

УДК 621.396.41

А.О. Гребенкин, Н.С. Легостаев

Эффективность применения помехоустойчивого кодирования при цифровом дифференцировании сигналов

Обоснована эффективность применения помехоустойчивого кодирования в методике цифрового дифференцирования сигналов, обусловленная необходимостью повышения достоверности передачи информации по зашумленным каналам связи. Методика цифрового дифференцирования сигналов основана на интерполяции дискретно заданного сигнала кубическим сплайном.

Ключевые слова: помехоустойчивое кодирование, цифровое устройство, дифференцирующее звено, производная, кубический сплайн, скользящее усреднение.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-167-171

В системах с обратной связью постоянно происходит обмен информацией между устройством управления (УУ) и объектом управления (ОУ), а обмен информацией осуществляется по линиям передачи данных. Как правило, линии передачи данных подвержены внешнему воздействию, что приводит к искажению полезной информации и соответственно к снижению достоверности ее передачи. Таким образом, УУ получает от ОУ данные о текущем состоянии с ошибкой.

В то же время для многих практических применений, в том числе в устройствах цифрового дифференцирования сигналов (ЦДС), наличие большого числа ошибок в получаемых, а затем обрабатываемых дискретных данных приводит к значительному увеличению погрешности дифференцирования [1, 2]. Это обусловлено тем, что дифференциальная составляющая, пропорциональная скорости изменения регулируемой величины, всегда имеет большую погрешность, чем погрешность измерения выходной величины ОУ.

В результате возникает проблема обеспечения достоверной передачи цифровой информации по каналам связи с шумами, что приводит к необходимости повышения помехоустойчивости линий, по-

скольку малое изменение сигнала может внести значительные искажения в передаваемую информацию и в конечном счете привести к её утрате.

Для повышения достоверности передачи цифровой информации по зашумленным каналам связи используется помехоустойчивое кодирование, принцип которого заключается в добавлении избыточных данных к передаваемому сигналу (информации) с целью последующего исправления (или обнаружения) возникающих при передаче ошибок [3, 4].

Идеальный помехоустойчивый код позволяет добиться сколь угодно малой вероятности ошибочного декодирования сигнала при любой скорости передачи информации в пределах пропускной способности канала связи.

Помимо применения помехоустойчивого кодирования, требуется применение конструктивных мер для защиты канала связи от внешних воздействий (например, разнесение силовых и сигнальных линий, их экранирование и корректное использование заземления) [5].

Структурная схема аппаратной части системы ЦДС (рис. 1) содержит блоки помехоустойчивого кодирования и декодирования, а также устройство, осуществляющее выполнение операции ЦДС.



Рис. 1. Структурная схема системы ЦДС

Входной непрерывный сигнал поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП), который обеспечивает дискретизацию аналогового сигнала по времени и его квантование по уровню. К сигналу, полученному на выходе АЦП, искусственно добавляются избыточные (проверочные) данные

кодером (К), необходимые для определения синдрома ошибки декодером (ДК) с ее последующим исправлением.

В результате получается помехоустойчивый код, который передается по каналу связи. Восстановленный цифровой сигнал поступает на вход устройства

ЦДС, выполняющего операцию дифференцирования сигнала.

На сегодняшний день известно много кодов и методов их декодирования, применяющихся в блоках обработки и передачи информации и различающихся энергетическим выигрышем, сложностью реализации, вносимой избыточностью и рядом других параметров.

В качестве помехоустойчивого кода на передающей стороне используется код Рида–Соломона, который способен исправлять любое количество ошибок, если на N ошибок приходится $2N$ проверочных символов. То есть код Рида–Соломона является легко масштабируемым и, кроме того, наиболее пригодным для программной реализации, чем и обусловлено его использование в данном случае.

Следует отметить, что использование достаточно сложных помехоустойчивых кодов экспоненциально увеличивает сложность процесса декодирования информации, что неизбежно приводит к снижению быстродействия декодирующих устройств. Для

того чтобы избежать этого, необходимо упрощение алгоритмов кодирования, что, однако, приводит к ухудшению характеристик получаемых помехоустойчивых кодов. Компромиссным решением, обеспечивающим достаточную эффективность в данном случае, является использование шестнадцатеричного кода Рида–Соломона, длина кодового слова которого равна 15, количество проверочных символов равно 4, а соответственно количество исправляемых ошибок в каждом кодовом слове равно 2.

Следует также отметить, что в системах, где имеет место вероятность полной потери передаваемого пакета, необходимо применение таких мер, как повторная передача пакета в случае его утраты или использование перемежителя, равномерно распределяющего блок ошибок по нескольким пакетам. Однако для этого необходимо увеличивать время передачи данных, что приводит к получению значения производной со значительной временной задержкой.

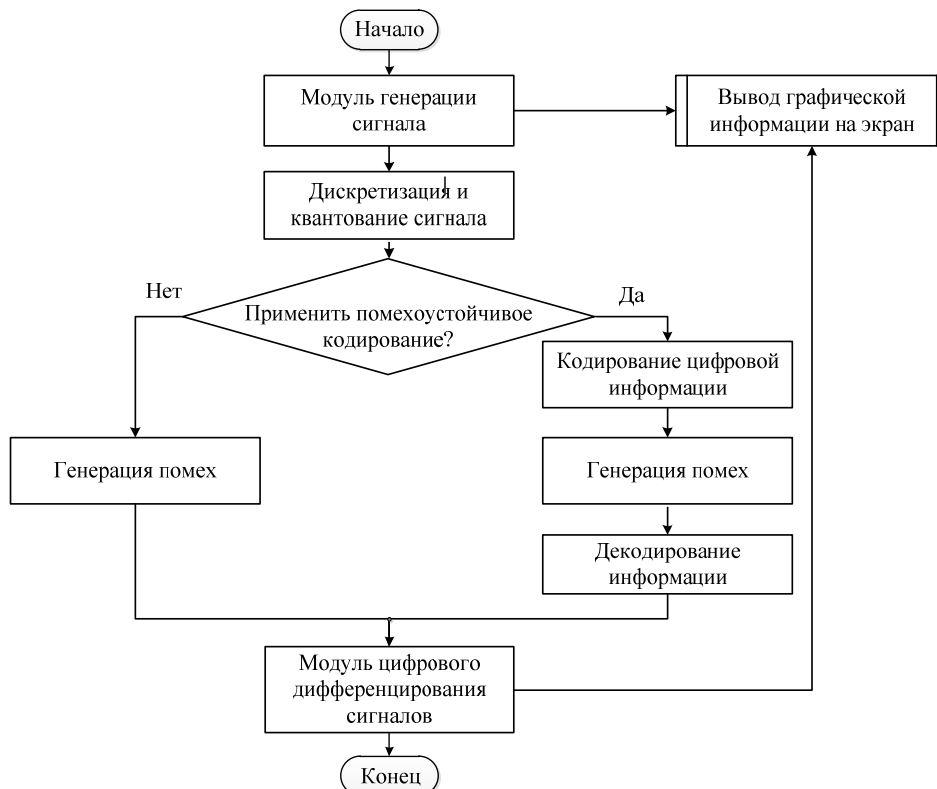


Рис. 2. Структурная схема программного обеспечения

Операция цифрового дифференцирования сигналов осуществляется при помощи методики, основанной на интерполяции дискретного сигнала кубическим сплайном с применением комплекса мер по снижению отклонений и повышению устойчивости вычисляемых оценок (использование оптимального количества промежуточных точек сплайна, применение скользящего усреднения, переопределение далеко отстоящих интерполируемых значений с учетом медианы выборки дискретных данных).

Для оценки эффективности применения помехоустойчивого кодирования при цифровом дифференцировании разработано программное обеспечение, соответствующее предложенной структуре (рис. 2).

Структуризация программного продукта повышает удобство разработки, написания и отладки полученного кода. В структурную схему включен ряд вспомогательных модулей, необходимых для построения компьютерной модели и исследования влияния применения помехоустойчивого кодирования на величину отклонения (1):

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta S_{t_i} - \Delta S_{ideal_i})^2}, \quad (1)$$

где ΔS_{t_i} – текущее значение производной; ΔS_{ideal_i} – идеальное значение производной в текущий момент времени, вычисленное согласно математическим формулам дифференцирования.

Модуль генерации сигнала способен создавать сигналы следующих видов:

1) Сигнал произвольной формы (рис. 3, а), получающийся генерацией произвольных значений с определенной периодичностью, значительно превышающей шаг дискретизации h .

2) Сигналы заданной формы: синусоида (рис. 3, б) и степенной многочлен (рис. 3, в), на основании которых математически определяется значение произ-

водной, необходимое для вычисления величины отклонения.

Модуль дискретизации и квантования сигнала является программной реализацией аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Для того чтобы учесть шаг квантования по уровню, формируется матрица допустимых значений по амплитуде с шагом p , из которых выбирается ближайшее к текущему значению генерируемого сигнала.

Модуль генерации помех произвольно создает некоторые ошибки, величина которых задается регулятором уровня помех e , и добавляет их к имеющимся значениям сигнала.

Для большей наглядности уровень помех определяется для сигнала каждого вида в отдельности и не превышает двух амплитуд исходного сигнала.

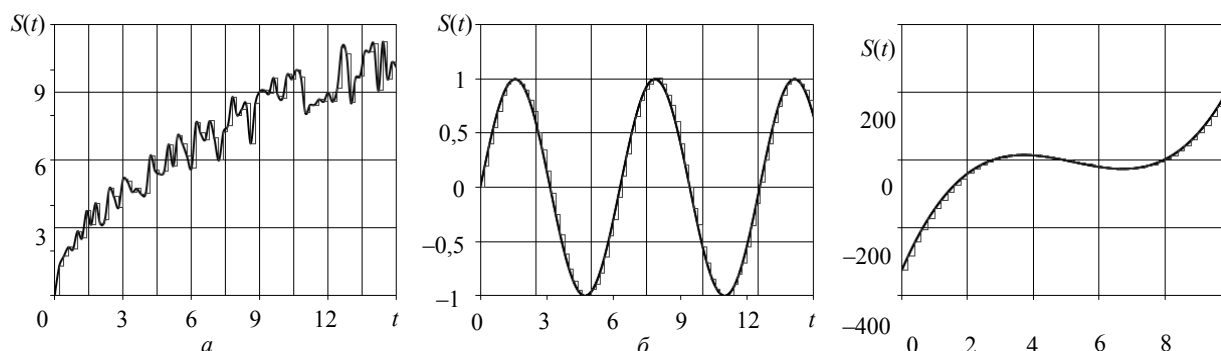


Рис. 3. Виды исследуемых сигналов: а – сигнал произвольной формы $S(t)=Rand$; б – синусоида $S(t)=\sin(t)$; в – степенной многочлен вида $S(t)=3 \cdot (t-5)^3 - 2 \cdot (t-5)^2 - 20 \cdot (t-5)$

Для статистической обработки результатов компьютерного моделирования произведено 10–20 измерений в зависимости от формы исследуемого сигнала, на основании которых вычислено среднее арифметическое значение полученных отклонений, при этом математическое ожидание определяется выражением (2):

$$M \{ \Delta S_t \} = \overline{\Delta S_t}, \quad (2)$$

а дисперсия – выражением (3):

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta S_{t_i} - \overline{\Delta S_t})^2}, \quad (3)$$

где n – количество измерений; $\overline{\Delta S_t}$ – среднее арифметическое значение отклонений, вычисленных согласно выражению (1); ΔS_{t_i} – значение отклонения при текущем измерении.

Использование помехоустойчивого кодирования при вычислении производной первого порядка с помощью методики цифрового дифференцирования сигналов, основанной на интерполяции дискретных данных кубическим сплайном, позволяет снизить величину отклонения с $\Delta=0,17$ (рис. 4, а) до значения $\Delta=0,11$ (рис. 4, б) при максимальном уровне помех.

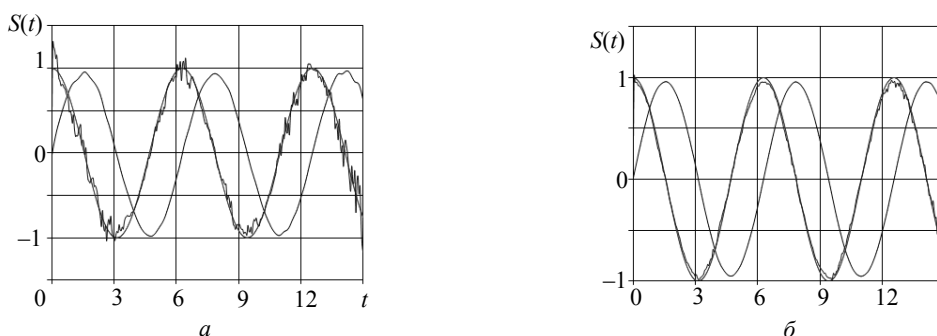


Рис. 4. Результаты моделирования при вычислении производной первого порядка синусоиды

При вычислении производной второго порядка величина отклонения уменьшается с $\Delta=0,44$ (рис. 5, а) до $\Delta=0,29$ (рис. 5, б).

Применение помехоустойчивого кодирования показывает аналогичную эффективность и при вычислении производных функций других видов.

Так, несмотря на невозможность вычислить величину отклонения при вычислении производной сигнала произвольной формы, об эффективности применения помехоустойчивого кодирования можно судить по схожести формы восстановленного сигнала до выполнения операции цифрового дифференцирования сигналов (рис. 6, а) с исходным сигналом (рис. 6, б) при максимальном уровне помех.

При этом среднеквадратичное отклонение $\Delta S(t)$ восстановленного сигнала от исходного сигнала оставляет 0,462 при максимальном уровне помех.

Следует отметить, что применение помехоустойчивого кодирования оказывается предпочтительнее различных способов фильтрации (например, скользящего усреднения), поскольку не вносится искажение информации (особенно в случае быстроизменяющихся сигналов, где усреднение может привести к ее утрате), а происходит ее восстановление с помощью проверочных данных, добавленных к передаваемой цифровой информации.

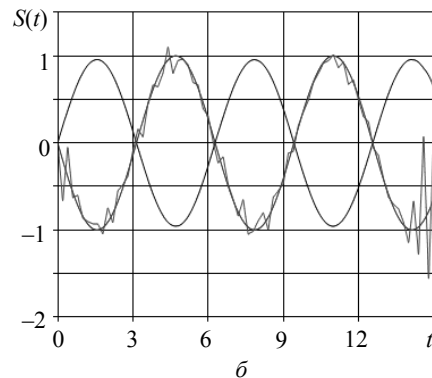
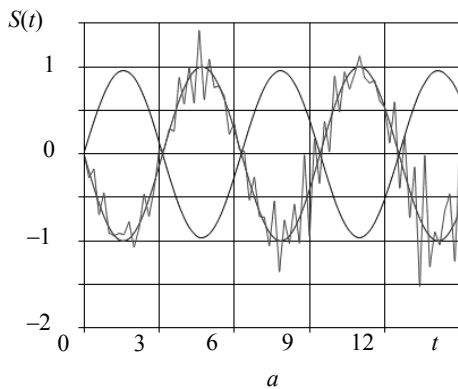


Рис. 5. Результаты моделирования при вычислении производной второго порядка синусоиды

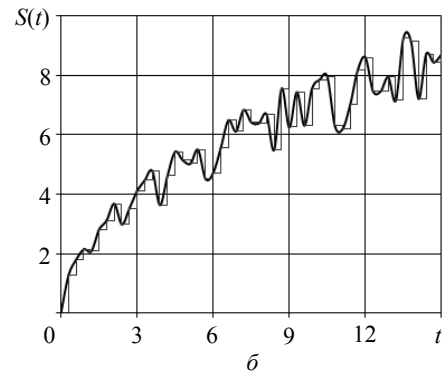
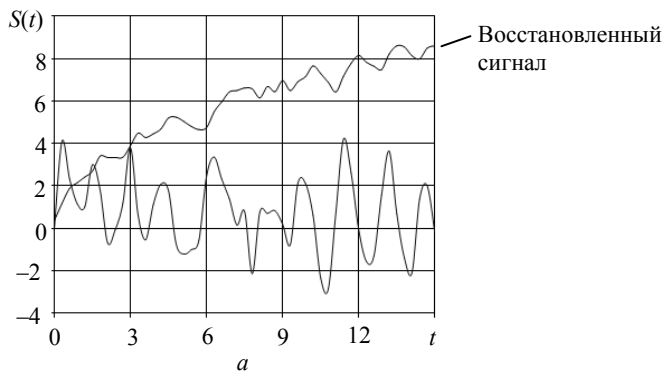


Рис. 6. Результаты моделирования при вычислении производной первого порядка сигнала произвольной формы

Таким образом, применение помехоустойчивого кодирования при обмене информацией между системой управления и объектом управления позволяет повысить точность выполнения операции ЦДС за счет уменьшения искажений входной информации и повышения достоверности ее передачи.

Литература

1. Cheng J. Numerical differentiation and applications / J. Cheng, X.Z. Jia, Y.B. Wang // *Inverse Problems in Science and Engineering*. – 2007. – Vol. 15. – P. 339–357.
2. Майстренко А.В. Цифровое дифференцирование сигналов с применением многоточечных методов в систе-

мах автоматического регулирования процессов / А.В. Майстренко, А.А. Светлаков, Н.В. Старовойтов // *Доклады ТУСУРа*. – 2009. – №2 (20). – С. 83–88.

3. Зубарев Ю.Б. Помехоустойчивое кодирование в цифровых системах передачи данных / Ю.Б. Зубарев, Г.В. Овечкин // *Электросвязь*. – 2008. – № 12. – С. 58–61.

4. David J.C. Information Theory, Inference, and Learning Algorithms / J.C. David, M. Kay. – Cambridge University Press. – 2003. – 624 p.

5. Дорофеев Ю.В. Общие вопросы электромагнитной совместимости в кабельных линиях передачи данных // *Технологии средства и связи*. – 2006. – № 3. – С. 90–93.

Гребенкин Александр Олегович
Магистр ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 41-46-54
Эл. почта: alexandergrebenkin21@gmail.com

Легостаев Николай Степанович
Канд. техн. наук, профессор
каф. промышленной электроники ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 41-46-54
Эл. почта: lns@ie.tusur.ru

Grebenkin A.O., Legostaev N.S.

Effectiveness of using noiseless coding during numerical differentiation of signals

Effectiveness of using noiseless coding during numerical differentiation of signals, due to the need of increasing the reliability of information transmission over noisy communication channels is demonstrated. Method of numerical differentiation used is based on cubic spline interpolation.

Keywords: noiseless coding, digital device, differentiation unit, derivative, cubic spline interpolation, moving average.