

Васюта К. С., Сніцаренко В. В.

## ВИПРАВЛЕННЯ ПОМИЛОК ПРИ ПЕРЕДАЧІ ЦИФРОВИХ ПОВІДОМЛЕНЬ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРОГРАМНИХ МЕТОДІВ

**Анотація.** Доповідь присвячена особливостям розробки та функціонування цифрового режиму радіозв'язку FT8, перевагами якого є можливість застосування на дуже малих потужностях, з високою надійністю та при надзвичайно низькому співвідношенні сигнал/шум. Недоліками цифрового режиму радіозв'язку FT8 є: залежність від синхронізації, обмежена пропускна здатність та низька ефективність під час передачі довгих розмов.

**Ключові слова:** режим радіозв'язку, матриця Костаса, передача/отримання даних.

**Abstract.** The report is devoted to the features of the development and operation of the FT8 digital radio communication mode, the advantages of which are the possibility of using it at very low powers, with high reliability and with an extremely low signal-to-noise ratio. The disadvantages of the FT8 digital radio communication mode are: dependence on synchronization, limited bandwidth and low efficiency during the transmission of long conversations.

**Keywords:** radio mode, Costas matrix, data transmission and reception.

### Вступ

Цифрові потоки даних постійно передаються за допомогою комп'ютерів, мобільних телефонів, радіо та інших приладів. Пошук шляхів передачі та отримання сигналів кращої якості за мінімальних потреб триває безперервно [1-3].

Результатом багаторічних спроб вдосконалення способів передачі даних стала успішна розробка у 2001 році програмного забезпечення WSJT (weak signal communication by Joseph Taylor), тобто “зв'язок із застосуванням слабких сигналів від Джозефа Тейлора” [2]. Цей а стосунок в деякому сенсі здійснив революцію в любительському радіозв'язку. Програма дозволила багатьом користувачам з легкістю з'єднувати трансивери з комп'ютерами, та експериментувати з режимами слабких сигналів. Адже не всі мають можливість працювати в ефірі на великій потужності, чи використовувати потужні антени. Окрім того, в сучасних містах дуже багато джерел завад в радіодіапазоні.

На зображенні (рис. 1) представлено структуру програмного забезпечення WSJT, на якій горизонтальною шкалою позначено поточну частоту відносно опорної для даного діапазону, а вертикальною шкалою позначено час. Зелені лінії відслідковують 15с проміжки, на протязі яких йде або передача повідомлень або прослуховування та декодування. Самі повідомлення подано у вигляді блоків в кольорах жовтогарячої палітри. Чим більше потужність отриманого сигналу, тим червоніше блок.

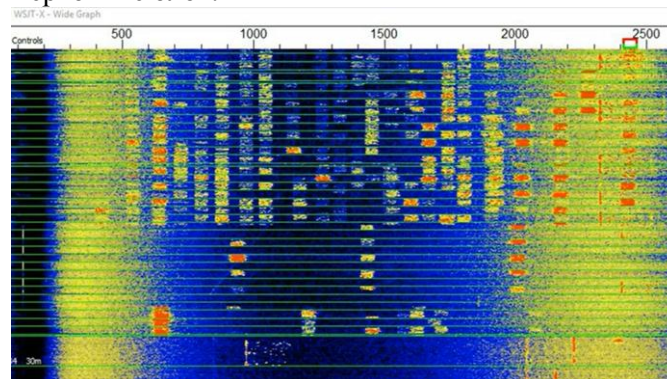


Рис. 1. Структура програмного забезпечення WSJT

У 2012 році було розроблено програмне забезпечення WSJT-X [3], а у 2017 році – цифровий режим радіозв'язку FT8 [4].

Метою роботи є розгляд особливостей знаходження помилок передачі даних із застосуванням цифрового режиму радіозв'язку FT8.

### Результати дослідження

FT8 – це скорочення, що означає частотну модуляцію з 8-ми значним зсувом від Франке та Тейлора. Розмір кожного значення обмежений 13-ма символами, та використовується 15 секундний цикл з 50Гц пропускної здатності. Спершу FT8 було створено Джо Тейлором та Стівом Франке для радіозв'язку, шляхом відображення від випадково виникаючого, чи як кажуть геофізики спорадичного “Е-шару” іоносфери, на діапазоні довжини хвилі 6м при відповідній частоті 50Гц, яку за основу використовують американські радіоаматори. Такий вид зв'язку передбачає довгострокове очікування відповідних умов поширення від іоносфери, та швидкої передачі коротких повідомлень.

Всі передачі FT8 містять однакові матриці Костаса, розміром  $7 \times 7$  на початку, в середині та в кінці, як і в таблиці Судоку кожна позиція має значення від 0 до 7 та може використовуватись лише один раз (рис. 2а). Якщо провести лінію від кожного заповненого квадрату до всіх інших таких же квадратів, то виявиться, що жодні дві лінії не зможуть мати однакову довжину та кут нахилу. В масиві Костаса  $7 \times 7$  існує 5040 можливих комбінацій, оскільки добуток всіх цілих чисел від 1 до 7 якраз дорівнює 5040. Але тільки 200 з таких комбінацій відповідають вимогам Костаса про унікальність проведених ліній. В усіх передачах FT8 використовується позиції 3;1;4;0;6;5;2, що виявляється допустимою матрицею Костаса (рис. 2б)

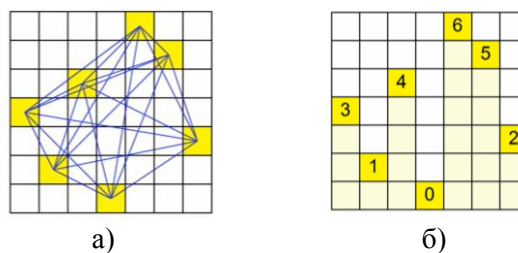


Рис. 2. Ілюстрація до змісту матриці Костаса: а) пояснення до структури матриці; б) пояснення до значень матриці

Програмне забезпечення виявляє саме такі сигнали FT8, що починаються саме з таких матриць. Всі інші матриці Костаса, або інші дані відхиляються (рис. 3).

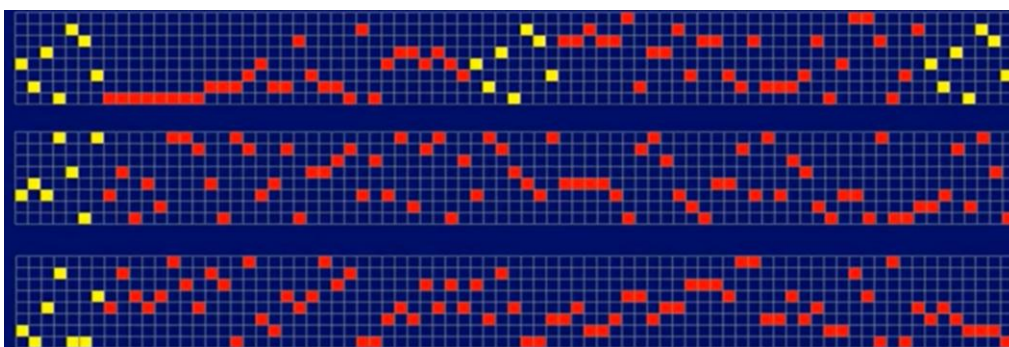


Рис. 3. Ілюстрація до функціонування режиму радіозв'язку FT8

Базові частоти FT8 складаються з восьми тонів. Кожен тон складається з трьох двійкових бітів. Час отримання кожного повідомлення FT8 відносно годин комп'ютера має бути в межах  $\pm 1\text{с}$ , для чого необхідно періодично синхронізувати годинник комп'ютера з точним всесвітнім часом UTS. Повідомлення FT8, з надмірно великим DT, важко декодувати.

У 1961 році математиком та вченим Веслі Петерсоном було створено основну концепцію перевірки отриманих цифрових повідомлень циклічним надмірним кодом (CRC–cyclic-redundancy-check). Це перевірочний код, який використовується в мережах

цифрового зв'язку для виявлення помилок даних, шляхом поділу одного многочлена на інший та подальшою оцінкою залишку, або перевірки його значення.

Така перевірка є частиною процесу кодування на передаючій стороні, та процесу декодування на приймаючій стороні. Код CRC забезпечує ступінь впевненості, в тому що отримані дані достовірні, в порівнянні з тими які були передані. Але не надає інформації які саме дані помилки були зроблені під час передачі/приймання повідомлення.

На прикладі (рис. 4) наведено двійкову послідовність, в якій відображено, що відправник та отримувач використовують один і той самий код CRC 101 із залишком 0, щоб указати не викривлені істинні дані. Якщо залишок не дорівнює 0, то буде відомо про помилку даних але не можна її буде виявити.

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |   |   |   | 1 | 0 | 1 |
|   |   | 1 | 1 | 1 | 1 |   |   |   |
|   |   | 1 | 0 | 1 |   |   |   |   |
|   |   |   | 1 | 0 | 1 |   |   |   |
|   |   |   |   | 1 | 0 | 1 |   |   |
|   |   |   |   |   | 0 |   |   |   |

Рис. 4. Ілюстрація варіанта коду CRC

Для пошуку помилки використовується код з малою щільністю перевірок на парність (LDPS—low-densityparity-check-code) (рис. 5). Біти даних і парності в кожному колі мають давати 0, за правилам двійкового складання без переносу, чи так званої логічної операції виключності „або”, тобто  $0+0=0$ ;  $1+1=1$ ;  $1+1=0$  без перенесення.

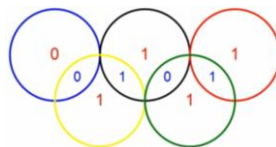


Рис. 5. Ілюстрація варіанта коду LDPS

Цей приклад відображає як біти даних та парності можуть використовуватись для виявлення місця розташування помилки, і з деякими обмеженнями вірогідності цієї помилки. Звичайно ж LDPS насправді набагато складніше ніж відображено на зображенні (рис. 4). Різновиди LDPS використовуються в багатьох протоколах цифрового зв'язку, включаючи стільниковий зв'язок 5G.

На зображенні (рис. 6) наведено кінцевий формат FT8. Всі повідомлення мають 77 інформаційні біти, 14 бітів коду CRC та 83 біти парності LDPC, всього 174 біти.

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

77 біт  
DATA

14 біт  
CRC

83 біти  
LDPC

Рис. 6. Кінцевий формат FT8

Вони видозмінюються в двійковий код Грея, та збираються в групи по 3, щоб отримати 58 тонів. Надалі до них додається 3 матриці Костаса по 7 тонів кожна, всього 21 тон, щоб визначити що це повідомлення відповідає протоколу FT8. Як результат маємо, що повідомлення складає 79 тонів, що еквівалентно 237 двійковим бітам (рис. 7).



Рис. 7. Повідомлення формату FT8

Таким чином, Джозеф Тейлор та Стів Франке дали можливість використовувати нове безкоштовне програмне забезпечення для радіоаматорів по всьому світу.

### Висновки

Розглянуті особливості розробки та функціонування цифрового радіозв'язку FT8, встановлено перевагами, які дозволяють передавати цифрові повідомлення при малій потужності сигналу, з високою надійністю та при надзвичайно низькому співвідношенні сигнал/шум. В той же час виникає потреба удосконалення програмного методу FT8, а саме: усунення залежності від синхронізації, обмеження пропускної здатності та низької ефективності під час передачі довготривалих повідомлень.

### Список використаних джерел:

1. Taylor J., Walker B. WSPRing Around the World. QST. Nov. 2010. P. 30–32.
2. Taylor J. Open Source WSJT: Status, Capabilities, and Future Evolution. 12th International EME Conference. 2006. P. 1–11. URL: [https://web.archive.org/web/20221027181720/https://physics.princeton.edu/pulsar/K1JT/K1JT\\_eme2006.pdf](https://web.archive.org/web/20221027181720/https://physics.princeton.edu/pulsar/K1JT/K1JT_eme2006.pdf) (дата звернення: 20.10.2025).
3. Taylor J., Franke S., Sommerville B. Work the World with WSJT-X. Part 1: Operating Capabilities. QST. Oct. 2017. P. 30–36.
4. Hinson G. FT8 Operating Guide: Weak signal HF DXing for technophiles. Version 2.37. 2021. 84 p. URL: [https://www.g4ifb.com/FT8\\_Hinson\\_tips\\_for\\_HF\\_DXers.pdf](https://www.g4ifb.com/FT8_Hinson_tips_for_HF_DXers.pdf) (дата звернення: 20.10.2025).

**Васюта Костянтин Станіславович** – доктор технічних наук, професор, заступник начальника університету з наукової роботи Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: kohafish@ukr.net ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1978-3717>.

**Сніцаренко Віталій Вікторович** – начальник науково-дослідного відділу (моделюючих та інформаційних систем Повітряних Сил) науково-дослідного управління (розвитку і застосування Повітряних Сил) наукового центру Повітряних Сил, м. Харків, вул. Сумська, буд. 77/79, інд. 61023, e-mail: sniczarenko@ukr.net ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7858-5534>.

**Kostiantyn Stanislavovych Vasiuta** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Head of the University for Scientific Work of the Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St., Building 77/79, Ind. 61023, e-mail: kohafish@ukr.net ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1978-3717>.

**Vitalii Viktorovich Snitsarenko** – Head of the Research Department (Air Force Modeling and Information Systems) of the Research Department (Air Force Development and Application) of the Air Force Research Center of the Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Sumska St., Building 77/79, Ind. 61023, e-mail: sniczarenko@ukr.net ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7858-5534>.