

МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНТЕРЛІВЕРІВ У ТУРБО-КОДОВІЙ КОНСТРУКЦІЇ

Кулик А. Я., Іванов Ю. Ю.

Вінницький національний технічний університет

Розглядаються питання, пов'язані з інтерлівером – ключовим елементом турбо-кодової конструкції. Показано сучасні методи оцінювання ефективності перемішувачів.

The problems, associated with interleaver – the key element of turbo-code construction, are considered. The modern methods of evaluating the interleaver effectiveness are presented.

К.Е. Шеннон у роботі [1] показав, що найкращим кодом буде той код, який передає повідомлення за час $t \rightarrow \infty$, формуючи в кожний момент часу t_k випадкові кодові елементи. У приймача є нескінченна кількість повідомлень, на які вплинув шум з каналу зв'язку. Із цих варіантів декодер вибирає копію, яка найбільш близька до переданого повідомлення. Дана модель представляє теоретичний ідеальний код, який виправляє всі помилки у сигналі.

Найбільш помітним досягненням (кроком до ідеального коду) в теорії завадостійкого кодування за останні роки є турбо-коди (ТК) [2], які володіють особливою здатністю забезпечувати характеристики завадостійкості передавання інформації, близькі до теоретично отриманих значень. Якщо необхідно працювати з об'ємними інформаційними повідомленнями на високих швидкостях передавання даних, то застосовують саме даний код [3, 4]. ТК знайшов практичне застосування у передаванні телеметричної інформації з космічних апаратів, у системах рухомого радіозв'язку третього (3G) та четвертого покоління (4G), а також був запропонований групою вчених ITU-T у чорнових рекомендаціях G.922.1.bis і G.922.2.bis для стандарту ADSL [3, 5]. Не дивлячись на те, що впродовж багатьох років ТК не розглядалися, останнім часом спостерігається збільшення кількості досліджень у різних наукових роботах, наприклад [1 – 10]. Це пов'язано з тим, що сучасні технічні можливості вийшли на новий рівень розвитку і дозволяють застосовувати складні обчислювальні алгоритми, які забезпечують високий ступінь виправлення помилок, проте ряд питань, як і раніше, вимагає дослідження.

Головний принцип класичного турбо-кодування – використання двох паралельно працюючих елементарних кодерів. При цьому

інформаційний блок кодується двічі, причому другий раз – після попереднього випадкового перемішування бітів. Декодована інформація з виходу першого (другого) декодера використовується в якості апіорної інформації для входу другого (першого) декодера з метою уточнення результату декодування. Подібну операцію можна проводити багаторазово. Реалізація ТК залежить від розміру та алгоритму перемішувача, моделей кодерів, алгоритму декодування та кількості ітерацій декодера [6].

Одним із ключових елементів розглянутої конструкції є перемішувач (інтерлівер, пермутатор). З технічної точки зору інтерлівер π – це апаратний блок, який реалізує перемішування інформації на етапі передавання за певним програмно заданим законом (детермінованим, випадковим). Математично пермутатор π – це алгебраїчна система, яка виконує бієкцію $f : Z(q) \rightarrow Z(q)$, тобто дозволяє відобразити набір елементів $Z(q)$ на $Z(q)$, де q є довжиною блока або його розміром. Задача деінтерлівера π^{-1} – виконати зворотні перетворення і відновити вихідну структуру інформації на етапі приймання. Операція перемішування поширена в турбо-кодуванні як один із способів боротьби з помилками, тобто на вході декодера помилки рівномірно розподіляються в часі, утворюючи потік незалежних помилок. Закон перемішування може визначатися математичною формулою, табличною формою запису або описом закономірності побудови пермутатора [7, 8].

Для оцінювання ефективності роботи інтерліверів в ТК конструкції розглянемо наступні методи [8 – 10].

1. Дисперсія (dispersion) σ_{int} – метод для дослідження “випадковості” інтерлівера, який дає можливість обчислити величину розсіювання набору елементів $Z(q)$, порівнюючи відстані між двома значеннями (i, j) в початковому наборі елементів $Z(q)$ та в перемішаному. Оскільки розглядаються пари елементів (i, j) з набору $Z(q)$, то σ_{int} можна обчислити за формулою

$$\sigma_{\text{int}} = \frac{|D(\pi)|}{C_q^2} = 2 \cdot \frac{|D(\pi)|}{q \cdot (q-1)}, \quad (1)$$

де $D(\pi) = \{(j-i, \pi(j) - \pi(i)) \mid 0 \leq i < j < q\}$, $|D(\pi)|$ – кардинал набору різниць $D(\pi)$.

2. Спредом (spread) перестановки π називають найбільше ціле число s таке, що

$$|i - j| < s \Rightarrow |\pi(j) - \pi(i)| \geq s, \quad (2)$$

де вхідні значення $(i, j) \in Z(q)$, $i \neq j$, $1 \leq s \leq q$.

3. Спредінг фактором (spreading factor) для $f : Z(q) \rightarrow Z(q)$ є всі точки (s, t) , які задовольняють умову

$$|i - j| < s \Rightarrow |\pi(j) - \pi(i)| \geq t, \quad (3)$$

для всіх $(i, j) \in Z(q)$, $i \neq j$, $t = 1, 2, 3, \dots$

4. Пара значень (s, t) називається екстремальним спредінг фактором, якщо $(s+1, t)$ або $(s, t+1)$ не є спредінг фактором.

5. s -параметром називається максимальне значення s таке, що для деякого $s \leq t$ пара значень (s, t) є екстремальним спредінг фактором.

6. Спред фактором (spread factor) називається мінімальне значення метрики Лі Λ між двома точками $(i, \pi(i))$ та $(j, \pi(j))$, тобто $\min(\Lambda((i, \pi(i)), (j, \pi(j))))$ для всіх $i < j$, де

$$\Lambda((i, \pi(i)), (j, \pi(j))) = |i - j|_q + |\pi(i) - \pi(j)|_q. \quad (4)$$

7. У роботах [9, 10] розглядається метрика циклічної кореляційної суми $MCCS$ (metric of cycle correlation sum). Пропонується досліджувати кореляцію $C_{i,j}$ між вхідною і вихідною зовнішньою інформацією з MAP декодера, використовуючи стандартні кореляційні коефіцієнти. Такий коефіцієнт між двома позиціями бітів в згортковому коді є функцією відстані Хемінга між ними, і може бути апроксимований за допомогою експоненціальної функції. Розглядаючи всі пари вхідних позицій величин $i < j$ і вихідних значень $\pi(i)$ та $\pi(j)$ для набору елементів $Z(q)$, отримано вираз

$$MCCS = \sum_{(i,j) \in Z(q)} C_\Lambda = \sum_{(i,j) \in Z(q)} \exp(-c \cdot \Lambda). \quad (5)$$

де c – параметр, який пов'язаний з компонентним кодом і обчислюється з використанням апроксимації [10].

Менше значення *MCCS* означає меншу кореляцію, відповідно вищу ефективність турбо-декодера, а значить кращі характеристики ітеративної конструкції в цілому.

Отже, для дослідження роботи ТК конструкції в системах зв'язку необхідним етапом є проведення комп'ютерного математичного моделювання з використанням розглянутих методів для оцінювання ефективності інтерліверів.

1. Shannon C.E. A Mathematical Theory of Communication // Reprinted from The Bell System Technical Journal. – 1948. – V. 27. – P. 379–423, 623–656.
2. Berrou C., Glavieux A., Thitimajshima P. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes // IEEE Transactions on Information Theory. – 1996. – V. 44. – № 10. – P. 1064-1070.
3. Кулик А.Я., Кривогубченко Д.С., Іванов Ю.Ю. Декодування та реалізація алгоритму ВСJR для турбо-коду стандартизованого в DVB-RCS // Вісник Сумського державного університету. Серія: Технічні науки. – Суми: СУМДУ, 2012. – Т. 4. – № 1. – С. 84-94.
4. Кулик А.Я., Кривогубченко Д.С., Іванов Ю.Ю. Турбо-код: властивості та застосування для завадостійкого кодування // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – № 2(22). – С. 25-32.
5. Іванов Ю.Ю., Кулик А.Я. Застосування турбо-кодів у розподілених комп'ютерних системах різного функціонального призначення // матер. VI міжнародної конференції з оптико-електронних інформаційних технологій "Photonics-ODS 2012" / – Вінниця: ВНТУ, 1-4 жовтня, 2012 року. – С. 31.
6. Johnson S.J. Iterative Error Correction // Turbo, Low-Density Parity-Check and Repeat-Accumulate Codes. – New York: Cambridge University Press, 2009. – 356 p.
7. Andrews K., Heegard C., Kozen D. Theory of Interleavers [Web resource] // Access mode: <http://www.nativei.com/~heegard/papers/interl.pdf>.
8. Moreno B., Smithy L., Viteriz A., Yao K.D. Exploring Interleavers in Turbo Coding // California State Polytechnic University, Pomona and Loyola Marymount University, 2005. – 43 p.
9. Xie K., Wang W., Li J. On the Analysis and Design of Good Algebraic Interleavers: proclaimed on the Turbo-Code // 6th International ITG-Conference on Source and Channel Coding "TURBOCODING" / – Munich: 3-7 April, 2006. – P. 1-6.
10. Xie K., Wang W., Li J. Coprime Interleavers Revisited: proclaimed on the Global Telecommunications Conference "GLOBECOM 06" / – San Francisco: 27 November - 1 December, 2006. – P. 1-5.