

ВЫБОР ХАРАКТЕРИСТИК ВНЕШНИХ СВЕРТОЧНЫХ КОДОВ ДЛЯ РЕШЕТЧАТЫХ СИГНАЛЬНО-КODOVЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ВНУТРЕННИМИ СИГНАЛАМИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ

ВИБІР ХАРАКТЕРИСТИК ЗОВНІШНІХ ЗГОРТКОВИХ КОДІВ ДЛЯ РЕШІТЧАСТИХ СИГНАЛЬНО-КОДОВИХ КОНСТРУКЦІЙ З ВНУТРІШНІМИ СИГНАЛАМИ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ ФАЗОВОЇ МОДУЛЯЦІЇ

THE CHOICE CHARACTERISTICS OF OUTER CONVOLUTIONAL CODES FOR TRELLIS SIGNAL-TO-CODE STRUCTURES WITH INTERNAL DIFFERENTIAL PHASE MODULATION SIGNALS

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы выбора характеристик внешних сверточных кодов для решетчатых сигнально-кодовых конструкций с внутренними сигналами дифференциальной фазовой модуляции. Показана необходимость учета памяти дифференциального кодера при подсчете результирующего количества состояний кодера сигнально-кодовой конструкции.

Анотація. У статті розглядаються питання вибору характеристик зовнішніх згорткових кодів для решітчастих сигнально-кодових конструкцій з внутрішніми сигналами диференціальної фазової модуляції. Показана необхідність обліку пам'яті диференціального кодера при підрахунку результируючої кількості станів кодера сигнально-кодової конструкції.

Summary. The questions of a characteristics choice of external convolutional codes for trellis signal-to-code structures with internal differential phase modulation signals are considered. Necessity of the differential coder memory account by calculation of result signal-to-code structure states quantities is shown.

Современные условия передачи цифровой информации по реальным каналам связи выдвигают жесткие требования к характеристикам помехоустойчивости и эффективности методов передачи (модуляции и кодирования), используемых в этих каналах. Обычно здесь используют сигнально-кодовые конструкции (СКК), которые позволяют успешно сочетать противоречивые свойства помехоустойчивых кодов и высокоскоростных ансамблей многопозиционных сигналов [1]. В последние годы центр внимания разработчиков новых методов переместился в область цифровой беспроводной связи (системы мобильной связи, беспроводный доступ к Интернет и т.п.). Выяснилось, что в радиоканалах с замираниями предпочтительней использовать дифференциальную фазовую модуляцию (ДФМ), которая позволяет в процессе демодуляции эффективно подавлять фазовые сдвиги, вносимые замираниями. По этой причине методы ДФМ «заняли место» внутренних сигналов в стандартных структурах СКК. К ним «присоединились» методы частотной модуляции с непрерывной фазой (ЧМ-НФ) [2,3], обеспечивающие конструктивное решение задач компактности спектра, актуальных в радиоканалах. Компактность спектра ЧМ-НФ сигналов достигается за счет применения дифференциального кодирования информационных символов, подаваемых на формирователь сглаженных функций изменения фазы сигнала [1, разд. 2.11]. В разработке СКК для каналов с замираниями принимали активное участие специалисты по помехоустойчивому кодированию. Можно указать обширный список работ с результатами разработки внешних сверточных кодов (СК) для СКК с внутренними сигналами ДФМ: от фундаментальной обобщающей монографии шведских авторов [2] до статей с конкретными результатами поиска внешних СК [3-5]. Недостатком цитируемых работ является *отсутствие системного подхода* к синтезу таких СКК, когда кодер и модулятор рассматриваются раздельно (без взаимной увязки). В тоже время, еще в монографии [1, разд. 7.4] один из авторов данной статьи указывал, что переборный поиск внешнего СК для СКК с дифференциальной модуляцией должен выполняться в рамках *единой структуры кодека* внешнего СК и модулятора ЧМ-НФ, как конечных автоматов. Однако авторы работ [3...5] не учитывали то, что любой модулятор ДФМ, как автомат с памятью, в сочетании с внешним СК изменяет структуру формирователя решетки всей решетчатой СКК (т.е. увеличивает длину кодирующего регистра СКК). Это приводит к изменению дистанционных свойств нового кода и *добавляет новые состояния* к диаграмме состояний внешнего СК и, соответственно, усложняет решетчатую диаграмму и увеличивает сложность реализации декодера Витерби, используемого для

декодирования СКК по такой усложненной решетке. Тем самым ошибки авторов этих работ *могут вводить в заблуждение* будущих разработчиков кодеров таких СКК. **Цель настоящей статьи** – цельное и системное изложение структуры СКК с внутренними сигналами дифференциальной ФМ и разработка на этой основе рекомендаций по выбору характеристик внешних СК.

1. Структура СКК с дифференциальной ФМ. Особенности структуры СКК с внутренними сигналами дифференциальной ФМ рассмотрим на примере передачи сигналов двоичной ФМ (основания алфавитов двоичных сигналов и кода $m = 2$) по каналу с фазовой помехой. Структуры дискретных моделей СК и кодера дифференциальной ФМ-2 показаны на рис. 1. Двоично/восьмеричное представление порождающих многочленов сверточного кодера: $G - 1 = (111)$, $G - 2 = (101)$ и $G - 1 = (7)$, $G - 2 = (5)$. Длина кодирующего регистра кодера (ДКР) K определяется количеством элементов задержки D в структуре регистра. Каждый СК есть автомат с конечным числом состояний. В теории автоматов состоянием принято считать набор значений переменных на входах элементов задержки. Величина ДКР определяет количество состояний кодера $S = m^K$. Поведение каждого СК при подаче на вход кодируемых информационных символов описывается диаграммой состояний и ее разверткой во времени (решетчатой диаграммой, решеткой), каждая из которых содержит S состояний. Величину S принято считать мерилем *сложности реализации* алгоритма Витерби (АВ) [1]. С другой стороны, известно, что корректирующая способность СК увеличивается с ростом ДКР (иными словами, с ростом «длины кода»). По этой причине при реализации СК величину ДКР выбирают из *условий компромисса* между требуемым минимальным расстоянием (свободным расстоянием СК d_f) и сложностью реализации АВ. Параметры СК на рис. 1: $m = 2$, $K = 3$, $S = m^K = 8$, $d_f = 3$, скорость кода $R = 1/2$. С выходов сверточного кодера кодовые последовательности $v^{(1)}$ и $v^{(2)}$ через параллельно-последовательный преобразователь (коммутатор K) подаются на вход дифференциального кодера с передаточной функцией $K_{\text{дк}}(D) = \frac{1}{1-D}$. Свойство

устойчивости к действию помех позволяет именовать такие СКК *робастными сигнально-кодowymi конструкциями* (robust–устойчивый, в данном случае к фазовым помехам). При последовательном включении сверточный кодер и дифференциальный кодер образуют *единый конечный автомат* (сверточный кодер СКК, см. рис. 1), который содержит включенные последовательно элементы задержки помехоустойчивого и дифференциального кодеров. Выход этого кодера подан на вход модулятора ФМ сигналов. Видно, что подключение дифференциального кодера *удлиняет кодирующий регистр* исходного кодера внешнего СК, причем, в векторе состояний кодера СКК $\mathbf{S} = \{s_{c(1)}, s_{c(2)}, \dots, s_{c(K)}, \dots, s_{\phi}\}$ помимо кодовых состояний $s_{c(i)}$ появляется *новое состояние* s_{ϕ} , которое уместно называть *фазовым состоянием*, поскольку именно символ этого состояния, будучи поданным на вход модулятора ФМ сигналов, определяет текущую фазу передаваемого сигнала. Таким образом, длина кодирующего регистра кодера СКК *возрастает* до величины

$$\text{ДКР}_{(\text{СКК})} = K + 1. \quad (1)$$

Количество вариантов состояний кодера СКК с таким вектором \mathbf{S} определяется выражением

$$S = m^{(K+1)}. \quad (2)$$

Роль увеличения ДКР может быть установлена на основе сопоставления величины энергетического выигрыша при применении СК (ЭВК): «коротких» СК с ДКР = K и «удлиненных» СК с ДКР = $(K + 1)$ и величины усложнения алгоритма декодирования.

По данным табл. Б.2.3 монографии [1] для СК со скоростью $R = 1/2$ средний прирост ЭВК за счет увеличения ДКР на единицу составляет 0,75 дБ. В тоже время, при реализации декодеров Витерби площадь кристалла интегральной микросхемы (чипа) пропорциональна количеству состояний кодовой решетки S . Т.е., увеличение «длины» СК на единицу приносит, с одной стороны, *выигрыш* в ЭВК, но, с другой стороны, приводит к *повышению сложности* реализации и, соответственно, *стоимости* декодеров СК. По этой причине при выборе СК для применения в реальных системах ограничиваются использованием достаточно коротких кодов.

Для подтверждения изложенных выше положений был предпринят переборный поиск внешних двоичных СК для робастных СКК. На базе метода «тест-пакета» [1, разд. 6.2], разработаны методика и компьютерная программа исчерпывающего переборного поиска СК по критерию максимума свободного расстояния. Результаты поиска приведены в табл. 1. Все СКК перенумерованы. Новые робастные СКК отмечены нечетными номерами.

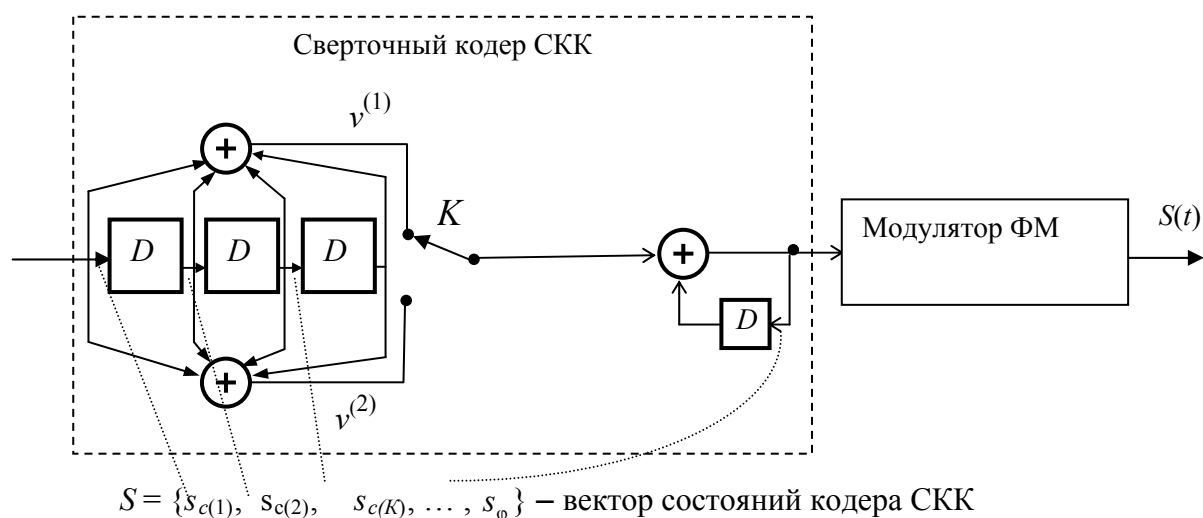


Рисунок 1 – Структура СКК с единым сверточным кодером и модулятором ФМ

Для сравнения в этой же таблице даны сведения об СКК, построенных «традиционными методами» с использованием внешних стандартных СК (четные номера), но *не обладающих свойством робастности* к фазовым помехам.

Как видим, полезное свойство устойчивости СКК к фазовым помехам «окупается» удлинением кодирующего регистра и, соответственно, повышением сложности S кодовой решетки. В порядке «компенсации» этого эффекта необходимо отметить, что такое «удлинение» кода СКК приводит к росту ЭВК (для достаточно длинных кодов ($K \geq 6$)) в среднем на величину порядка 1 дБ.

Таблица 1–Результаты поиска робастных СКК

Номер СКК	Свойства СКК	ДКР K	Порождающие многочлены, $\{G - 1/G - 2\}$	Свободное расстояние, d_f	ЭВК, дБ	Сложность решетки СКК, $S = 2^{(K+1)}$
1	робастн.	3	$\{(40)/(30)\}$	7	5,5	16
2	---	3	$\{(23)/(35)\}$	7	5,5	16
3	робастн.	6	$\{(42)/(44)\}$	12	7,8	128
4	---	6	$\{(247)/(371)\}$	11	6,99	128
5	робастн.	9	$\{(132)/(422)\}$	15	8,7	512

2. Внешние сверточные коды для СКК с сигналами ЧМ-НФ. В продолжение иллюстрации изложенных выше положений о свойствах СКК с внутренними сигналами дифференциальной ФМ приведем структуру конструкции, состоящей из внешнего СК и модулятора с «памятью» сигналов частотной модуляции с непрерывной фазой [1] (рис. 2). Результаты переборного поиска внешних СК даны в табл. 2.

Из структуры СКК на рис. 2 видно, что к элементам задержки внешнего кодера со скоростью 2/3 добавляется элемент задержки дифференциального модулятора, что и обеспечивает непрерывность изменения фазы ЧМ-НФ сигнала. Это удлинение кодирующего регистра учтено при подсчете числа состояний кодовой решетки S .

Использование сигналов дифференциальной ФМ в качестве внутренних сигналов сигнально-кодовых конструкций обеспечивает устойчивость таких СКК к фазовым помехам.

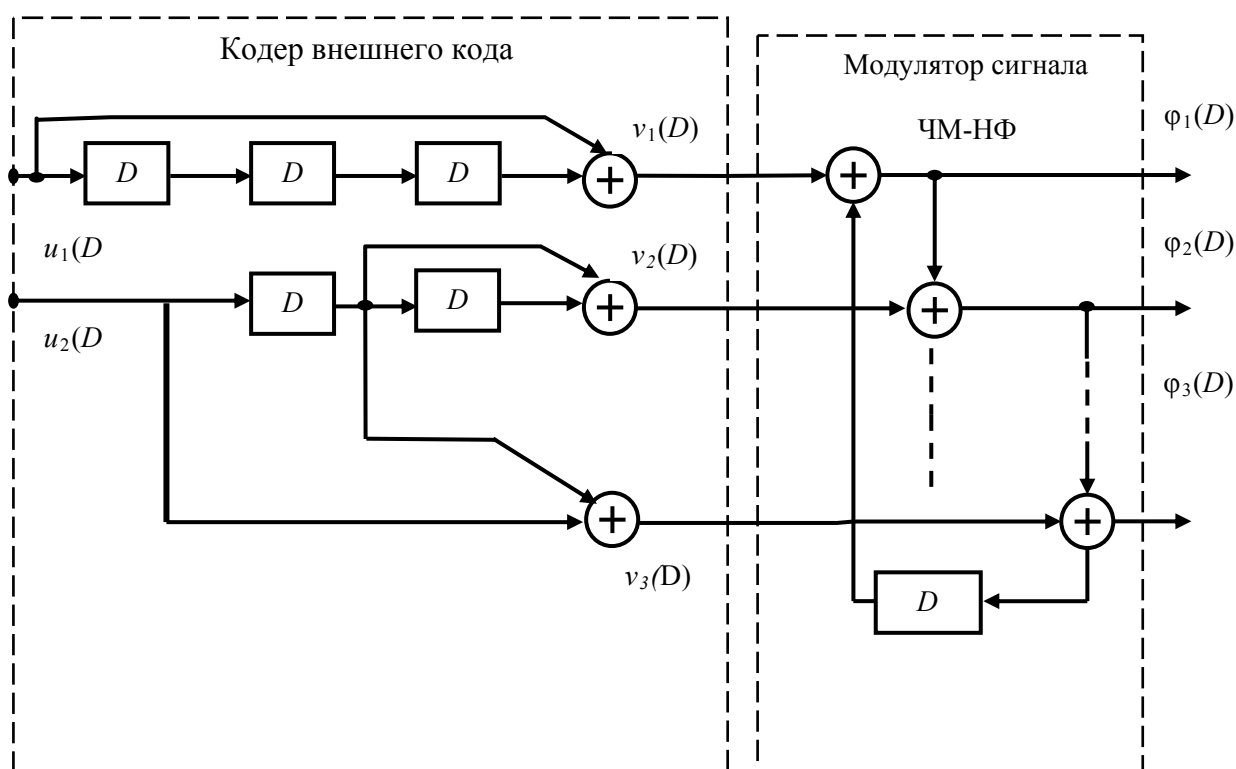


Рисунок 2 – Структура кодера-модулятора СКК-ЧМНФ

Таблица 2 – Характеристики СКК с сигналами ЧМ-НФ

№ СКК	S	Порожд. многочлены	d_f	АЭВК, дБ
1	4	(4,1)	4	3,98
2	8	(12,3)	6	4,77
4	16	(36,11)	6	5,44
5	32	(65,35)	8	6,02

В статье показано, что последовательное включение регистра внешнего сверточного кодера и дифференциального кодера СКК образует эквивалентный кодер сигнально-кодовой конструкции с увеличенной длиной кодирующего регистра. Это приводит к соответствующему росту числа состояний решетчатой диаграммы и усложнению реализации алгоритма Витерби. Однако, одновременно с этим возрастает также и энергетический выигрыш от применения СКК. Отмеченные последствия сочетания кодеров внешних СК и дифференциальных кодеров на внутренней ступени СКК необходимо учитывать при выборе внешних СК для робастных к фазовым помехам СКК.

Изложенные выше положения подтверждены результатами поиска внешних СК для СКК с внутренними сигналами дифференциальной ФМ и с сигналами частотной модуляции с непрерывной фазой [1]. Робастные СКК из табл.1 и 2 рекомендуются к применению в каналах с фазовыми помехами.

Литература

1. Сигнально-кодовые конструкции в телекоммуникационных системах / Банкет В. Л. – Одесса: Феникс, 2009. – 180 с.
2. Digital Phase Modulation / Anderson J. B., Aulin T., Sundberg C. E. // NJ Plenum Press, 1986. – 520 p.
3. Convolutional Coding Combined with Continuous Phase Modulation / S. V. Pizzi, S. G. Vilson // IEEE Transactions on Communications – Vol. COM-33 – No.1, January 1985. – P. 20-29.
4. Coded Continuous Phase Modulation Using Convolutional Codes / B.E. Rimoldi, Q. Li // IEEE Transactions on Communications – Vol. Com-43, November 1995. – P. 2714-2720.
5. Coded Differential Space-Time Modulation for Flat Fading Channels [Электронный Ресурс] / Lampe L., Schroder R., Fischer R. – Режим доступа – <http://www.LNT.de/Lampe> .