\beta^w)$, *w*=1, 2, ..., *r*,

де $c'(x) = \sum_{i=0}^{n-1} c'_i x^i$; c'_i – розряди зчитаного слова. Якщо всі компоненти синдрому спотворень Ψ дорівнюють нулю, то приймають рішення про відсутність спотворень у зчитаному слові.

$\Psi_1 = c'(2^1) = 31(2^1)^{11}+16(2^1)^{10}+57(2^1)^8+43(2^1)^7+3(2^1)^6+25(2^1)^4+41(2^1)^3+$

$+18(2^1)^2+48(2^1)^1+47=36(\mathrm{mod}59)$;

$\Psi_2 = c'(2^2)=54$; $\Psi_3 = c'(2^3)=15$; $\Psi_4 = c'(2^4)=29$; $\Psi_5 = c'(2^5)=1$; $\Psi_6 = c'(2^6)=18$.

Оскільки Ψ≠0 – слово *C*' містить спотворені розряди.

5. Утворюють синдромний многочлен

$$\Psi(x) = 1 + \sum_{w=1}^{r} \Psi_w x^w = 1 + 36x + 54x^2 + 15x^3 + 29x^4 + x^5 + 18x^6.$$

6. Зі співвідношення $\Psi(x)\lambda(x) \equiv V(x)(\mathrm{mod}\, x^{r+1})$ знаходять модифікований синдромний многочлен спотворень, де $V(x) = 1 + \sum_{w=1}^{r} V_w x^w$, а V_1, V_2, ..., V_r – компоненти модифікованого синдрому спотворень:

$$(1 + 36x + 54x^2 + 15x^3 + 29x^4 + x^5 + 18x^6)(41x^2 + 46x + 1)(\mathrm{mod}\, x^7) =$$

$$= 1 + 23x + 40x^2 + 22x^3 + 42x^4 + 3x^5 + 14x^6.$$

Компоненти модифікованого синдрому спотворень дорівнюють:

V_1=23, V_2=40, V_3=22, V_4=42, V_5=3, V_6=14.

7. Знаходять синдром помилок. Для цього з послідовності V_1, V_2, ..., V_r виділяють підпослідовність V_j, V_{j+1}, ..., V_r, де *j*=*r*-2*t*+1, елементи якої є компонентами синдрому помилок: $D_1=V_j$, $D_2=V_{j+1}$, ..., $D_{2t}=V_r$.

Оскільки j=6-2·2+1=3, то компонентами синдрому помилок є: $D_1=V_3=22$, $D_2=V_4=42$, $D_3=V_5=3$, $D_4=V_6=14$.

8. Знаходять многочлен локаторів помилок у вигляді $\eta(x)=1+\sum_{j=1}^{\mu}\eta_j x^i$; коефіцієнти η_j обчислюють на основі компонент D синдрому помилок способом Берлекемпа-Мессі [16]. Знаючи $D_1...D_4$ за цим способом знайдемо многочлен локаторів помилок: $\eta(x)=1+45x+40x^2$.

9. Розв'язують рівняння $\eta(x)=0$ в полі *GF(P)* та знаходять корені $x_1, x_2, ..., x_\mu$, а на їх основі – локатори помилок: L_{e_1}, $L_{e_1},...,L_{e_\mu}$.

Рівняння $1+45x+40x^2$ в *GF*(59) має корені x_1=6, x_2=15. Отже, локаторами помилок є: $L_{e_1}=x_1^{-1}=10,\ L_{e_2}=x_2^{-1}=4.$

10. Знаходять многочлен значень спотворень $Q(x)$ степеня зі r співвідношення $V(x)\eta(x)\equiv Q(x)(\mathrm{mod}x^{r+1})$:

$$Q(x)=V(x)\eta(x)(\mathrm{mod}\,x^7)=(1+23x+40x^2+22x^3+42x^4+3x^5+14x^6)\cdot$$
$$\cdot(1+45x+40x^2)(\mathrm{mod}\,x^7)=36x^4+28x^3+53x^2+9x+1.$$

11. Формують спільну множину L=$\{L_1, L_2, ..., L_{\rho+\mu}\}$ локаторів спотворень, до якої входять локатори стирань (L_ε) та локатори помилок (L_e), впорядковуючи її за зростанням значень елементів, кількість яких становить $\rho+\mu$.

У нашому випадку

$$L=\{L_{e_2}=4, L_{e_1}=10, L_{\varepsilon_1}=32, L_{\varepsilon_2}=40\}=\{4,10,32,40\}.$$

12. Обчислюють величини $E\gamma$ спотворень, тобто як стирань, так і помилок, за формулою Форні [16] $E_\gamma=\dfrac{Q(L_\gamma^{-1})}{\prod_{\gamma=1,j=1,\gamma\neq j}^{\rho+\mu}(1-L_\gamma^{-1}L_j)}$.

Для елемента L_1=4 множини L знайдемо значення E_1:

$E_1=\dfrac{Q(4^{-1})}{(1-4^{-1}\cdot 10)(1-4^{-1}\cdot 32)(1-4^{-1}\cdot 40)}=30$. За аналогією знаходимо значення E для решти елементів множини L: E_2=28, E_3=41, E_4=23.

13. Виправляють спотворення. Для кожної пари (L_γ, E_γ) подають L_γ у вигляді $L_\gamma=\beta^f$ (див. (5)) та виконують корекцію у розряді f прийнятого слова C' як $c_f=(c'_f-E_\gamma) mod\ P$:

(L_1, E_1)=(4, 30)=(2^2, 30),

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

$(L_2, E_2)=(10, 28)=(2^7, 28)$,

$(L_3, E_3)=(32, 41)=(2^5, 41)$,

$(L_4, E_4)=(40, 23)=(2^9, 23)$.

Зокрема,

$c_2=(c'_2 - E_1)\text{mod}59=(18-30)\ \text{mod}59=47$

$c_7=(c'_7 - E_2)\text{mod}59=(43-28)\ \text{mod}59=15$

$c_5=(c'_5 - E_3)\text{mod}59=(0-41)\ \text{mod}59=18$

$c_9=(c'_9 - E_4)\text{mod}59=(0-23)\ \text{mod}59=36$.

Отже, всі чотири спотворення у прийнятному слові C' (3) виправлено, внаслідок чого отримано кодове слово C (2).

Для надійного відтворення даних, що зберігаються у вигляді багатоколірного штрихкодового зображення великої ємності, слід застосувати дворівневу систему забезпечення завадостійкості – на рівні ШК-знаків, коли мінімальними інформаційними одиницями є колірні елементи (чарунки), що утворюють ШК-знак, та на рівні ШК-позначки, коли мінімальними інформаційними одиницями є ШК-знаки.

На рівні ШК-знаків для забезпечення їх завадостійкості слід застосовувати многозначний код БЧХ з коректувальною здатністю t=2, а на рівні усієї ШК-позначки - коректувальний код Ріда-Соломона (рис. 3), який здатний виправляти спотворення двох видів – помилки і стирання.

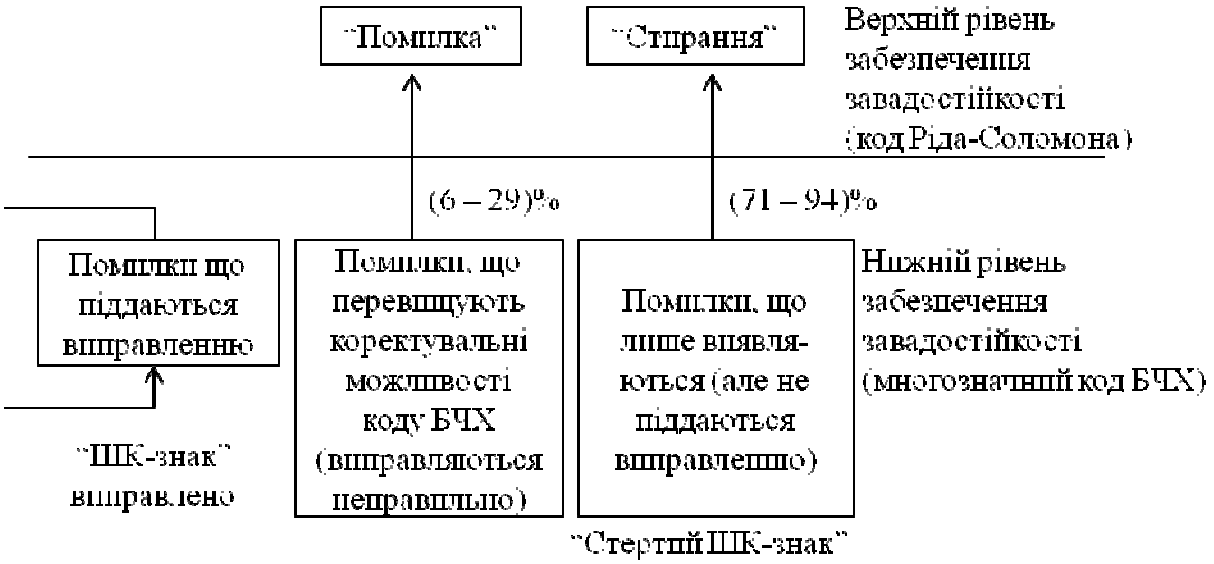


Рисунок 3 - Структура дворівневої системи забезпечення завадостійкості штрихкодових зображень

Під час зчитування багатоколірного ШК програма послідовно виокремлює ШК-знаки зі штрихкодового зображення формуючи таким чином слово коду Ріда-Соломона, в якому кожен ШК-знак є окремим розрядом слова. У виокремленому ШК-знаку працює програмний декодер коду БЧХ, результатом роботи якого можуть бути три висновки: «ШК-знак не ушкоджено» (цей випадок не показано на рис. 6), «ШК-знак виправлено», «Стертий ШК-знак».

Висновок «ШК-знак не ушкоджено» формують, якщо синдром помилки дорівнює нулю.

Рішення «ШК-знак виправлено» формують тоді, коли декодер коду БЧХ виправляє одно- або двократну помилку у векторі ШК-знака. Якщо ж ШК-знак містить три або більше ушкоджень, а декодер коду БЧХ сприймає їх як одно- або двократну помилку, і, відповідно, виправить її неправильно (а таких випадків, наприклад, для четвіркових кодів, - близько (6-29)%, то такий ШК-знак сприйматиметься декодером коду Ріда-Соломона як «помилка».

Рішення «Стертий ШК-знак» формується декодером коду БЧХ, якщо він виявить у ШК-знаку спотворення трьох або більше елементів. Для згаданих вище четвіркових кодів це матиме місце у (71 – 94)% випадків. Така ситуація кваліфікуватиметься декодером коду Ріда-Соломона як «стирання».

Відомо, що для виправлення кожної помилки у структурі кодового слова коду Ріда-Соломона мають бути передбачені два контрольні розряди, а для виявлення кожного стирання – один контрольний розряд. Тому, використання на нижньому рівні забезпечення завадостійкості багатоколірного ШК многозначного коду БЧХ, який, окрім виправлення одно- та двократних ушкоджень, дозволяє також виявляти понад 71% багатократних (три і більше) ушкоджень елементів у ШК-знаках, підсилює коректувальні можливості коду Ріда-Соломона за рахунок передачі на верхній рівень забезпечення завадостійкості ситуацій «стирання» замість ситуацій «помилка».

Нехай при створенні ШК-позначки багатоколірного ШК великої ємності (декілька тисяч ШК-знаків) для захисту даних застосовано лише верхній рівень забезпечення завадостійкості на основі коду Ріда-Соломона, причому ставиться вимога виправляти до 100 ушкоджених ШК-знаків. Для цього в коді Ріда-Соломона має бути передбачено 200 контрольних розрядів.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

Таблиця 3

Відсоток багатократних помилок, які виявляються скороченими четвірковими кодами БЧХ, похідними від (15, 9)-коду

Код БЧХ	Кратність помилки				
	3	4	5	6	7
(13, 7)-	79%	73%	71%	71%	71%
(12, 6)-	83%	78%	75%	75%	75%
(11, 5)-	88%	82%	79%	79%	79%
(10, 4)-	92%	86%	84%	83%	83%
(9, 3)-	94%	89%	87%	86%	86%

Якщо ж захист даних здійснювати на основі дворівневої системи забезпечення завадостійкості – на нижньому рівні застосовувати, наприклад, один з четвіркових кодів (табл. 3), а на верхньому рівні – код Ріда-Соломона, то зі ста можливих ушкоджених ШК-знаків приблизно 70 будуть ідентифіковані як «стертий ШК-знак» (тобто «Стирання»), а решта 30 – як «Помилка» (відповідно до статистичних даних з табл. 3). Для виправлення 70-ти стирань необхідно 70 контрольних розрядів, а для виправлення 30-ти помилок – 60 контрольних розрядів, отже, загалом 130 контрольних розрядів. Але оскільки в кодове слово коду Ріда-Соломона за умовою закладено 200 контрольних розрядів, то, отже, 70 контрольних розрядів можна «вивільнити». Ці «вивільнені» контрольні розряди дозволяють локалізувати та виправити додатково ще 35 ушкоджених ШК-знаків. Таким чином, можливості коду Ріда-Соломона будуть підсилені на (135-100)/100=35%.

Звідси випливає й інший висновок. При дворівневій системі забезпечення завадостійкості штрихкодових даних у коді Ріда-Соломона достатньо мати не 200, а лише 200-70=130 контрольних розрядів, щоб забезпечити таку саму завадостійкість, і, отже, на 35% знизити надлишковість коду.

Висновки

У роботі вирішено актуальну наукову задачу підвищення завадостійкості багатоколірних штрихкодових зображень.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше запропоновано метод підвищення завадостійкості багатоколірних штрихових кодів, який ґрунтується на застосуванні дворівневого контролю помилок, що виникають при скануванні багатоколірного штрихкодового зображення, з використанням двох многозначних коректувальних кодів: коду БЧХ – на рівні штрихкодових знаків (ниж-

ній рівень), та коду Ріда-Соломона – на рівні усієї штрихкодової позначки (верхній рівень).

Особливістю застосування многозначного коректувального коду на нижньому рівні контролю помилок є те, що цифровий еквівалент (вектор) багатоколірного штрихкодового знака має бути кодовим словом цього коректувального коду. Наділення ШК-знаків такою властивістю відбувається під час побудови (синтезу) символіки багатоколірного штрихового коду. Важливим при цьому є те, щоб коректувальний код нижнього рівня, крім виправлення помилок (відповідно до його коректувальної здатності), виявляв також частину багатократних помилок. Виконані авторами дослідження показали, що всі многозначні коди виявляють значну частину багатократних помилок, кратність яких перевищує коректувальну здатність коду. Причому, ця властивість має місце навіть у випадку повного коду, чого не спостерігається у двійкових кодах.

Наприклад, трійковий повний (8, 3)- код БЧХ забезпечує виявлення (34,4 – 46,4)% помилок кратності 3 – 7. Досліджено здатність виявляти (3 - 7)-кратні помилки для 23-х кодів БЧХ. Так, четвіркові коди БЧХ дозволять виявляти (71-94)% багатократних помилок, п’ятіркові – (70 - 96)%, а сімкові – (97 - 98)% помилок відповідно. Властивість виявляти багатократні помилки на нижньому рівні контролю (на рівні ШК-знаків) є визначальною, оскільки саме через цей параметр здійснюється зв’язок з верхнім рівнем контролю помилок.

Особливістю застосування многозначного коректувального коду на верхньому рівні контролю помилок є те, що він має виправляти спотворення двох видів – помилок та стирань. Таку властивість має код Ріда-Соломона. Факт виявлення помилки на нижньому рівні контролю сприймається кодом Ріда-Соломона як стирання. І саме за рахунок цього досягається ефект підвищення завадостійкості. Тому що, для виправлення стирання в коді Ріда-Соломона витрачається лише один контрольний розряд, а для виправлення помилки – два контрольні розряди. Це дає можливість істотно поліпшити захищеність цілісності штрихкодових даних. У разі застосування на нижньому рівні контролю помилок трійкових кодів БЧХ – на 45%, а при застосуванні четвіркових кодів БЧХ – на 35%.

Подальші дослідження доцільно зосередити на вдосконаленні механізму взаємодоповнювального застосування коректувальних кодів при дворівневому забезпеченні завадостійкості багатоколірних штрихкодових зображень.

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

ЛІТЕРАТУРА

1. Elhami G. Three-Dimensional Cubic Barcodes / G. Elhami, A. Scholefield, M. Vetterli // IEEE Transactions on Image Processing. – 2022. – Vol. 31. – P. 3166 – 3181. DOI:10.1109/TIP.2021.3120049

2. Wang Q. Rain Bar: Robust Application-driven Visual Communication using Color Barcodes / Q. Wang, M. Zhou, K. Ren, T. Lei, J. Li, Z. Wang // 2015 IEEE 35th International Conference on Distributed Computing Systems: Columbus, Ohio, USA, June 29 – July 02, 2015: IEEE Proceedings. – 2015. – P. 537 – 546.
DOI:10.1109/ICDCS.2015.61

3. Querini M. Reliability and Data Density in High Capacity Color Barcodes / M. Querini, G.F. Italiano // Computer Science and Information Systems. – 2014. – Vol. 11(4) . – P. 1595 – 1615. DOI:10 / 2298 / CSIS131218054Q

4. Firmani D. Engineering Color Barcode Algorithms for Mobile Applications / D. Firmani, G.F. Italiano, M. Querini // J. Gudmundsson, J. Katajainen. Expiremental Algorithms, International Symposium on Experimental Algorithms SEA'2014. – Lecture Notes in Computer Science, Springer. – Vol. 8504. – P. 211 – 222.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07959-2-18

5. Wara A. Enhancing user experience using mobile QR-code application / A.A. Wara, S. Dugga // International Journal of Computer and Information Technology. – 2014. – Vol. 3(6). – P.1310 – 1315.

6. Blasinski H. Color barcodes for mobile applications: a per channel framework / H. Blasinski, O. Bulan, G. Sharma // US Patent № US 9,111,186 B2. – 2015.

7. Jahagirdar K. QR Code with colored image / K. S. Jahagirdar, S. B. Borse // International Journal of Computer Applications. – 2015. – Vol. 115(16). – P. 38 – 41.

8. Parikh D. Localization and Segmentation of a 2D High Capacity Color Barcode / D.Parikh, G.Jancke // Workshop on Application of Computer Vision (WACV'08) : Copper Mountain, CO, USA, January 7 – 9, 2008 : IEEE proceedings.– 2008. –P. 1 – 6.
DOI :https://doi.org/10.1109/ WACW.2008.4544033

9. Grillo A. High capacity colored two dimensional codes / A. Grillo, A. Lentini, M. Querini, G. F. Italiano // International Multiconference on Computer Science and Information Technology : Wisla, Poland, October 18 – 20, 2010 : IEEE proceedings. – 2011. – P. 709 – 716.
DOI: https://doi.org/10.1109/IMCSIT.2010.5679869

10. Ramya M. Color QR Codes for Real Time Applications with High Embedding Capacity / M. Ramya, M. Jayasheela // International Journal of Computer Application. – 2014. – Vol. 91(8). – P. 8 – 12. DOI : https://doi.org/10.5120/15899-4889

11. Abas A. Increasing data storage of colored QR code using compress, multiplexing and multilayered technique / A. Abas, Y. Yusof, R. Din, F. Azali, B. Osman // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2020. – Vol. 9(6). – P. 2555 – 2561.
DOI: https://doi.org/10.11591/eei.v9i6.2481
12. Жураковський Б. Ю. Багатовимірні штрихові коди / Б.Ю. Жураковський, В.А. Дружинін // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Адаптивні системи автоматичного управління». – 2018. – № 2(33). – С. 15 – 31.
DOI: https://doi.org/10.20535/1560-8956.33.2018.164669
13. Berchtold W. JAB Code – A Versatile Polychrome 2D Barcode / W. Berchtold, H. Liu, M. Steinebach, D. Klein, T. Senger, N. Thence // Electronic Imaging. – 2020. – Vol. 2020(3). – P. 207 – 212.
DOI: https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2020.3.MOBMU-207
14. Wang G. Security Mechanism Improvement for 2D Barcodes using Error Correction with Random Segmentation / Wang G., Yang Z., Chen J. // The 6th International Conference on Information Technology: IoT and Smart City: Bhubaneswar, India, December 19 – 21, 2018 : Proceedings. – IEEE, 2018. – P. 104 – 109.
DOI: https://doi.org/10.1145/3301551.3301593.
15. Сулема Є. С. Алгоритмічне забезпечення завадостійкості багатоколірних штрихкодових знаків на основі поля GF(p) / Є. С. Сулема, М. В. Онай, А. І. Дичка // Наукові вісті КПІ. – 2021. – № 1(132). – С. 50 – 62.
DOI : https://doi.org/10.20535/kpisn.2021.1.231210
16. Blahut R. Theory and Practice of Error Control Codes / R. E. Blahut // Addison – Wesley, 1983. – 576 P.

REFERENCES

1. Elhami G. Three-Dimensional Cubic Barcodes / G. Elhami, A. Scholefield, M. Vetterli // IEEE Transactions on Image Processing. – 2022. – Vol. 31. – P. 3166 – 3181.
DOI:10.1109/TIP.2021.3120049
2. Wang Q. Rain Bar: Robust Application-driven Visual Communication using Color Barcodes / Q. Wang, M. Zhou, K. Ren, T. Lei, J. Li, Z. Wang // 2015 IEEE 35th International Conference on Distributed Computing Systems: Columbus, Ohio, USA, June 29 – July 02, 2015: IEEE Proceedings. – 2015. – P. 537 – 546.
DOI:10.1109/ICDCS.2015.61
3. Querini M. Reliability and Data Density in High Capacity Color Barcodes / M. Querini, G.F. Italiano // Computer Science and Information Systems. – 2014. – Vol. 11(4) . – P. 1595 – 1615. DOI:10/2298/CSIS131218054Q

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

4. Firmani D. Engineering Color Barcode Algorithms for Mobile Applications / D. Firmani, G.F. Italiano, M. Querini // J. Gudmundsson, J. Katajainen. Expiremental Algorithms, International Symposium on Experimental Algorithms SEA'2014. – Lecture Notes in Computer Science, Springer. – Vol. 8504. – P. 211 – 222.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07959-2-18
5. Wara A. Enhancing user experience using mobile QR-code application / A.A. Wara, S. Dugga // International Journal of Computer and Information Technology. – 2014. – Vol. 3(6). – P .1310 – 1315.
6. Blasinski H. Color barcodes for mobile applications: a per channel framework / H. Blasinski, O. Bulan, G. Sharma // US Patent № US 9,111,186 B2. – 2015.
7. Jahagirdar K. QR Code with colored image /K. S. Jahagirdar, S. B. Borse // International Journal of Computer Applications. – 2015. – Vol. 115(16). – P. 38 – 41.
8. Parikh D. Localization and Segmentation of a 2D High Capacity Color Barcode / D. Parikh, G. Jancke // Workshop on Application of Computer Vision (WACV'08) : Copper Mountain, CO, USA, January 7-9, 2008 : IEEE proceedings. – 2008. – P. 1 – 6.
DOI :https://doi.org/10.1109/WACW.2008.4544033
9. Grillo A. High capacity colored two dimensional codes / A. Grillo, A. Lentini, M. Querini, G. F. Italiano // International Multiconference on Computer Science and Information Technology : Wisla, Poland, October 18 – 20, 2010 : IEEE proceedings. – 2011. – P. 709 – 716.
DOI : https://doi.org/10.1109/IMCSIT.2010.5679869
10. Ramya M. Color QR Codes for Real Time Applications with High Embedding Capacity / M. Ramya, M. Jayasheela // International Journal of Computer Application. – 2014. – Vol. 91(8). – P. 8 – 12. DOI : https://doi.org/10.5120/15899-4889
11. Abas A. Increasing data storage of colored QR code using compress, multiplexing and multilayered technique / A. Abas, Y. Yusof, R. Din, F. Azali, B. Osman // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2020. – Vol. 9(6). – P. 2555 – 2561.
DOI: https://doi.org/10.11591/eei.v9i6.2481
12. Zhurakovskyi B. Multidimensional Barcodes / B.Yu. Zhurakovskyi, V.A. Druzhynin // Mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk "Adaptyvni systemy avtomatychnoho upravlinnya". – 2018. – Vol. 2(33). – P. 15 – 31.
DOI: https://doi.org/10.20535/1560-8956.33.2018.164669
13. Berchtold W. JAB Code – A Versatile Polychrome 2D Barcode / W. Berchtold, H. Liu, M. Steinebach, D. Klein, T. Senger, N. Thence // Electronic Imaging. – 2020. – Vol. 2020(3). – P. 207 – 212.
DOI : https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2020.3.MOBMU-207

14. Wang G. Security Mechanism Improvement for 2D Barcodes using Error Correction with Random Segmentation / Wang G., Yang Z., Chen J. // The 6th International Conference on Information Technology: IoT and Smart City: Bhubaneswar, India, December 19 – 21, 2018 : Proceedings. – IEEE, 2018. – P. 104 – 109.
DOI : https://doi.org/10.1145/3301551.3301593.
15. Sulema Ye. Algorithmic Provision of Interference-Resistance of Multicolor Barcode Patterns on the Base of GF(p) / Ye.S. Sulema, M.V. Onay, A.I. Dychka // Naukovi visti KPI. – 2021. – Vol. 1(132). – P. 50 – 62.
DOI : https://doi.org/10.20535/kpisn.2021.1.231210
16. Blahut R. Theory and Practice of Error Control Codes / R. E. Blahut // Addison – Wesley, 1983. – 576 P.

Received 01.03.2023.
Accepted 03.03.2023.

Improving the interference resistance of multi-color barcode images

A method of improving the interference resistance of multi-color barcodes is proposed, which is based on the application of two-level control of errors that occur when scanning a multi-color barcode image, using two multi-valued correcting codes: the BCH code - at the level of barcode patterns (lower level), and the Reed-Solomon code - at barcode symbol level (top level).

The proposed method makes it possible to create multi-color barcodes with improved immunity characteristics, which ensure reliable reproduction of data during scanning of large-capacity multi-color barcode images in automatic identification systems.

Сулема Євгенія Станіславівна – д.т.н., доцент, завідувач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».
Дичка Андрій Іванович – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Yevgeniya Sulema – DSc, Associate Professor, Head of the Computer Systems Sofrware Department of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".
Andrii Dychka – PhD student of the Computer Systems Software Department of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)