

УДК 681.3

АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ ДЕКОДЕРА SOVA З “М’ЯКИМ” КВАНТОВАНИМ
3-БІТОВИМ ВИХОДОМ

КУЛИК А.Я., ІВАНОВ Ю.Ю.

Вінницький національний технічний університет

HARDWARE IMPLEMENTATION OF SOVA DECODER WITH “SOFT” QUANTIZED
3-BIT OUTPUT

KULYK A.Y., IVANOV Y.Y.

Vinnitsa National Technical University

Анотація. Розглянуто алгоритм Вітербі та його модифікацію SOVA, яка є одним з методів роботи з сучасним турбо-кодом, перспективним для передавання інформації. Наведено алгоритм роботи декодера Вітербі для “жорсткого” та “м’якого” знаходження рішень. Проведено порівняння складності операцій для алгоритмів Вітербі та SOVA. Показано реалізацію ядра декодера SOVA та розроблено апаратну архітектуру з “м’яким” квантованим 3-бітовим виходом. Також проведено моделювання алгоритму SOVA в каналі з AWGN.

Abstract. Viterbi algorithm and its modification SOVA, which is one of the methods for working with modern turbo-code, a promising for transfer information, is considered. The algorithm of Viterbi decoder for hard and “soft” finding solution is showed. Complexity comparison of operations is carried out for Viterbi algorithm and SOVA. The implementation of the SOVA decoder core is showed and hardware architecture with a “soft” quantized 3-bit output is designed. Also simulation is shown for the SOVA algorithm in the channel with AWGN.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Системи цифрового передавання інформації відіграють важливу роль у сучасному світі, і вимоги до швидкості та надійності переданих даних постійно зростають [1, 2]. У стаціонарних системах зв’язку адитивний шум і міжсимвольна інтерференція є основними факторами, які призводять до появи помилок при передаванні даних каналом зв’язку. Реалізація сучасних завадостійких систем передавання цифрової інформації неможлива без застосування кодерів, виконаних за сучасною технологією, здатних працювати на високих тактових частотах, що дозволяє підвищити ефективність використання апаратної реалізації, енергетичну ефективність, завадостійкість, а також позитивно позначається на економічному ефекті. Кодери і декодери завадостійких кодів є найбільш ресурсомістким компонентом апаратури, особливо із зростанням швидкості передавання інформації. Для підвищення енергетичної ефективності та виправлення помилок практично в усіх сучасних цифрових системах застосовується завадостійке кодування цифрових сигналів. Застосування завадостійкого кодування дозволяє працювати при меншому співвідношенні сигнал/шум [1]. Завадостійкість забезпечує надійність і вірогідність переданої інформації. Найбільш помітним досягненням в теорії завадостійкого кодування за останні роки є турбо-коди [3].

Складність алгоритмів турбо-кодування та явна недостатність програмного забезпечення вільного розповсюдження перешкоджають впровадженню турбо-кодів, хоча в даний час багато систем намагаються використовувати саме їх. Під час роботи з розглянутим кодом виникає проблема його декодування, а, відповідно, і реалізації цієї процедури. Для декодування турбо-кодів можна використовувати декілька методів: SOVA (*soft-output Viterbi algorithm* – алгоритм Вітербі з “м’яким” виходом); MAP (*maximum a posteriori probability* – алгоритм декодування по максимуму апостеріорної ймовірності) та його модифікації для зниження обчислювальної складності (log-MAP, max-log-MAP). Алгоритми декодування можна застосовувати і при використанні демодулятора з м’якими рішеннями на вході, що дозволяє досягти максимально можливого енергетичного виграшу від декодування [3].

Актуальними задачами є реалізація розроблених обчислювальних процедур для підвищення ефективності та завадостійкості декодування при проектуванні сучасних завадостійких систем передавання цифрової інформації [1, 3, 4].

Існує достатня кількість корисних наукових джерел, які надають ідеї для вирішення поданих проблем, корисними будуть праці [1 – 9].

Мета статті – на основі аналізу алгоритму Вітербі та SOVA декодера для завадостійкого турбо-коду, синтезувати апаратну архітектуру з “м’яким” квантованим 3-бітовим виходом для роботи з даним кодом в розподілених комп’ютерних системах різного функціонального призначення, а також виконати моделювання для визначення ймовірності помилки на біт при декодуванні переданої інформації.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для розв’язання задачі використовується узагальнена структура для роботи з інформацією (рис. 1), в якій кодуєчий пристрій (кодер каналу) системи завадостійкого кодування отримує інформаційні символи від джерела і додає до них надлишкові символи таким чином, щоб могла бути виправлена велика частина помилок, що виникають у процесі модуляції сигналів, їх передавання каналом з шумом і демодуляції [3].

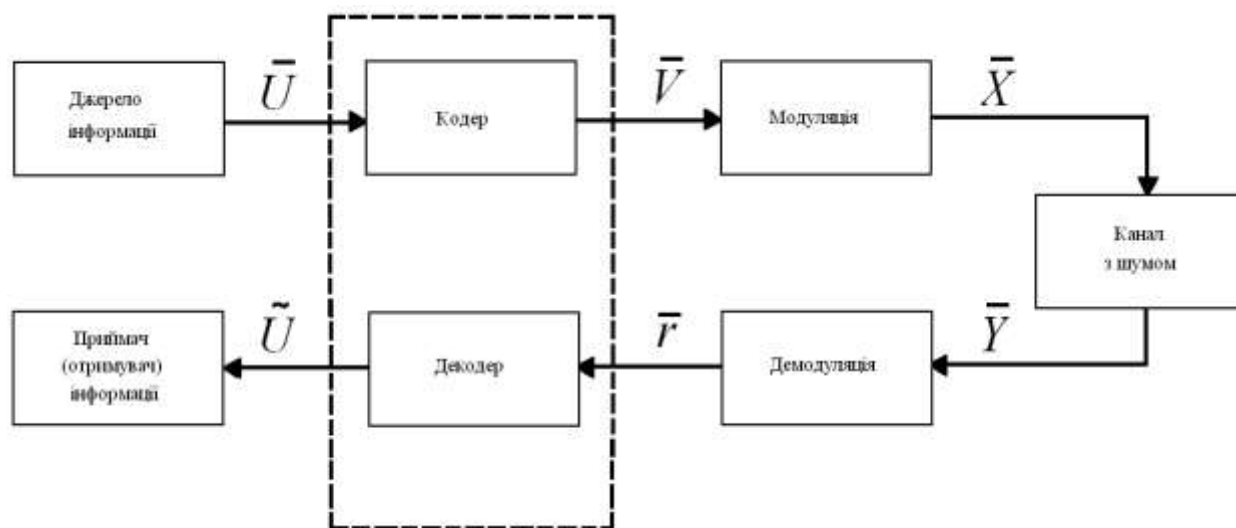


Рисунок 1 – Узагальнена структура для роботи з інформацією: \bar{U} – початкові дані, які надаються пристрою кодування інформації; \bar{V} – дані після процедури кодування; \bar{X} – дані після модуляції, які надходять до каналу із шумом; \bar{Y} – дані на виході каналу з шумом; \bar{r} – дані після демодуляції, які надходять до пристрою декодування інформації; \tilde{U} – інформація з джерела після проходження вузлів системи.

Декодування блокового коду можливе з використанням “жорсткого” (*hard decision decoding* – HDD) або “м’якого” (*soft decision decoding* – SDD) прийняття рішення, а на виході з декодера отримуються “жорсткі” або “м’які” дані. В HDD кожному прийнятому біту в демодуляторі приписується значення 0 або 1, в залежності від того, чи є прийняті дані із завадами більше або менше порогового значення.

Декодер з “м’яким” прийняттям рішення приймає крім бінарної величини 1 або 0 також довірчу величину, яка пов’язана із заданим бітом. Якщо модулятор визначився, то біту присвоюється значення 1, ступінь упевненості в ньому висока. Якщо він менш визначений, то отримає низьку довірчу величину. Декодер з “м’яким” входом і “м’яким” виходом (*soft-input soft-output* – SISO) приймає і випускає дані з “м’яким” рішенням. Концепція декодерів SISO застосована в турбо-кодах. Розглянутий код подає дані, що демодулюються, з “м’яким” рішенням в SISO-декодер. Вихідні дані цього декодера потім подаються в той же самий (чи інший) SISO-декодер. Потім операція повторюється знову. Цей ітераційний процес триває до тих пір, поки не буде прийняте впевнене рішення. Концепція подачі вихідних даних назад на вхід аналогічна турбонадуву двигуна, тому турбо-код дістав саме таку назву. Для ефективності застосування турбо-коду дані кодують двома (або більше) різними кодами. Декодер з “м’яким” входом може випускати дані з “жорстким” рішенням або дані з “м’яким” рішенням. Наприклад, декодуєчий пристрій Вітербі приймає “м’яку” інформацію з демодулятора і випускає дані з “жорстким” рішенням [3].

Алгоритм Вітербі, заснований на роботі з решітчастою діаграмою, є ефективним і найбільш поширеним серед методів декодування згорткових кодів, оскільки він дозволяє отримати максимально правдоподібну оцінку переданого кодового слова. В алгоритмі Вітербі, який визначає кодову послідовність на основі мінімальної відстані до прийнятої послідовності, використовується припущення про статистичну незалежність помилок передавання, тобто реальний канал передавання моделюється каналом без пам'яті. Основним недоліком алгоритму декодування Вітербі є експоненціальний ріст обчислювальної складності при збільшенні числа внутрішніх станів декодера. Стандартні декодери, які реалізують алгоритм Вітербі, не дозволяють досягти необхідних показників надійності, якості, завадостійкості [5, 6]. Алгоритм Вітербі має величезне практичне значення, оскільки завдяки йому згорткові коди стали доступними з точки зору практичної реалізації. Він використовується в основних системах мобільного зв'язку другого і третього покоління, таких як GSM, IS-54/136, IS-95, UMTS і CDMA2000 [1, 5].

Цікавою з точки зору реалізації є модифікація алгоритму Вітербі під назвою SOVA – це категорія м'яких алгоритмів, що базуються на визначенні максимальної правдоподібності, яка дозволяє мінімізувати ймовірність помилки на біт інформації за рахунок прогнозу апостеріорної ймовірності кожного окремого біта. Дана модифікація алгоритму Вітербі [3] дозволяє обчислити надійність інформаційних символів як логарифм відношення правдоподібності (*log-likelihood ratio* – LLR), що можна записати у формулі:

$$LLR(\overline{U}_i) = \log \left(\frac{p(\overline{U}_i = 1 | \overline{r})}{p(\overline{U}_i = 0 | \overline{r})} \right). \quad (1)$$

На стадії формування “м'якого” виходу алгоритму SOVA для i -ї секції визначається найбільш правдоподібне значення інформаційного символу $\overline{U}_i = a$, де $a \in \{0, 1\}$, і відповідна йому максимальна метрика, яка знайдена на прямому шляху за Вітербі, встановлюється рівною $Y_i(\overline{U}_i)$. Метрика найкращого шляху для доповнення $Y_i(\overline{U}_i \oplus 1)$ може бути знайдена за формулою

$$Y_i(\omega_i \oplus 1) = \min_{k_1, k_2} \{Y_f(S_{i-1}^{(k_1)}) + BY_i^{(b_1)}(\overline{U}_i \oplus 1) + Y_b(S_i^{(k_2)})\}, \quad (2)$$

де ω – найбільш правдоподібна послідовність, знайдена за алгоритмом Вітербі; $Y_f(S_{i-1}^{(k_1)})$ – метрика шляху, що “вижив” на прямому русі за алгоритмом Вітербі для $(i-1)$ -ї секції і стану $S^{(k_1)}$; $BY_i^{(b_1)}(\overline{U}_i \oplus 1)$ – метрика ребра для інвертованого інформаційного символу, асоційованого з переходом зі стану $S^{(k_1)}$ в $S^{(k_2)}$; $Y_b(S_i^{(k_2)})$ – метрика шляху, що “вижив” на зворотному русі за алгоритмом Вітербі для i -го моменту та стану $S^{(k_2)}$; $k_1, k_2 \in \{0, 1, 2, \dots, 2^n - 1\}$.

Якщо позначити $Y_i(1) \approx Y_{\max}$ та $Y_i(0)$ назвати максимальною метрикою шляху, асоційованого з доповненням інформаційного символу \overline{U}_i , то можна навести формулу для обчислення м'якого виходу:

$$LLR(\overline{U}_i) = Y_i(1) - Y_i(0). \quad (3)$$

Алгоритм роботи декодера Вітербі можна сформулювати наступним чином [4, 5, 7]:

- встановити необхідну глибину декодування, врахувавши довжину кодового обмеження, тобто кількість бітових зсувів, після яких один інформаційний біт може вплинути на вихідний сигнал кодера. Старт здійснюється зі стану 0 по решітці;
- перейти на наступний кадр решітки, оновивши метрики шляхів. У початковий момент ця операція повторюється для кожного кадру певну кількість разів. Обчислений код кожного шляху заноситься в пам'ять шляхів;
- здійснюється вибір нового ребра і перехід на один кадр решітки вперед;

- на останньому кадрі проводиться порівняння метрик шляхів та видається код відповідний мінімальній метриці;
- обчислюються загальні метрики шляхів;
- для "м'якого" рішення виконується алгоритм Вітербі "назад", і зберігаються метрики всіх станів декодера без збереження шляхів, які "вижили". Увагу треба приділити нормуванню метрик для кожного стану декодера в обох напрямках руху решіткою;
- в якості рішення вибирається кодове слово, яке знаходиться на найменшій евклідовій відстані від прийнятої послідовності "м'яких" рішень;
- видається код, відповідний мінімальній метриці, який за функцією правдоподібності можна перетворити в "жорстке" рішення декодера.

Іноді інформаційна послідовність доповнюється декількома відомими інформаційними символами, тобто нулями, наприклад, в системі GSM (*Global System for Mobile Communications* – глобальний цифровий стандарт для мобільного зв'язку). Так декодер дізнається номер кінцевого стану або підмножину станів, в яких може закінчитися шлях на решітці. Ця інформація використовується при виборі кодової послідовності декодером [1]. Для порівняння алгоритмів SOVA та Вітербі доцільно скласти табл. 1, а також ввести позначення K , яке визначає конструктивну довжину складових кодів [1, 7].

Таблиця 1 – Порівняння складності операцій алгоритмів Вітербі та SOVA

Можлива операція	Алгоритм Вітербі	SOVA
Порівняння	2^{K-1}	$6 \cdot K$
Множення на ± 1		8
Додавання	$2 \cdot 2^{K-1} + 5$	$2 \cdot 2^{K-1} + 8$
Вибір максимуму		$2^{K-1} + 3 \cdot K$

Нехай передана кодова послідовність $\bar{U} = (00000\dots)$, а прийнята $\bar{r} = (10000\dots)$, тобто в першому кадрі кодового слова виникла помилка, тоді приклад процедури декодування ілюструє рис. 2.

Застосування SOVA ускладнює схему декодера Вітербі на 70-80%, але дозволяє значно покращити ефективність роботи кодера [7]. Як правило, декодування за алгоритмом SOVA використовується з "жорстким" або "м'яким" квантованим 3-бітовим виходом.

У табл. 2 [8] наведена схема формування вхідних даних з 3-бітовим "м'яким" рішенням. Декодер дозволяє легко перейти до "м'яких" рішень, що забезпечує енергетичний вигравш порядку 3–7 дБ без розширення смуги частот [5–7].

Таблиця 2 – Формат вхідних даних для 3-х бітового "м'якого" рішення

Зони квантування	Висновки
000	Сильний (ідеальний) логічний "0"
001	↓
010	↓
011	Слабкий логічний "0"
100	Слабка логічна "1"
101	↑
110	↑
111	Сильна (ідеальна) логічна "1"

Рисунок 3 відображає ідею побудови таблиці, враховуючи графік функції правдоподібності.

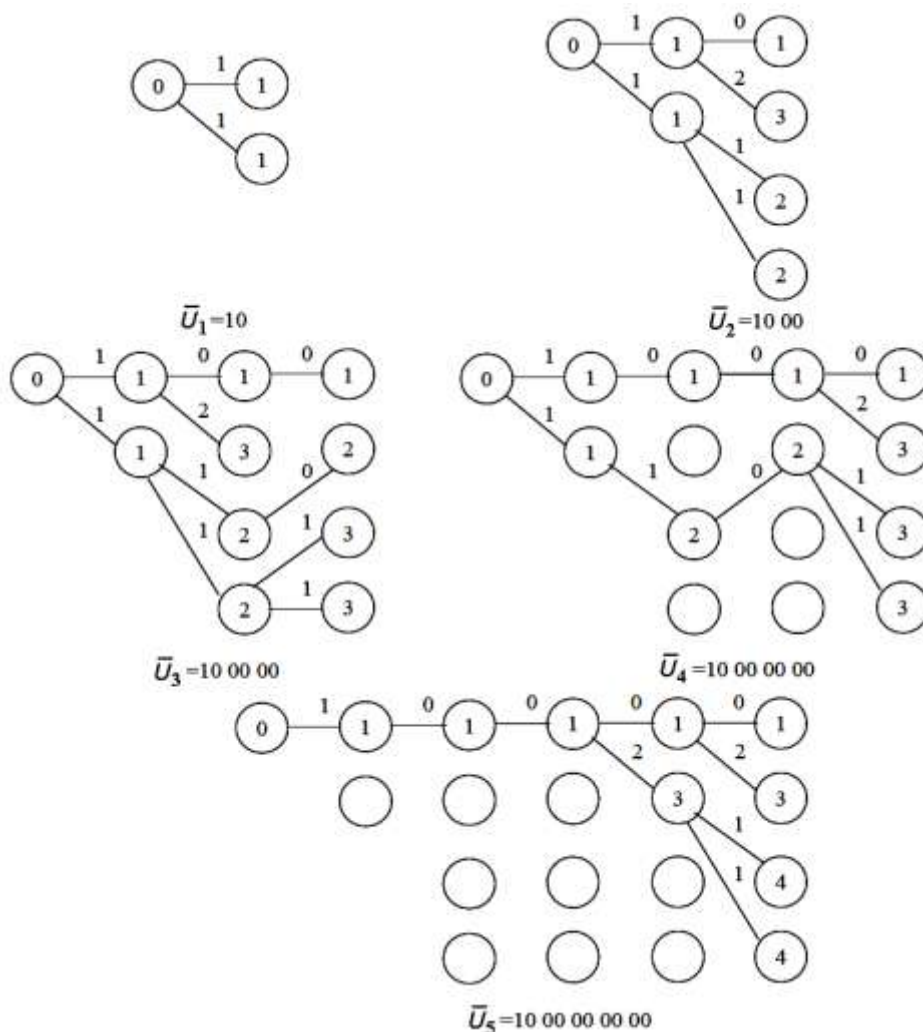


Рисунок 2 – Декодування за "жорстким" алгоритмом Вітербі прийнятої послідовності

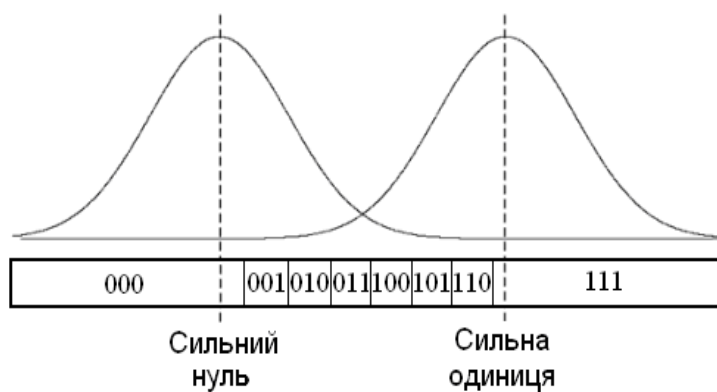


Рисунок 3 – Зони квантування для 3-бітового "м'якого" рішення

Графічний символ для реалізації ядра декодера [8, 9] SOVA з 7 портами входу та 5 портами виходу представлений на рис. 4.

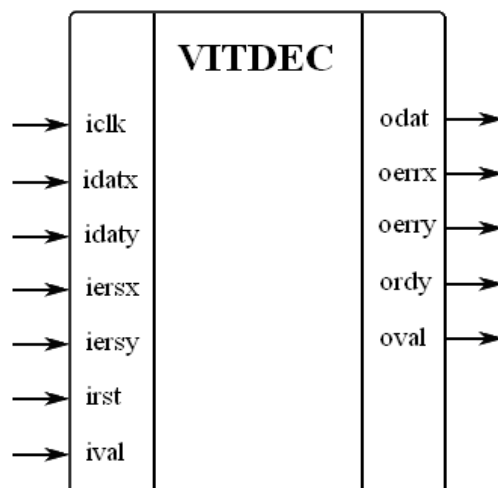


Рисунок 4 – Графічне позначення декодера SOVA

Функції, які виконують порти декодера, наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Опис портів декодера SOVA

Порт	Тип	Опис
iclk	вхід	системний тактовий сигнал
idatx	вхід	вхідні (канальні) дані
idaty	вхід	вхідні (канальні) дані
iersx	вхід	стирання для idatx
iersy	вхід	стирання для idaty
irst	вхід	асинхронний скид
ival	вхід	готовність вхідних даних
odat	вихід	вихідні (декодовані) дані
oerrx	вихід	виправлена помилка в idatx
oerry	вихід	виправлена помилка в idaty
ordy	вихід	готовність приймати вхідні дані
oval	вихід	готовність вихідних даних

Апаратну архітектуру для декодера SOVA [1, 4, 5, 9] з “м’яким” квантованим 3-бітовим виходом можна представити схемою, наведеною на рис. 5.

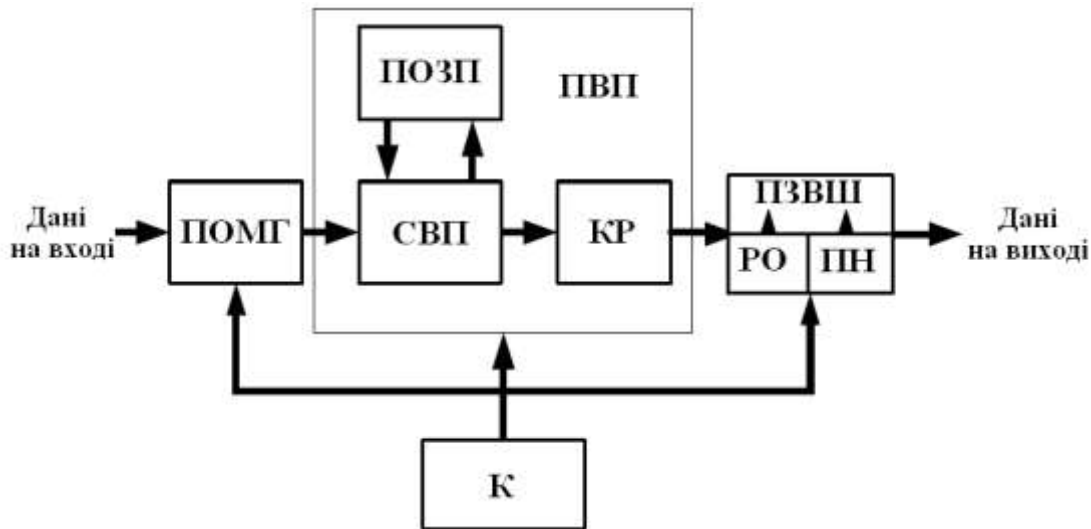


Рисунок 5 – Архітектура запропонованого декодера SOVA: ПОМГ – пристрій обчислення метрик гілок; ПВП – пристрій вибірки / порівняння; ПОЗП – порт оперативної запам’ятовувальної пам’яті (RAM); КР – конвертер “жорстких” рішень у ”м’які”; СВП – серія операцій вибірки / порівняння; ПЗВШ – пам’ять для збереження “виживших” шляхів на решітці коду; РО – метод збереження на основі регістрів обміну; ПН – метод збереження на основі повернення назад по решітці коду; К – контролер

Результат роботи алгоритму SOVA (рис. 6) в каналі з AWGN (*additive white Gaussian noise* – адитивний білий гаусівський шум) показує значення BER (*bit error rate* – ймовірність помилки на біт), що прямує до мінімуму, який визначений теоретично можливою межею для даного коду, коли існує безпомилкове передавання та декодування інформації. Для турбо-кодів ці значення максимально наближені до даної межі [4].

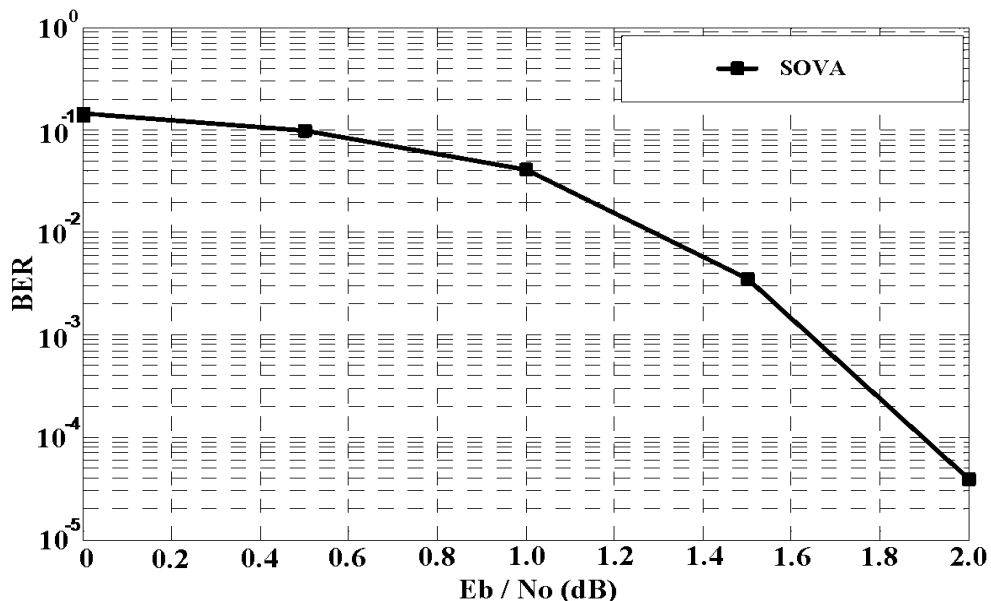


Рисунок 6 – Моделювання енергетичної ефективності та характеристик BER для SOVA

ВИСНОВКИ

На закінчення можна сформулювати наступні твердження. Отже, розглянуто алгоритм Вітербі та його модифікацію SOVA, які ведуть до розуміння реалізації, складності та принципів декодування турбокодів, згорткових кодів та використовуються в цифрових стандартах мобільного зв’язку, таких як GSM, IS-54/136, IS-95, UMTS і CDMA2000. Для надійної роботи алгоритм декодування SOVA не повинен бути обмеженим поданням на декодери “жорсткої” схеми рішень. Для кращого використання інформації, яка отримана з кожного декодера, застосовують “м’яку” схему декодування, що ускладнює схему декодера Вітербі на 70-80%, але дозволяє значно покращити ефективність роботи кодера.

Запропонована апаратна архітектура декодера SOVA з квантованим 3-бітовим виходом для “м’яких” рішень. Декодер дозволяє легко перейти до “м’яких” рішень, що забезпечує енергетичний вииграш без розширення смуги частот. Отже, підвищено ефективність та завадостійкість декодування при проектуванні сучасних завадостійких систем передавання цифрової інформації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hanzo L., Single- and Multi-Carrier CDMA. Multi-User Detection, Space-Time Spreading, Synchronisation and Standards / L. Hanzo, L-L.Yang , E-L. Kuan, K. Yen // New York: John Wiley & Sons Inc, 2003. – 1077 p. – ISBN 0-470-86309-9.
2. Кулик А.Я. Особливості передавання інформації у інформаційно-вимірювальних системах: матеріал І міжнар. наук. конф. “Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах” / А.Я. Кулик, С.Г. Кривогубченко, Д.С. Кривогубченко Ю.Ю. Іванов.// (ВКДТС – 2011). Збірник тез доповідей – Вінниця: ВНТУ, (18-20 жовтня, 2011 р.) – С. 188.
3. Кулик А.Я. Турбо-код: властивості та застосування для завадостійкого кодування / А.Я. Кулик, С.Г. Кривогубченко, Ю.Ю. Іванов // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2011. – № 2(22). – С. 25-33.
4. Morelos-Zaragoza R. The Art of Error Correcting Coding, 2-nd Edition / R. Morelos-Zaragoza. – Chippenham: John Wiley & Sons//, Ltd, 2006. – 278 p. – ISBN 0-470-01558-6.
5. Витерби А.Д. Принципы цифровой связи и кодирования: пер. с англ.; под ред. К.Ш. Зигангирова / А.Д. Витерби, Дж.К. Омура. – М.: Радио и связь, 1982. – 536 с.
6. Viterbi A. J. Error Bounds for Convolutional Codes and an Asymptotically Optimum Decoding Algorithm / A. J. Viterbi // IEEE Transactions on Information Theory. – 1967. – V. IT-13. – P. 260-269.
7. Neubauer A. Coding Theory: Algorithms, Architectures and Applications / A. Neubauer, J. Freudenberger, V. Kuhn // Chippenham: John Wiley & Sons, Ltd, 2007. – 362 p. – ISBN 0-470-02861-0.
8. IPRIUM [Электронный ресурс] Витерби. / IP ядро декодера Краткое описание. – Режим доступа: http://www.iprium.ru/bins/pdf/iprium_ug_viterbi_decoder.pdf.
9. Moon T.K. Error Correction Coding: Mathematical Methods and Algorithms / T.K. Moon. – John Wiley & Sons // Ltd, 2005. – 750 p. – ISBN 0-471-73914-6.