

АДАПТИВНИЙ МЕТОД ДЕКОДУВАННЯ ЗГОРТКОВИХ ТУРБОКОДІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У даній роботі запропоновано адаптивний метод декодування турбокодів, який, залежно від різного рівня шуму у каналі зв'язку, використовує різні ітеративні методи декодування. Система вибирає метод декодування після оцінювання якості каналу зв'язку з використанням автоматичного запиту повторного передавання даних, що дозволяє підвищити ефективність програмованої радіосистеми.

Ключові слова: програмовані радіосистеми, турбокод, ітеративні методи декодування, MAP, Quad-log-MAP, max-log-MAP, автоматичний запит повторного передавання.

Abstract

In this paper is proposed an adaptive method of turbo codes decoding, which, depending on the different noise level in the communication channel, uses various iterative decoding methods. The system selects a decoding method after evaluating the channel's quality using an automatic repeat request, that will increase the efficiency of software-defined radiosystem.

Keywords: software-defined radio, turbo code, iterative decoding methods, MAP, Quad-log-MAP, max-log-MAP, automatic repeat request.

Вступ

У сучасному світі інформаційних технологій вимоги до швидкості та надійності переданих даних неперервно зростають. Тому активно розвиваються та починають відігравати все більш важливу роль програмовані радіосистеми (SDR – software-defined radio). Така система представляє собою систему радіозв'язку, в якій програмне забезпечення використовується для керування роботою певних спеціалізованих мікропроцесорних пристроїв, які обробляють радіосигнал, тобто програма керує формою сигналу, спектром частот, процесом модуляції/демодуляції, кодування/декодування тощо. Фактично SDR-система може і приймати, і передавати практично будь-які радіосигнали за допомогою гнучкої й адаптивної програми [1]. Важливим питанням є забезпечення такої системи завадостійкістю, що неможливо без вибору завадостійкого коду та ефективної реалізації його декодера, який, зазвичай, є найбільш складним компонентом кодека [2-4].

Одним із найбільш ефективних сучасних кодів є згортковий турбокод або паралельна конкатенація згорткових кодів (PCCC – parallel concatenated convolutional codes), яку вперше представлено у фундаментальній роботі [5]. У ній запропоновано вдосконалення методу декодування BCJR та створено можливість ітеративного оптимального посимвольного декодування турбокодів за максимумом апостеріорної імовірності (MAP – maximum a posteriori probability). Даний метод виявився надзвичайно ефективним, оскільки дозволяє досягти компромісу між високими показниками вірогідності та швидкості передавання даних у каналах з низькою енергетикою [2]. Тому ведуться дослідження у напрямі його вдосконалення [6-8].

Метою даної роботи є розробка адаптивного методу декодування турбокодів, який може використовувати різні компонентні методи (log-MAP, Quad-log-MAP або max-log-MAP) залежно від результатів індикатора якості каналу зв'язку та автоматичного запиту повторного передавання, що дозволяє підвищити ефективність роботи програмованої радіосистеми системи в цілому, тобто зменшити обчислювальну складність декодування або отримати енергетичний вигравш.

Результати дослідження

Для роботи з методами турбо-декодування використовують величини $LLR_{анп}$, $LLR_{кан}$ та $LLR_{зовн}$, які представляють собою апіорну, каналну та зовнішню інформацію. Вихідна або апостеріорна інформація з MAP декодера може бути обчислена з використанням наступної формули [4, 8-10]:

$$LLR_{MAP}(d_k) = LLR_{анп}(d_k) + LLR_{кан} \cdot x_k + LLR_{зовн}(d_k) = \ln \frac{\sum_{d_k=-1}^{(s',s)} \alpha_{k-1}(s') \cdot \beta_k(s) \cdot \gamma_k(s',s)}{\sum_{d_k=-1}^{(s',s)} \alpha_{k-1}(s') \cdot \beta_k(s) \cdot \gamma_k(s',s)}, \quad (1)$$

де $\alpha_k(s) = \sum \gamma_k(s',s) \cdot \alpha_{k-1}(s')$ – пряма метрика; $\beta_{k-1}(s) = \sum \gamma_k(s',s) \cdot \beta_k(s')$ – зворотна метрика; $\gamma_k(s',s) \approx \exp\left(\frac{1}{2} \cdot (d_k \cdot LLR_{анп}(d_k) + LLR_{чн} \cdot (d_k \cdot x_k + \sum_{k=2}^n d_{k,v} \cdot x_{k,v}))\right)$ – реберна метрика; $d_k, d_{h,v}$ – k -ий систематичний бінарний інформаційний символ та його h перевірочних символів для v -ого кодера; $x_k, x_{k,v}$ – зашумлена версія символів d_k та $d_{k,v}$; s' та s – попередній та теперішній стани на ґратці коду.

Метод $log-MAP$ еквівалентний до MAP , працює в логарифмічній області та має меншу обчислювальну складність. Відповідні метрики розраховуються наступним чином [4, 8, 9]:

$$\gamma_k^{LM}(s',s) = \ln \gamma_k(s',s) = \frac{1}{2} \cdot \left(d_k \cdot LLR_{анп}(d_k) + LLR_{кан} \cdot (d_k \cdot x_k + \sum_{k=2}^n d_{k,v} \cdot x_{k,v}) \right), \quad (2)$$

$$\alpha_k^{LM}(s) = \ln \alpha_k(s) = \ln \left(\sum \exp(\gamma_k^{LM}(s',s) + \alpha_{k-1}^{LM}(s')) \right), \quad (3)$$

$$\beta_{k-1}^{LM}(s') = \ln \beta_{k-1}(s') = \ln \left(\sum \exp(\gamma_k^{LM}(s',s) + \beta_k^{LM}(s)) \right). \quad (4)$$

Функцію суми експоненціальних складових представляють рекурсивно у виді [4]:

$$f(A_1 \dots A_N) = \ln \sum_{i=1}^N e^{A_i} = f(A_1, f(A_2, \dots, f(A_{N-2}, f(A_{N-1}, A_N))). \quad (5)$$

Для двох складових можна застосувати логарифм Якобіана, який задається у такому вигляді з коректуючою функцією f_{cor} :

$$f(A_{N-1}, A_N) = \ln(\exp(A_{N-1}) + \exp(A_N)) = \max(A_{N-1}, A_N) + f_{cor}. \quad (6)$$

Тоді апостеріорний вихід з $log-MAP$ декодера можна записати в формі:

$$LLR_{LM}(d_k) = \left(\max_{d_k=-1}^{(s',s)} (\alpha_{k-1}^{LM}(s') + \beta_k^{LM}(s) + \gamma_k^{LM}(s',s)) + f_{cor.1} \right) - \left(\max_{d_k=-1}^{(s',s)} (\alpha_{k-1}^{LM}(s') + \beta_k^{LM}(s) + \gamma_k^{LM}(s',s)) + f_{cor.2} \right). \quad (7)$$

Для економії часу, спрощення та швидкості обчислень для функції f_{cor} використовують апроксимацію [4, 9, 10]. Наприклад, проста квадратична апроксимація представлена у такому вигляді

$$f_{кор} = \begin{cases} 0,0568 \cdot z^2 - 0,3768 \cdot z + 0,6520, & \text{if } z \in [0; 4]; \\ 0,0000, & \text{if } z \in (4; \infty). \end{cases} \quad (8)$$

Для ще більшого спрощення коректуючу функцію можна взагалі виключити із обчислень. Такий субоптимальний метод турбо-декодування має назву *max-log-MAP*. Відповідні апостеріорні рішення можна записати у такій формі [7, 8]

$$LLR_{MLM}(d_k) = \max_{d_k=+1}^{(s',s)} (\alpha_{k-1}^{LM}(s') + \beta_k^{LM}(s) + \gamma_k^{LM}(s',s)) - \max_{d_k=-1}^{(s',s)} (\alpha_{k-1}^{LM}(s') + \beta_k^{LM}(s) + \gamma_k^{LM}(s',s)). \quad (9)$$

Кількість елементарних математичних операцій, які необхідно виконати для даних методів декодування залежно від кількості комірок пам'яті кодера m та перевірюваних символів h , розраховується за аналітичними виразами

$$f_{MAP}(m, h) = 2^{m+3} \cdot h + 612 \cdot 2^m + 722, \quad (10)$$

$$f_{Quad-LM}(m, h) = 2^{m+3} \cdot h + 130 \cdot 2^m - 12, \quad (11)$$

$$f_{MLM}(m, h) = 2^{m+3} \cdot h + 44 \cdot 2^m + 6. \quad (12)$$

Запропоновано застосовувати адаптивний метод турбо-декодування, який може використовувати один із даних методів залежно від поставлених вимог. Для цього необхідно включити в систему індикатор каналу зв'язку (*CQI* – channel quality indicator), який на основі вимірювання відношення сигнал/шум у каналі може приймати значення від 0 до 15. Значення індикатора рівне 0 означає, що немає корисного сигналу або канал вийшов з ладу; 1-5, 6-10, 11-15 – канал з високим, середнім та низьким рівнем шуму відповідно. Також додатково в програмовану радіосистему включено метод виявлення помилок, який базується на автоматичному запиті повторного передавання даних (*ARQ* – automatic repeat request). *ARQ* використовує сигнал підтвердження приймання і тайм-аут для забезпечення надійного передавання ненадійними каналами зв'язку. Якщо передавач даних до закінчення тайм-ауту не отримує підтвердження, то повторно передає фрейм, поки не буде перевищено задану кількість повторних передач. Рекомендується застосовувати *ARQ* з неперервним запитом та вибіркоким повторенням (continuous *ARQ* with selective repeat). У цій процедурі повторно передається тільки спотворене повідомлення, а потім передавач продовжує передавання з того місця, де було переривання, не виконуючи повторного передавання правильно прийнятих фреймів [1, 7].

Даний адаптивний метод дозволяє підвищити ефективність роботи програмованої радіосистеми, тобто зменшити обчислювальну складність декодування або отримати енергетичний вигаш.

Висновки

У роботі запропоновано використовувати метод декодування турбокодів, який здатний гнучко адаптуватися до умов передавання даних залежно від результатів індикатора якості каналу зв'язку та автоматичного запиту повторного передавання. Розроблений метод дозволяє підвищити ефективність роботи *SDR*-системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Модифікований алгоритм турбо-декодування для турбо-кодів із повторенням / О. Овчаров, С. Зайцев, С. Лівенцев, О. Петрова // Науковий журнал «Зв'язок». – К.: Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, 2011. – № 4. – С. 38-46.
2. Федорчак К.А. Деякі аспекти завадостійкого кодування турбо-кодів-добутків у цифрових системах передавання даних: матер. IV міжнародної наукової конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» / К.А. Федорчак, Ю.Ю. Іванов. – Вінниця: ПП «ТД Едельвейс і К», 31 жовтня – 2 листопада, 2017 р. – С. 232.
3. Огляд ітеративних методів декодування блокових турбо-кодів на SISO та ПНО декодерах [Електронний ресурс]: матер. XLVII науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету за участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області / Ю.Ю. Іванов,

К.А. Федорчак, А.В. Нікуліна, І.Г. Чуйко, С.Г. Кривогубченко. – Вінниця: ВНТУ, 23 березня, 2018. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fksa/all-fksa-2018/paper/view/3943/4598>.

4. Особливості оцінювання параметрів процесу передавання даних із використанням турбо-кодів / Р.Н. Кветний, Ю.Ю. Іванов, С.Г. Кривогубченко, О.В. Стукач // Метрологія та прилади. – К: ВКФ «Фавор ЛТД», 2017. – № 3. – С. 25-32.

5. Berrou C. Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-Codes / C. Berrou, A. Glavieux, P. Thitimajshima // Proceedings of the ICC'93. – Switzerland, Geneva: 1993. – P. 1064-1070.

6. Gracie K. Turbo and Turbo-Like Codes: Principles and Applications in Telecommunications / K. Gracie, M.-H. Hamon // Proceedings of the IEEE. – 2007. – V. 95. – № 5. – P. 1228-1254.

7. Channel Coding in Communication Networks. From Theory to Turbocodes: edited by A. Glavieux / C. Berrou, C. Douillard, M. Jezequel, A. Picart. – Chippenham: ISTE, 2007. – 437 p.

8. Woodard J. Comparative Study of Turbo Decoding Techniques: An Overview / J. Woodard, L. Hanzo // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2000. – V. 49. – № 6. – P. 2208-2233.

9. Іванов Ю.Ю. Особливості апаратно-програмної реалізації турбо-кодів: порівняльний аналіз складності реалізації на цифровому сигнальному процесорі / Ю.Ю. Іванов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – № 3. – С. 94-101.

10. Іванов Ю.Ю. Експериментальне дослідження завадостійкості турбо-кодів: числові оцінки та імітаційне моделювання нового субоптимального алгоритму PL-log-MAP / Ю.Ю. Іванов // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – № 5. – С. 76-84.

Федорчак Катерина Анатоліївна — студентка магістратури, факультет комп'ютерних систем і автоматики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Іванов Юрій Юрійович — канд. техн. наук, старший викладач кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: Yura881990@i.ua.

Fedorchak Katerina A. — student, Faculty of Computer Systems and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Ivanov Yuriy Yu. — Cand. Sc. (Eng), Senior Lecturer, Faculty of Computer Systems and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Yura881990@i.ua.