

© 2009г. Я.М. Николайчук, Т.М. Гринчишин,  
О.М. Заставний, А.Р. Воронич

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій  
Тернопільського національного економічного університету, Тернопіль

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛЬНИХ КОДІВ

Викладені теоретичні основи та принципи формування сигнальних кодів, що використовуються для маніпуляції біт-орієнтованих потоків даних в інформаційних каналах комп'ютерних систем з врахуванням ступеня використання сигнальних просторів та форми сигналів, швидкості передавання повідомлень та ступеня захисту від помилок.

Theoretical bases and principles of forming of alarm codes, used for manipulation of bit-oriented flows of data in informative channels of the computer systems have been reviewed taking into account the degree of the use of alarm spaces and form of signals, speed of transferrableness of reports and degree of error defence.

### Вступ

Широке застосування отримали системи передачі даних з оптичними каналами зв'язку, їх потенційні функціональні можливості способу передавання дискретної інформації забезпечують якісний та надійний цифровий оптичний зв'язок.

Для виявлення помилок використовують стандартні методи на основі рекурентних надлишкових коректуючих кодів.

Для того, щоб в даних, які передаються, не з'являвся код-прапорця виконується процедура біт-стаффінга після кожних п'яти одиниць, які потім вилучаються. В результаті код-фрейм має змінну довжину, що ускладнює процедуру виявлення помилок і перевантажує трафік передачі даних.

Тому задача вдосконалення методів кодування є актуальна, особливо для оптичних каналів зв'язку.

### 1. Методологія формування та оцінки ефективності формування сигнальних кодів

Методи цифрової обробки сигналів базуються на зміні системних характеристик носіїв фізичного сигналу. Якщо ці зміни є неперервні, то цей метод називається модуляцією, якщо стрибкоподібно - маніпуляцією. В загальному випадку сигнал можна представити у вигляді функціоналу, формалізованого запису аналітичного виразу в залежності від формалізованих

параметрів [1,2]:

$$S_x = F(A, \psi, \omega, t, \varphi),$$

де  $A$  - амплітуда сигналу;  $\psi$  - базисна функція;  $\omega$  - частота в базисі;  $\varphi$  - фаза сигналу;  $t$  - час.

Вказані 5 параметрів є основою для організації методів модуляції та маніпуляції в різних теоретико-числових базисах.

#### 1.1. Імпульсні методи маніпуляції

Імпульсні методи маніпуляції сигналів найчастіше використовують на низових рівнях комп'ютерних мереж, в цифровій телефонії, а також існуючих комп'ютерних системах з оптичними ІК. В зв'язку з тим, що дані методи

Таблиця 1. Методи одновимірної імпульсної маніпуляції.

ММ	код	0	1	1	0	1	0	0	1	М
АЧМ	RZ		□	□		□			□	2
АЧМ	RB		□	□		□			□	2
АЧМ	NZ	□	□		□	□		□	□	3
АЧМ	RZB	□	□	□	□	□	□	□	□	3
АФМ	RZ-F	□	□	□	□	□	□	□	□	2
ЧІМ	RBFM		□	□		□			□	2
ЧІМ	RB-MFM		□	□		□			□	2

Таблиця 2. Класифікація переваг та недоліків різних методів двомірної маніпуляції.

Метод маніпуляції	Переваги	Недоліки
АЧМ (RZ)	простий закон маніпуляції, сигнали однополярні	низька енергія сигналу, відсутня самосинхронізація
АЧМ (RB)	вдвічі більша енергія сигналу, по відношенню до методу RZ	сигнал знакозмінний; загальний недолік для RZ і RB дрейф нуля в лінії зв'язку, що призводить до зниження завадозахищеності віддалених приймачів сигналу
АЧМ (NZ)	більш високий рівень серії бітової синхронізації	сигнал знакозмінний
АЧМ (RZB)	синхронізація кожного біту, що передається	загальним недоліком методів RZB, RZ-F, RB-FM, RB-M <sup>2</sup> FM є використання малої кількості енергії сигнального простору
АЧМ (RZ-F)	самосинхронізація кожного біту даних	
АФМ (RB-FM)	самосинхронізація і завадозахищеність	
ЧІМ (RB-M <sup>2</sup> FM)	захист від пропадань імпульсів в лінії зв'язку	

використовують обмежену частину енергії на інтервалі тривалості сигналу, а також потребують широкої смуги частот в каналі зв'язку ефективність їх недостатньо висока.

Серед цих методів застосовують імпульсну та диференційно-імпульсну кодові модуляції [3,4].

Порівняльний аналіз методів ефективності (переваг та недоліків) різних методів двовимірної імпульсної маніпуляції сигналів поданий у табл. 2.

Загальним недоліком всіх представлених одновимірних методів маніпуляції є широкий спектр сигналів, а також неефективне використання сигнального вікна, що приводить до зниження швидкості передавання інформації і зменшення дальності передавання повідомлень.

### 1.2. Потенціальні методи маніпуляції

Широкого застосування в сучасних комп'ютерних системах набули також потенціальні методи маніпуляції сигналу [3]. Дані методи характеризуються підвищеною енергією сигналів, що передаються. Вони бувають двох типів: без самосинхронізації (потребують додаткового каналу синхронізації) і з самосинхронізацією (табл. 3).

Серед перелічених методів, метод КТ-1 є найбільш ефективним, оскільки володіє наступними позитивними якостями:

1. Виключає повторення однакових ознак сигналів і забезпечує якісну бітову син-

хронізацію.

2. Двократні повторення сигналів використовуються в якості start-stop сигналів, що виключає необхідність формування прапорців на границях інформаційних масивів і бітстафінгів у середині інформаційного масиву.

Метод КТ -1 розроблений професором Николайчуком Я.М. [3] і успішно застосований в низових рівнях комп'ютерних систем в нафтогазовій промисловості.

Таблиця 3. Потенціальні методи маніпуляції.

код	0	1	1	0	1	0	0	1	m	
NRZ-1									2	
NRZ-M		↑	↓		↑			↓	2	
MFМ		↑	↓		↑			↓	2	
PE		↓	↑	↑	↓	↑	↓	↓	↑	2
FT	0	1	1	0	1	0	0	1	2	
FM		↑	↑		↑			↑	2	
HP-IL		↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	3	
KT-1		↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	3	

### 1.3. Квазітрійкові методи маніпуляції сигналів

Загальний недолік проаналізованих методів маніпуляції є широкий спектр сигналів, як наслідок цього, відбувається зниження швидкості передавання інформації і високий рівень завад

Таблиця 4. Порівняльні характеристики різних методів потенційних методів маніпуляції.

Метод маніпуляції	Переваги	Недоліки
NRZ – 1	забезпечує максимальну енергію сигналів, але відсутня бітова синхронізація	дрейф нуля в лінії зв'язку
NRZ – М	забезпечує синхронізацію сигналів "1"	
MFM	забезпечує фронтом наростанням або наростання нулів і передачу потенціалу	синхронізація бітів фронтами наростання та спаду сигналу з фазовою маніпуляцією
PE	нуль передається фронтом спаду, а одиничка фронтом наростання	ефективна бітова синхронізація
FT	висока заводо захищеність і самосинхронізація	зміна швидкості передавання даних, дрейф нуля
HP – IL	характеризується самосинхронізацією, відсутністю дрейфу нуля	низька швидкість передачі даних при заданій смузі частот каналу зв'язку
КТ – 1	максимальна швидкість передачі сигналів і самосинхронізація	дрейф нуля; для ліквідації дрейфу сигнали "0", "1" і сигнал "повторення" передаються трьома частотами

між каналом зв'язку. Тому доцільно використовувати методи квазітрійкової маніпуляції сигналів покращеної форми з вузьким спектром (табл.5) [5].

Таблиця 5. Квазітрійкові методи маніпуляції сигналів покращеної форми.

ФОРМА сигналу	Метод	Бітова послідовність							
		0	1	1	0	1	0	0	1
Трапецедаєвн	КТ-Т								
Двоноподобн $\sin^2 x$	КТ-D								
$\frac{\sin x}{x}$	КТ-S								

Ефективність методу маніпуляції сигналу також залежить від реалізації блокової синхронізації.

При цьому аналіз ефективності методу маніпуляції сигналів з врахуванням блокової синхронізації можна вираховувати за допомогою наступного виразу:

$$K_e = (n+m)/n,$$

де  $n$  – число біт-інформаційної кодової послідовності,  $m$  – число біт коду блокової синхронізації.

Серед методів маніпуляції найбільш широко використовується Манчестерський код, рис.1. [6].

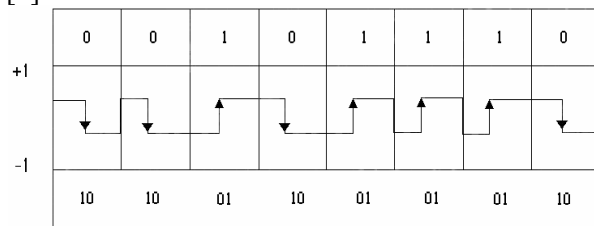


Рис.1. Кодування сигналу на основі Манчестерського коду.

Аналіз рис.1 показує, що при передаванні байту даних (8 біт), в каналі є присутні ще 2 байти двійкових сигналів – цей факт пояснюється тим, що для передавання Манчестерським кодом "1" і "0" використовуються не всі позиції сигнального простору.

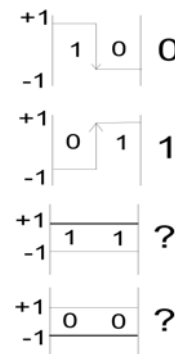


Рис.2. Представлення кодової послідовності з використанням бітів даних.

З рис.2. видно, що дві позиції "00" і "11" в каналах зв'язку фактично не використовуються.

Існують інші методи маніпуляції, де ці коди використовують для повторення нулів і одиниць (рис.3), що підвищує ефективність передачі інформації [83].

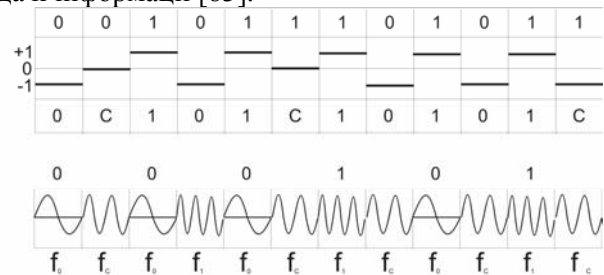


Рис.3. Метод кодування КТ-1. (С – синхронізація,  $f_0$  – частота передавання нулів,  $f_1$  – одиниць,  $f_c$  – синхронізації).

### 1.4. Частотні, фазові та амплітудно-фазові сигнали, двовимірні та багатовимірні сигнальні простори

Для порівняння ефективності різних методів маніпуляції необхідно виконати їх розрахунок на основі сигнальних моделей [6,7].

Представлення методів модуляції відбувається в одиничному колі (рис.4).

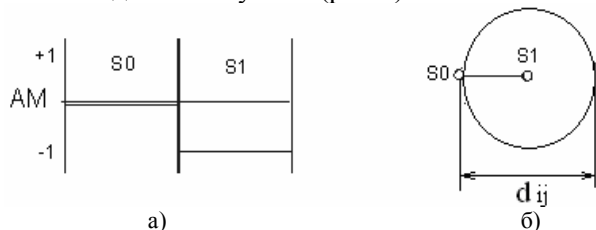


Рис.4. Сигнальне коло при амплітудній (а) та фазовій модуляції (б) ( $S_i, S_j$  - сигнали в сигнальному просторі,  $d_{ij}$  - кодова відстань,  $E_i = R_i$ ,  $E$  - енергія сигналу).

Чим більше  $d_{ij}$  тим ефективність методу модуляції більша (табл. 6).

### 2. Сигнальні коди на основі теорії кодів Галуа

Коди поля Галуа [8-10] за загальною класифікацією відносяться до підкласу циклічних блокових кодів, які володіють всіма основними властивостями завадозахищених кодів. В блокових кодах послідовність елементарних повідомлень розбиваються на блоки символів ( $B_1, B_2, B_3, \dots, B_n$ ) фіксованої довжини  $K$ , кожному з яких ставиться в відповідності певна комбінація символів кодового слова ( $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ ). Циклічні коди відносяться до класу систематичних кодів. Для даних кодів можна записати відповідний їм аналітичний вираз, чи деяке логічне співвідношення, яке визначається правилами створення цих кодів. Найбільш зручною формою представлення циклічних кодів – використання алгебраїчного виразу [84]

$$G(x) = a_{n-1} \times x^{n-1} +$$

$$+ a_{n-2} \times x^{n-2} + \dots + a_1 \times x + a_0,$$

де  $a_0 - a_{n-1}$  – числа, що дорівнюють «0» чи «1», які визначають відповідні значення розрядів кодових комбінацій.

Таким чином дія над циклічними кодами зводиться до дії над відповідними математичними виразами. Коефіцієнти однакових степенів додаються за модулем 2. Дані коди є одними з найбільш досконалою упаковкою інформації.

Таблиця 6. Систематизація сигнальних кіл при різних ознаках сигнального вікна ( $M$  – число ознак сигнального вікна (число маніпуляцій)).

M=2			
M=3			
M=4			
M=5			
M=6			
M=7			
M=8			
M=9			

Для генерування кодів Галуа використовуються неприводимі алгебраїчні багаточлени [11,12].

Важливою перевагою кодової послідовності Галуа (КПГ) є їх проста генерація на основі рекурентного рівняння. Найпростіші ключі (табл.7) кодів Галуа описуються виразом:

$$G_{i+1} = G_i \oplus G_{i-(n-1)},$$

де  $n$  – довжина кодона (рис.5),  $\oplus$  - операція додавання “за модулем два”.

При  $n=4$  отримаємо код, показаний на рис.6.

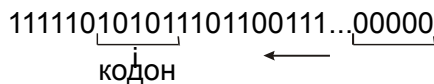


Рис.5. Формування коду Галуа.

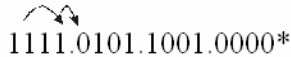


Рис.6 Формування коду Галуа при n=4 (\* - біт-стафінг).

Коди поля Галуа належать до класу рекурентних кодів, які широко використовуються для захисту інформації від несанкціонованого доступу [17].

### 2.1. Метод формування позиційно-сигнального коду (ПСК)

Суть методу безнадлишкового сигнального коду базується на принципі створення таких кодів з можливістю виявлення та виправлення помилок, які не призводять до збільшення числа сигналів при передаванні біт-орієнтованих потоків даних.

Суть методів безнадлишкового сигнального кодування з можливістю виявлення та виправлення помилок полягає в тому, що при формуванні такого класу кодів використовується до п'яти сигнальних ознак наступного типу:

- фронт наростання  $\overline{\uparrow}$  ( $\wedge$ );
- фронт спаду  $\overline{\downarrow}$  ( $\vee$ );
- додатній потенціал  $\overline{\square}$  (+);
- від'ємний потенціал  $\underline{\square}$  (-);
- нульовий потенціал  $\overline{\text{—}}$  (S);

Зауважимо, що всі ці ознаки різними способами використовуються в стандартних потенціальних методах маніпуляції [3], при чому послідовність бітів даних додатково модулюється кодом поля Галуа (рис.7).

Встановлено чотири можливих способи формування такого класу кодів:

- позиційно-сигнальний код (ПСК);
- несиметричний рекурентний сигнальний код (НРСК);
- рекурентний симетричний сигнальний код (РССК);
- квазі-символьний сигнальний код (КССК).

Табл.7. Таблиця ключів кодів Галуа

Розрядність коду	Ключ коду Галуа
4	$x_1 \oplus x_4$
5	$x_2 \oplus x_5$
6	$x_1 \oplus x_6$
7	$x_3 \oplus x_7$
8	$x_3 \oplus x_8$
9	$x_4 \oplus x_9$
10	$x_3 \oplus x_{10}$
11	$x_2 \oplus x_{11}$
12	$x_1 \oplus x_4 \oplus x_6 \oplus x_{12}$
13	$x_1 \oplus x_3 \oplus x_4 \oplus x_{13}$
14	$x_1 \oplus x_6 \oplus x_{10} \oplus x_{14}$
15	$x_1 \oplus x_{15}$
16	$x_1 \oplus x_3 \oplus x_{12} \oplus x_{16}$
17	$x_3 \oplus x_{17}$
18	$x_7 \oplus x_{18}$
19	$x_1 \oplus x_2 \oplus x_5 \oplus x_{19}$
20	$x_1 \oplus x_{18}$
21	$x_2 \oplus x_{21}$
22	$x_1 \oplus x_{22}$
23	$x_5 \oplus x_{23}$
24	$x_1 \oplus x_2 \oplus x_7 \oplus x_{24}$
25	$x_1 \oplus x_4$
26	$x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_7$
27	$x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_6$
28	$x_1 \oplus x_4$
29	$x_1 \oplus x_3$
30	$x_1 \oplus x_2 \oplus x_5 \oplus x_7$
31	$x_1 \oplus x_7$
32	$x_1 \oplus x_3 \oplus x_7 \oplus x_8$

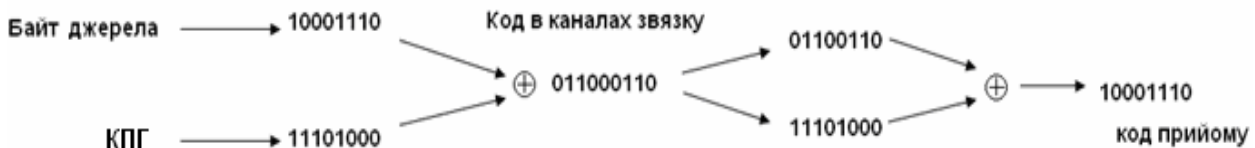


Рис.7. Байт, який передається на основі кодової послідовності Галуа.

Введемо наступну систему подання сигнальних та кодових ПСК:

$$G_0^1 \Rightarrow \langle + \rangle ; G_0^0 \Rightarrow \langle - \rangle ;$$

Біт «нуль», який на сигнальному рівні кодується в Галуа одиницею, подається сигналом +1 і відповідним символом + в кодовому вигляді. Біт «нуль», який кодується в Галуа нулем, на сигнальному рівні, подано потенціалом -1, а в кодовому вигляді відповідним символом „-“.

Біту «одиниця», який кодується в Галуа одиницею, відповідає фронт наростання на сигнальному рівні, або символ  $\wedge$ . Біту «одиниця», який кодується в Галуа символом нуль, відповідає фронт спаду на сигнальному рівні, або символ  $\vee$  у кодовому вигляді.

Формування ПСК коду показано в табл.8.

На рис.8 представлена символіка розрядно-позиційного сигнального коду Галуа, для півбайтових потоків даних, що відповідає потоку чисел або цифр.

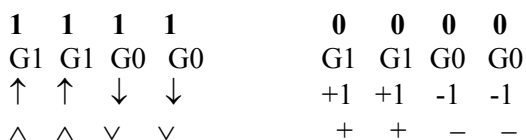


Рис.8. Представлення сигнальних ПСК.

При формуванні ПСК даним методом для виключення появи в кодах даних комбінацій Start/Stop – сигналів, останній формується у вигляді трьохбітових послідовностей відповідно: Start --- Stop +++

Тобто число start/stop-сигналів повинно роз-

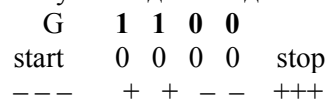
раховуватись згідно виразу:

$$S = n-1,$$

де n – розрядність кодону Галуа масиву даних, що передаються.

Розглянемо ряд етапів досліджень запропонованого методу ПСК, при зміні позиційно-сигнального кодування даних, що передаються в ІК.

Нехай формат даних, що передаються по ІК рівний 4-м бітам (n=4). Тоді код поля Галуа  $G_2^2$  формується у вигляді послідовності 1100:



Для 4-бітового повідомлення, яке передається існує  $m=2^4$  комбінацій ПСК, які в сигнальному та кодовому виді наведені в табл.8.

Дослідимо вплив однократних помилок у всіх комбінаціях 4-бітового ПСК.

Фактично при переході від двійкового коду до ПСК на сигнальному рівні формується четвірковий код, який має об'єм  $N=4^4 = 256$  комбінацій, з яких при передаванні даних використовують  $2^4 = 16$  комбінацій. Тобто сигнальна надлишковість запропонованого методу на основі ПСК, у випадку коли однократні помилки не призводять до формування дозволених комбінацій, буде дорівнювати 1/16.

Нехай передається двійковий код «0000», якому відповідає ПСК «++-», причому помилка виникає в першому розряді. Тоді під впливом завад в ІК можливе формування трьох ко-

Таблиця 8. Коректуючі властивості ПСК.

N <sub>n</sub>	код даних	start				stop				Кодове представлення даних			
		1	1	0	0	1	1	0	0				
0	0000	==	==	==	==	==	==	==	==	---	++	--	+++
1	0001	==	==	==	==	==	==	==	↓	---	++	-∨	+++
2	0010	==	==	==	==	==	↓	==	==	---	++	∨-	+++
3	0011	==	==	==	==	↓	↓	==	==	---	++	∨∨	+++
4	0100	==	==	==	↑	==	==	==	==	---	+∧	--	+++
5	0101	==	==	==	↑	==	↓	==	==	---	+∧	-∨	+++
6	0110	==	==	==	↑	↓	==	==	==	---	+∧	∨-	+++
7	0111	==	==	==	↑	↓	↓	==	==	---	+∧	∨∨	+++
8	1000	==	==	↑	==	==	==	==	==	---	∧+	--	+++
9	1001	==	==	↑	==	==	↓	==	==	---	∧+	-∨	+++
10	1010	==	==	↑	==	↓	==	==	==	---	∧+	∨-	+++
11	1011	==	==	↑	==	↓	↓	==	==	---	∧+	∨∨	+++
12	1100	==	==	↑	↑	==	==	==	==	---	∧∧	--	+++
13	1101	==	==	↑	↑	==	↓	==	==	---	∧∧	-∨	+++
14	1110	==	==	↑	↑	↓	==	==	==	---	∧∧	∨-	+++
15	1111	==	==	↑	↑	↓	↓	==	==	---	∧∧	∨∨	+++

Таблиця 9. Коректуючі властивості ПСК для 4-х біт даних.

N <sub>n</sub>	Код даних	Код ПСК	Помилка в 1-му розряді	Помилка в 2-му розряді	Помилка в 3-му розряді	Помилка в 4-му розряді
0	0000	++ --	■ + -- √ + -- - + --	+ ■ -- + √ -- + - --	+ + ^ - + + ■ - + + + -	+ + - ^ + + - ■ + + - +
1	0001	++ -√	■ + -√ √ + -√ - + -√	+ ■ -√ + √ -√ + - -√	+ + ^ √ + + ■ √ + + + √	+ + - ^ + + - ■ + + - +
2	0010	++ √-	■ + √- √ + √- - + √-	+ ■ √- + √ √- + - √-	+ + ^ - + + ■ - + + + -	+ + √ ^ + + √ ■ + + √ +
3	0011	++ √√	■ + √√ √ + √√ - + √√	+ ■ √√ + √ √√ + - √√	+ + ^ √ + + ■ √ + + + √	+ + √ ^ + + √ ■ + + √ +
4	0100	+^ --	■ ^ -- √ ^ -- - ^ --	+ √ -- + ■ -- + - --	+ ^ ^ - + ^ ■ - + ^ + -	+ ^ - ^ + ^ - ■ + ^ - +
5	0101	+^ -√	■ ^ -√ √ ^ -√ - ^ -√	+ √ -√ + ■ -√ + - -√	+ ^ ^ √ + ^ ■ √ + ^ + √	+ ^ - ^ + ^ - + + ^ - ■
6	0110	+^ √-	■ ^ √- √ ^ √- - ^ √-	+ √ √- + ■ √- + - √-	+ ^ ^ - + ^ + - + ^ ■ -	+ ^ √ ^ + ^ √ ■ + ^ √ +
7	0111	+^ √√	■ ^ √√ √ ^ √√ - ^ √√	+ √ √√ + ■ √√ + - √√	+ ^ ^ √ + ^ + √ + ^ ■ √	+ ^ √ ^ + ^ √ + + ^ √ ■
8	1000	^+ --	√ + -- ■ + -- - + --	^ ■ -- ^ √ -- ^ - --	^ + ^ - ^ + ■ - ^ + + -	^ + - ^ ^ + - ■ ^ + - +
9	1001	^+ -√	√ + -√ ■ + -√ - + -√	^ ■ -√ ^ √ -√ ^ - -√	^ + ^ √ ^ + ■ √ ^ + + √	^ + - ^ ^ + - + ^ + - ■
10	1010	^+ √-	√ + √- ■ + √- - + √-	^ ■ √- ^ √ √- ^ - √-	^ + ^ - ^ + + - ^ + ■ -	^ + √ ^ ^ + √ ■ ^ + √ +
11	1011	^+ √√	√ + √√ ■ + √√ - + √√	^ ■ √√ ^ √ √√ ^ - √√	^ + ^ √ ^ + + √ ^ + ■ √	^ + √ ^ ^ + √ ■ ^ + √ +
12	1100	^^ --	√ ^ -- ■ ^ -- - ^ --	^ √ -- ^ ■ -- ^ - --	^ ^ ^ - ^ ^ ■ - ^ ^ + -	^ ^ - ^ ^ ^ - ■ ^ ^ - +
13	1101	^^ -√	√ ^ -√ ■ ^ -√ - ^ -√	^ √ -√ ^ ■ -√ ^ - -√	^ ^ ^ √ ^ ^ ■ √ ^ ^ + √	^ ^ - ^ ^ ^ - + ^ ^ - ■
14	1110	^^ √-	√ ^ √- ■ ^ √- - ^ √-	^ √ √- ^ ■ √- ^ - √-	^ ^ ^ - ^ ^ + - ^ ^ ■ -	^ ^ √ ^ ^ ^ √ ■ ^ ^ √ +
15	1111	^^ √√	√ ^ √√ ■ ^ √√ - ^ √√	^ √ √√ ^ ■ √√ ^ - √√	^ ^ ^ √ ^ ^ + √ ^ ^ ■ √	^ ^ √ ^ ^ ^ √ + ^ ^ √ ■

дів із наступним синдромом невиявленої помилки:

1.  $\wedge + -- \quad \blacksquare + --,$
2.  $\vee + -- \quad \Rightarrow$
3.  $- + --$

де символ  $\blacksquare$  – відповідає можливій появі символу  $\wedge$ .

При цьому однозначно виявляється помилка в першому розряді, типу  $\vee +$  оскільки після старту не існує правильної комбінації, яка не містить двох послідовних символів  $++$  або двох символів  $\wedge \wedge$ . Аналогічно виявляється помилка при наявності комбінації  $- +$ .

Введемо помилку в другому розряді, 4-бітового коду даних:

1.  $+ \wedge -- \quad + \blacksquare --,$
2.  $+ \vee -- \quad \Rightarrow$
3.  $+ - --$

Оскільки двох таких стартових комбінацій нулів в базисі Галуа не існує, то помилка однозначно не виявляється лише в одному випадку.

Введемо помилку в третьому розряді даних:

1.  $+ + \wedge -$
2.  $+ + \vee - \quad \Rightarrow \quad ++ \blacksquare -,$
3.  $+ + + -$

У третьому розряді даним кодом ПСК помилка не виявляється теж в одному випадку.

Введемо помилку в четвертому розряді:

1.  $+ + - \wedge$
2.  $+ + - \vee \quad \Rightarrow \quad ++ - \blacksquare.$
3.  $+ + - +$

Аналогічно, як і в попередньому випадку не виявляється одна помилка.

Результати досліджень можливості виявлення однократних помилок для всіх кодових комбінацій даних від 0000 до 1111 приведені в табл. 9.

Розглянемо приклад можливості виявлення помилок при формуванні ПСК даних довільної довжини  $N = 2^k$ ,  $k = 2, 3, \dots$ , при використанні кодів Галуа типу  $G_2^2, G_2^3, G_2^4, \dots, G_2^k$ .

$$G_2^2 = 1100\dots$$

$$G_2^3 = 11101000\dots$$

$$G_2^4 = 1111010110010000\dots$$

$$G_2^{10} = 1111111111010101010110011\dots$$

В табл.10 показано приклади формування ПСК для різних кодових комбінацій даних.

В табл.11 показано приклади невиявлених помилок в ПСК при різних модулюючих кодах Галуа:  $G_2^3, G_2^4$ , з якої видно, що число невиявлених помилок також становить 25%.

Таким чином при формуванні інформаційних повідомлень на основі ПСК незалежно від довжини об'єму масиву даних та різних модулюючих кодів Галуа ймовірність виявлення помилок постійна і число невиявлених помилок становить 25%. Позитивною характеристикою ПСК є можливість виявлення та в окремих випадках виправлення помилок типу «стирання» та «вставок» бітів, які можуть виникати під впливом мультиплікативних завад. Функціональним обмеженням є відсутність можливості визначення числа нулів та одиниць в блоці даних.

## 2.2 Несиметричний рекурентний сигнальний код (НРСК)

Запропонований автором в роботі [13] принцип формування НРСК полягає в тому, що послідовність нулів, які передаються в пакеті даних нумеруються рекурентним кодом Галуа  $G_2^k$ . Причому біт Галуа "1" передається спадом, тобто маніпуляційним сигналом "10", а нулі бітів Галуа передаються сигналом "00". Для передачі одиниць використовують наростання імпульса. В результаті такого способу формування сигналів виникає можливість виявлення помилки при передаванні даних (рис.9).

Сигнальний код GK02, внаслідок використання сигналів фронту спаду для одиничних бітів коду Галуа, забезпечує крашу бітову синхронізацію по відношенню до сигнального коду GK01, в якому використовуються тільки потенціальні сигнали.

Крім того, викладений принцип сигнального кодування даних в базисі Галуа, як видно з табл.12, характеризується функціональним обмеженням, яке полягає в тому, що при повторенні нулів і їх кодуванні в базисі Галуа потенціальними сигналами «-1» відсутня бітова синхронізація. Тому для реалізації ефективної бітової синхронізації запропоновано модифікацію НРСК на основі використання зміни потенціалу «-1» на потенціал «+1» при однократному повторенні Галуа кодованих послідовностей нулів і кодуванню одиниць Галуа фронтом спаду.

В табл.12 наведений приклад модифікованого методу безнадлишкового сигнального кодування з бітовою синхронізацією інформації в базисі Галуа, на основі НРСК кодів, який характеризується ефективною блоковою і бітовою синхронізацією, а також можливістю виявлення та виправлення помилок типу зміни значення



Таблиця 10. Формування ПСК при різних кодових комбінаціях довжини даних.

	start	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	d11	d12	d13	d14	d15	d16	d17	d18	d19	d20	d21	d22	d23	d24	...	stop
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...	
$G_2^2$	$\frac{2+1}{---}$	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	...	+++	
$G_2^3$	$\frac{3+1}{---}$	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	...	++++	
$G_2^4$	$\frac{4+1}{---}$	+	+	+	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	-	...	+++++	
$G_2^k$	$\frac{k+10}{---}$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	+	+	...	+++++	
		1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	...		
$G_2^2$	$\frac{2+1}{---}$	^	^	v	v	^	^	v	v	+	^	-	v	+	+	v	v	^	+	-	-	^	^	v	...	+++	
$G_2^3$	$\frac{3+1}{---}$	^	^	^	v	^	v	v	v	+	^	+	v	+	-	v	v	^	+	+	-	^	v	v	...	++++	
$G_2^4$	$\frac{4+1}{---}$	^	^	^	^	v	^	v	^	+	-	-	^	-	-	v	v	^	+	+	+	v	^	v	...	+++++	
$G_2^k$	$\frac{k+10}{---}$	^	^	^	^	^	^	^	^	+	^	-	^	-	+	v	^	v	+	-	+	^	v	v	...	+++++	
		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...		
$G_2^2$	$\frac{2+1}{---}$	^	^	v	v	^	^	v	v	^	^	v	v	^	^	v	v	^	^	v	v	^	^	v	...	+++	
$G_2^3$	$\frac{3+1}{---}$	^	^	^	v	^	v	v	v	^	^	^	v	^	v	v	v	^	^	^	v	^	v	v	...	++++	
$G_2^4$	$\frac{4+1}{---}$	^	^	^	^	v	^	v	^	^	v	v	^	v	v	v	v	^	^	^	^	v	^	v	...	+++++	
$G_2^k$	$\frac{k+10}{---}$	^	^	^	^	^	^	^	^	^	v	^	v	^	v	^	^	v	^	^	^	v	^	v	...	+++++	

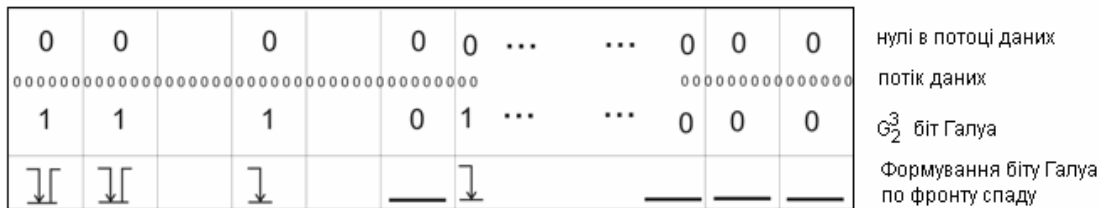


Рис.9. Метод формування нулів  $G_2^3$  в потоці даних.

Таблиця 11. Метод сигнального кодування двох байт даних, з використанням кодової послідовності Галуа  $G_2^3$  (11101000).

Д	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1
SK	10	10	10	01	10	01	01	10	01	01	01	10	01	10	10	01	01
SK1				↑		↑	↑		↑	↑	↑		↑			↑	↑
G(0)	1	1	1		0			1					0		0	0	
SKO1	_____				_____			_____					_____		_____		
SKO2	↓	↓	↓		↓			↓					↓		↓	↓	
GKO1	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____	_____
GKO2	↓	↓	↓	↑	↓	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑

Примітка: В табл.11 введені наступні позначення: Д- дані, які передаються; SK – сигнальний код каналу зв'язку (Манчестерський код); SK1–сигнальний код передавання "1" в каналах зв'язку; G(0) – код Галуа, який нумерує нулі; SKO1 – сигнальний код нулів, коли біт- Галуа "1" передається кодом "11", а біт-Галуа "0" передається кодом "00"; SKO2 – сигнальний код нулів, коли біт-Галуа "1" передається "10", а "0" → "00"; GKO1 – сигнальні коди маніпуляції, в яких нулі нумеруються кодом Галуа; GKO2 – сигнальні коди маніпуляції в яких нулі нумеруються кодом Галуа за спадом імпульсу.

Таблиця 12. Метод безнадлишкового кодування 4 байт даних в базисі Галуа, на основі НРСК кодів з бітовою синхронізацією.

	start	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	stop	
G				1	1	1	1	0						1			0	1		1							0	0	1	0	0		0	
SK1		↑	↑						↑	↑	↑	↑	↑	↑				↑		↑	↑	↑	↑						↑		↑			
G1				↘	↘	↘	↘							↘			↘		↘									↘						
G0																																		
GK		↑	↑	↘	↘	↘	↘		↑	↑	↑	↑	↑	↑	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	

біту на протилежний, а також стирань та вставок бітів внаслідок кодових завад.

При застосуванні безнадлишкового методу сигнального формування даних з захистом від помилок на основі кодів поля Галуа структура фрейму має вигляд, представлений на рис.10.

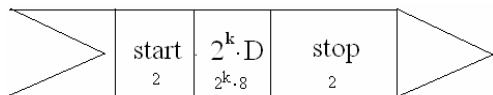


Рис.10. Структура фрейму протоколу G1.

Згідно структури фрейму протоколу G1, оцінку надлишковості передавання даних розраховуємо за формулою:

$$K_{н(G1)} = (4 + 2^k \cdot 8) / K_{фс} \cdot 2^k \cdot 8,$$

де  $K_{фс(G1)} = 0.75$ .

Приклад реалізації протоколу G1 в сигнальному просторі  $\pm 1$  показано на рис.11.

### 2.3 Симетричний рекурентний сигнальний код (СРСК)

Функціональними обмеженнями модифікованого НРСК є відсутність визначення числа нулів у блоці даних в тому випадку, коли довжина модуляційного коду Галуа є менша від довжини коду даних.

Другою модифікацією НРСК є використання коду Галуа для одночасного симетричного сигнального формування нулів і одиниць потоку даних, при чому об'єм коду Галуа відповідає об'єму даних, що передаються.

В табл.13 показані приклади формування сигналів даної модифікації СРСК, при  $N=2^4$ , де сигнали +1 та -1 нульових позицій коду Галуа формуються таким чином, щоб виключити повторення плюсів і мінусів та забезпечити сим-

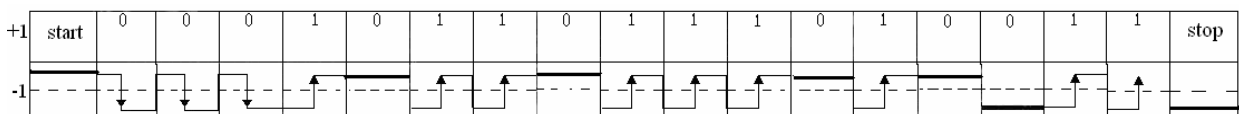


Рис.11. Структура протоколу G1 в сигнальному просторі  $\pm 1$ .

вольну синхронізацію. Тут SK і СК – відповідно сигнальні і символні коди.

З табл.13 видно, що в блоці даних об'ємом  $N=2^4$  завершення послідовності нулів відповідає коду Галуа 1010 і завершується символами  $\vee + \vee +$ , тобто  $N=7$ , згідно  $G_2^4$ . А завершення послідовності одиниць в коді Галуа відповідає символам  $\wedge - \wedge \wedge$ , тобто коду Галуа 1011,  $N=9$ .

Таблиця 13. Формування сигналів модифікованим РРСК, при  $N=2^4$ .

		d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	d11	d12	d13	d14	d15	d16
	Д	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	$G_2^4$	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0
	SK	↘	↘	↘	↘		↘		↘	↘		↘					
	СК	∨	∨	∨	∨	+	∨	+	∨	∨	+	∨	+	+	+	+	+
2	Д	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1
	$G_2^4$	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0
	SK1	↗	↗	↗	↗							↗				↗	↗
	SK0					↘	↘	↘	↘					↘			
	СК	∧	∧	∧	∧	∨	∨	∨	∨	-	+	∧	-	∨	+	∧	∧
3	Д	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	$G_2^4$	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0
	SK	↗	↗	↗	↗		↗		↗	↗		↗					
	СК	∧	∧	∧	∧	-	∧	-	∧	∧	-	∧	-	-	-	-	-

Недоліком даного способу формування сигнального коду є недостатньо ефективна символна (бітова) синхронізація при повторенні потенціальних сигналів +1 або -1.

Таким чином СРСК забезпечує ефективне симетричне кодування у вигляді кодів Галуа послідовності нулів і одиниць блоку даних з однозначним визначенням їх числа  $N_0 + N_1 = N$ , яке може бути використане для виявлення та виправлення помилок після передавання даних в ІК комп'ютерних системах.

### 3. Теоретичні основи оцінки ефективності сигнальних кодів

Ефективність різних методів маніпуляції можна оцінити на основі виразу [8].

$$\alpha_c = \frac{k_\phi \cdot d_{ij} \cdot \min \sqrt{\log_2 M}}{2\sqrt{E_c}},$$

де  $d_{ij}$  – кодова відстань між маніпульованими сигналами,  $M$  – число ознак маніпуляції,  $E_c$  – середня енергія сигналу,  $K_\phi$  – коефіцієнт форми сигналу, який залежить від базисної функції (табл.14).

$E_c$  розраховується за формулою:





$$E_c = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M S_i,$$

В оптичних каналах використовуються виключно дворівневі сигнали  $S_0=0$ ;  $S_1=+1$ .


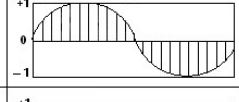

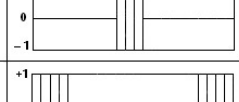
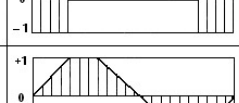

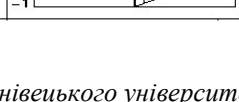
Тому  $d_{ij} = 1$ ;  $E_c = 0+1/2 = 0,5$ .

Ефективність методів маніпуляції залежить лише від форми сигналів  $K_\phi$ .

Таблиця 14. Значення коефіцієнта форми сигналу.

Форма сигналу	Коефіцієнт форми сигналу
	$K_\phi = 1$
	$K_\phi = 0,7$
	$K_\phi = 0,5$
	$K_\phi = 0,9$

Таблиця 15. Сигнальні вікна оптичних сигналів маніпуляції різних форм.

Тип сигналу	сигнальне вікно	$K_{\text{эф}}$
1 $S=1$		0.5
2 $S=\{1, T < 0.5\}$ $\{0, T \geq 0.5\}$		0.35
3 $S=\sin^2 x$		0.4
4 $\{0, T \leq 0.5\}$ $S=\{1, T < 0.5\}$ $\{0, T > 0.66\}$		0.16
5 $S=\{T < 0.5\}$ $\{T > 0.5\}$		0.33
6 $y = \frac{b}{a_1} x, \quad 0 \leq x \leq a_1$ $y = b, \quad a_1 \leq x \leq a_2$		0.45
7 $y = ax$		0.25

Дані аналізу ефективності методів маніпуляції в залежності від форми сигнального вікна представлено у таблиці 15 [6].

Для підвищення завадозахищеності оптичних каналів зв'язку необхідно використовувати широкосмугові сигнали на основі наступних випадкових послідовностей:

- ШПС (шумоподібні сигнали) [14-16];
- М-послідовності (послідовності довжини максимуму) [16];
- коди Баркера [17];
- модифіковані коди Баркера [18];
- двомірні коди Баркера [19].

### Висновки

Проведені дослідження методики сигнального кодування даних на основі коду Галуа з використанням рекурентних кодів, в оптичних сигналах у відкритих лініях зв'язку, показують, що можливості оптимізації та покращення ефективності методу передачі даних можуть бути реалізовані на основі безнадлишкового кодування даних, при використанні сучасних методів цифрової обробки сигналів. Даний метод дозволяє застосовувати невикористані біти для ефективнішого обміну даними.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Залмазон Л.А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи, и других областях. – М.: Наука, 1989. – 496 с.
2. Бекчанова Ш.Б., Зайниддинов Х.Н. Алгоритмы и структуры на основе быстрых преобразований Хаара. Техника юлдузлари. Ташкент. – 2002. – №4. – С.45-54.
3. Николайчук Я.Н. Методология формирования, передачи и обработки дискретных сообщений в НВС // Материзлы VI Всесоюзной школы – семинара РОИ. – 67. – Львов, ФМИ. 1957. – С.127-129.
4. Николайчук Я.М., Заставний О.М. Дослідження системних характеристик двомірних кодів з особливими кореляційними властивостями // Вісник технологічного університету Поділля. – Хмельницький, 2004. – №2. – ч.1, Т2.
5. Якув В.В. Оцінка ефективності двомірних методів маніпуляції сигналів з самосинхронізацією. – Івано-Франківськ.: ІФДТУНГ, 1998.
6. Grynchyshyn T. Methods of Manipulation of Signals in Optical Channels of Communications. // Матеріали міжнародної конференції TCSET'2004. – Львів-Славське, 2004. – С.363-365.
7. Я.М. Николайчук. Теорія джерел інформації. – Тернопіль:ТНЕУ,2008. – 536 с.

8. Зюко А.Г. и др. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации. – М.: Радио и связь, 1985. – 272с.
  9. Петришин Л.Б., Николайчук Я.Н., Ищеряков С.М. Цифровая обработка сигналов на основе преобразования кодов поля Галуа // Методы и микроэлектронные средства цифровой обработки и преобразования сигналов.– Рига: ИЭВТ АН Латвии. – 1989.– С.130-32.
  10. Петришин Л.Б. Теоретичні основи перетворення форми та цифрової обробки інформації в базисі Галуа: Навч. посібник. – Київ.: ІЗІМН МОНУ, 1997. – 237 с.
  11. Петришин Л.Б. Перетворення форми та цифрової обробки інформації в кодових системах базису Галуа. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ МОНУ, 1997. – 236с.
  12. Black U. The V Series Recommendations: Standards. New York: McGraw-Hill, 1995.
  13. Столлингс В. Передача данных. 4-е издание – СПб:Питер, 2004 – 750 с.
  14. Гринчишин Т.М. Кодування даних в комп'ютерних розподілених системах з відкритим оптичним каналом зв'язку на основі рекурентних ГК-кодів. // Вісник Технологічного університету Поділля. Хмельницький – 2007. –Т1, ч.1. – №2. – С. 74-77.
  15. Кислов В.Я. и др. Корреляционные свойства шумоподобных сигналов, генерируемых системами с динамическим хаосом // Радиотехника и электроника. – 1997. – Том 42. – С. 134.
  16. Николайчук Я.М., Заставний О. М. Теорія побудови двомірних шумоподібних сигналів для комп'ютерних систем та мереж // КУСС - 2003. Тези доповідей сьомої міжнародної науково - технічної конференції – Вінниця: «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 2003 – 95с.
  17. Николайчук Я.М., Шевчук Б.М. Методы цифровой обработки шумоподобных сигналов на основе кодовых ключей. – Киев, Сб. тр. ИКАН УССР, 1988.
  18. Николайчук Я.М., Заставний О.М. Дослідження системних характеристик двомірних кодів з особливими кореляційними властивостями // Вісник технологічного університету Поділля, Хмельницький, 2004. – №2. – ч.1, Т2. – ст. 107-110.
  19. Заставний О.М., Николайчук Я.М., Круцкевич Н.Д., Король Р.І. Теорія та принципи побудови спецпроцесора на основі базисів Радемахера, Крестенсона, Галуа // Тези доповідей сьомої міжнародної науково - технічної конференції. – Вінниця: «УНІВЕРСУМ – Вінниця», 2003 – 114с.
- Nykolajchuk Ya.M., Grynychschyn T.M., Zastavnuj O.M., Voronych A.R. **Research of efficiency of alarm codes forming**
- Николайчук Я.М., Гринчишин Т.М., Заставний О.М., Воронич А.Р. **Исследование эффективности формирования сигнальных кодов**
- Изложены теоретические основы и принципы формирования сигнальных кодов, которые используются для манипуляции бит-ориентированных потоков данных в информационных каналах компьютерных систем с учетом степени использования сигнальных пространств и формы сигналов, скорости передачи сообщений и степени защиты от ошибок.