



ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОРОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХАОСА

С.В. Емец, С.О. Старков

Обсуждается применение цифровых методов для генерации хаоса и передачи информации с использованием хаотических сигналов. Показана возможность реализации этих методов с помощью сигнальных процессоров. Исследовано влияние ограниченной точности сигнальных процессоров на свойства генерируемых сигналов. Экспериментально реализована схема с нелинейным подмешиванием информации в хаотические колебания. Продемонстрирована невозможность прослушивания передачи речевых и музыкальных сигналов в канале.

Введение

Среди областей применения идей хаотической динамики большой интерес вызывает развитие информационных технологий на основе хаоса и, прежде всего, новых, нетрадиционных способов передачи информации. Исследования в этом направлении активно проводятся, начиная с 1990 года, и к настоящему времени предложен ряд схем и моделей, осуществляющих передачу сообщений с использованием хаотических сигналов [1–9]. Привлекательность использования хаотических колебаний в качестве носителя информации обусловлена прежде всего их спектральными свойствами. Будучи по своей природе широкополосными, они обладают свойствами известных псевдослучайных носителей (например, псевдослучайных последовательностей) – быстро спадающей автокорреляционной функцией, низкой кросскорреляцией. Вместе с тем, хаотические сигналы допускают эффективное управление такими характеристиками, как форма огибающей спектра мощности [10] и плотность вероятности распределения амплитуд [11]. Генераторы хаоса характеризуются простотой конструкций, разнообразием возможных способов построения и вариантов реализации.

В основу большинства схем передачи информации с использованием хаоса положено явление хаотической синхронизации ведомой (приемник) и ведущей (передатчик) систем. Наличие синхронного хаотического отклика [1,5–6] позволяет формировать в приемнике опорный несущий хаотический сигнал и далее с его помощью извлекать информационную составляющую без использования специальных дополнительных цепей синхронизации. Практическое использование хаоса для передачи сигналов по физическим каналам сталкивается с рядом серьезных проблем, связанных с невысокой робастностью предложенных схем. Для получения синхронного отклика необходимо выдерживать достаточно

жесткие требования к идентичности параметров передающей и приемной частей системы (~1%) [12,14–16]. Имеющиеся технологические ограничения, разброс параметров используемых радиокомпонентов существенно сужают возможности практической реализации предложенных моделей хаотических коммуникационных схем в аналоговом исполнении.

Одним из путей решения возникающих проблем является использование цифровых методов для генерации хаотических сигналов и последующей их обработки в передающей и приемной частях коммуникационных систем. В качестве источников дискретных хаотических сигналов в этом случае удобно использовать дискретные динамические системы – отображения. Поведение этих систем, особенности их динамики, характерные наблюдаемые в них бифуркационные явления достаточно хорошо изучены, поэтому именно отображения удобно использовать в качестве объектов для цифрового моделирования.

К настоящему времени предложено несколько схем, демонстрирующих возможность передачи сообщений на основе дискретных динамических систем с хаосом [17–20]. Вопросы применимости цифровых методов для генерации хаотических сигналов, построения цифровых схем передачи сообщений с использованием хаоса требуют специального исследования. Предварительный анализ этих возможностей проводился в [21–24]. В данной работе обсуждаются особенности цифровых алгоритмов генерации хаотических сигналов, показана возможность создания генераторов хаоса на основе цифровых сигнальных процессоров (ЦСП), рассматриваются свойства полученных генераторов, а также приводятся результаты экспериментов по передаче речевых и музыкальных сигналов с использованием ЦСП.

1. Влияние ограниченной точности цифровых методов

Применение цифровых методов предполагает временную дискретизацию сигналов, и, вообще говоря, квантование их амплитуды по уровню. При цифровом моделировании динамического хаоса возникает ряд вопросов, связанных с конечной точностью задания параметров системы, начальных условий, а также ограниченной точностью вычислений вследствие конечного представления переменных (числа битов).

Отображения, как правило, демонстрируют хаотическое поведение в достаточно широкой области параметров, поэтому в пространстве параметров всегда можно выбрать такую сетку, на которой значения параметров и начальные условия в точности соответствуют выбранному битовому представлению. Более серьезная проблема – ограниченная точность представления переменных. Переход в отображениях к конечному битовому представлению переменных может существенным образом менять их динамику. Ограниченное битовое представление переменных в точечных отображениях означает, что пространство состояний содержит конечное число ячеек, общее количество которых равно $N \cdot 2^k$, где N – число независимых переменных, k – число битов, используемых для представления. Поэтому при выборе параметров, соответствующих хаотическому поведению отображений при достаточно долгом итерировании (когда число шагов превышает возможное число состояний) мы обязательно попадаем в уже однажды посещаемую ячейку фазового пространства. Следовательно, существует максимальная конечная длина неповторяющихся фрагментов отсчетов амплитуд $\{x_i\}$. Здесь необходимо отметить, что проблема истинности хаотического движения и конечномерности пространства состояний возникает и при традиционном компьютерном моделировании хаотической динамики отображений. Вопрос заключается в используемом критерии хаотичности при таком моделировании. Обычно в компьютерных экспериментах при рассмотрении относительно коротких выборок отсчетов (по сравнению с числом возможных состояний) все основные свойства хаотического движения – непериодичность, «перемешивание» и

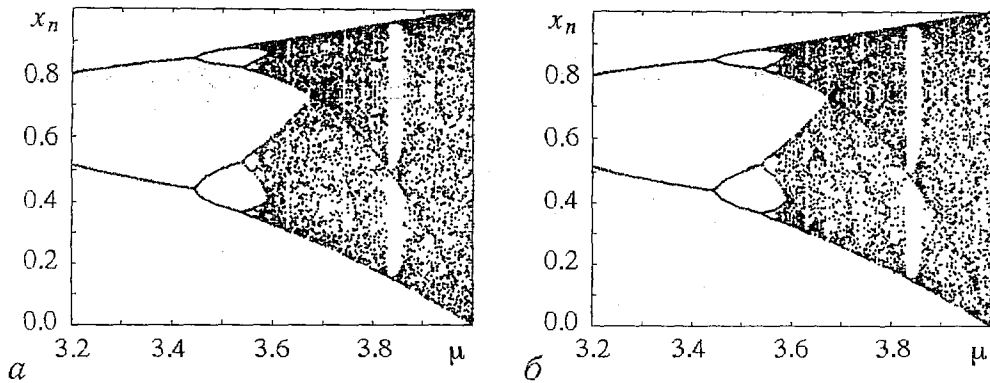


Рис. 1. Бифуркационная диаграмма логистического отображения при вычислениях: *a* – с плавающей точкой; *б* – с точностью 16 битов; *в* – с точностью 8 битов

экспоненциальное «разбегание» траекторий – сохраняются. Использование вычислений с ограниченной точностью может приводить к ситуации, когда непериодичность последовательности генерируемых отсчетов нарушается уже на относительно коротких сериях, отсчеты начинают часто попадать в одни и те же ячейки фазового пространства, то есть могут возникать периодические фрагменты с относительно малыми периодами.

Поэтому важно выяснить, какая минимально возможная точность представления (число битов) не искажает характер динамических режимов хаотических отображений. Анализ влияния точности представления на динамику отображений проводился на основе численных экспериментов. В качестве критерия оценки степени этого влияния использован метод построения бифуркационных диаграмм, отражающих поведение (периодичность/непериодичность), а также совокупность бифуркационных свойств в широкой области изменения параметров. Неустойчивость движения оценивалась на основе анализа поведения максимального ляпуновского показателя. Ниже приведены результаты исследований, проводимых на примере логистического отображения

$$x_{n+1} = \mu(1 - x_n)x_n. \quad (1)$$

Для отображения (1) последовательно строились бифуркационные диаграммы, соответствующие вычислениям от двойной точности до вычислений с точностью 8 битов. Реально, при наших оценках, в сечение бифуркационной диаграммы выводилось до 1000 точек. Результаты моделирования представлены на рис. 1, 2. Сравнение диаграмм на рис. 1, *a* (вычисления с двойной точностью, 64 бита) и на рис. 1, *б* (вычисления с точностью 16 битов) свидетельствует о совпадающей динамике логистического отображения в широкой области изменения параметра μ . Расположение областей непериодического движения, а также характерных «окон устойчивости» на рис. 1, *a* и *б* практически идентичны. Дальнейшее огрубление вычислений приводит к нарушению структуры диаграммы, появлению многочисленных новых окон периодичности. Существенное изменение характера динамических режимов начиналось с точности 13–14 битов. На рис. 1, *в* приведена диаграмма, соответствующая точности вычислений 8 битов, где практически отсутствуют области непериодического поведения. Более детальное сопоставление фрагментов бифуркационных диаграмм (рис. 2, *a, б*) подтверждает

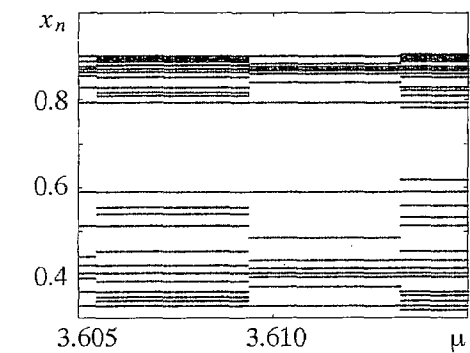
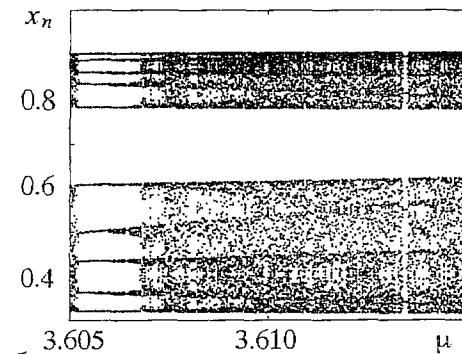
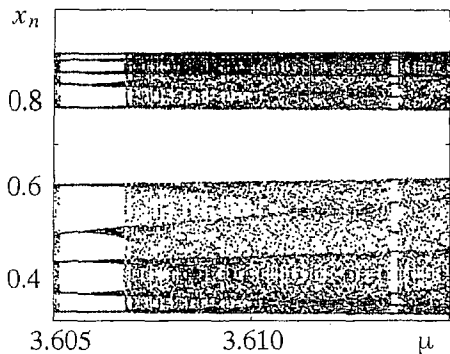


Рис. 2. Фрагмент бифуркационной диаграммы логистического отображения при вычислениях: *a* – с плавающей точкой; *б* – с точностью 16 битов; *в* – с точностью 8 битов

хаотических траекторий, скорости их «разбегания» практически постоянны во всем диапазоне изменения параметра μ .

вывод о том, что при точности вычислений вплоть до 16 битов динамика системы остается практически неизменной, тогда как дальнейшее ухудшение точности вычислений приводит к потере хаотичности и установлению только периодических режимов (рис. 2, *в*). Наряду с анализом бифуркационных свойств для отображения (1) проводились оценки устойчивости возникающих режимов. На рис. 3 представлены зависимости показателя Ляпунова при вычислениях с точностью 64 бита (рис. 3, *а*) и с точностью 16 битов (рис. 3, *б*). Длина выборок, по которым рассчитывался показатель Ляпунова, составляла $2 \cdot 10^4$. Как следует из сравнения приведенных зависимостей, свойства «разбегания» практически постоянны во

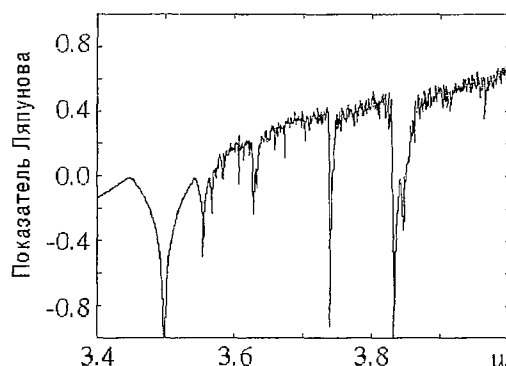
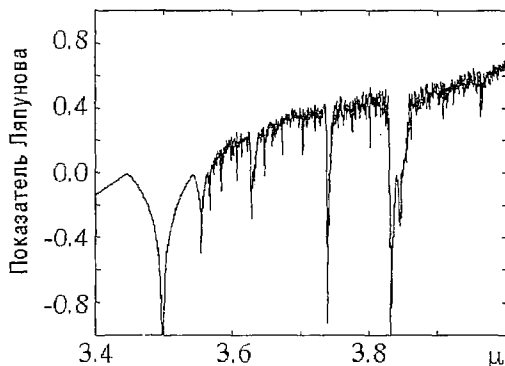


Рис. 3. Зависимость ляпуновского показателя от параметра μ логистического отображения при вычислениях: *а* – с плавающей точкой; *б* – с точностью 16 битов

2. Выбор элементной базы

При создании реальных коммуникационных схем, использующих хаотическую несущую, возникает проблема выбора элементной базы. Применение

универсальных микропроцессорных комплектов (8051 и др.) наталкивается на серьезные ограничения частоты дискретизации (реально не превышающей 10 кГц). Весьма перспективным представляется использование специализированных сборок дискретных элементов, например, программируемых логических матриц, FPGA (Field Programmable Gate Array), CPLD (Complex Programmable Logic Devices). Однако наиболее широко применяемыми в настоящее время средствами цифровой обработки сигналов являются ЦСП, обладающие высокой вычислительной производительностью, возможностью сопряжения с аналоговыми частями схемы, универсальностью средств отладки и относительно низкой стоимостью. По способу представления операций над сигналами процессоры подразделяются на два типа: с плавающей точкой и с фиксированной точкой.

Проведенный в предыдущем разделе анализ свидетельствует о том, что арифметика 16-битовых сигнальных процессоров не приводит к изменению характера режимов моделируемых систем в широкой области параметров, и с этой точки зрения их применение для генерации хаотических сигналов является корректным.

Для проведения экспериментов выбран сигнальный процессор ADSP-2181 фирмы Analog Device. Процессор использовался в составе базового комплекта EZkitLite совместно с микросхемой аналогового ввода/вывода (кодеком) AD-1847. Блок-схема платы EZkitLite приведена на рис. 4. В применяемом процессоре используется 16-битовое представление переменных, что по точности приблизительно соответствует пяти десятичным разрядам. Встроенные операции данный процессор позволяет выполнять с фиксированной точкой. При представлении данных каждому разряду соответствует степень числа 2, то есть поля под мантиссу и порядок не выделяются. В зависимости от расстановки степеней числа 2 возможны два различных представления. Первое представление – в формате целых чисел. В этом случае динамический диапазон составляет $-2^{15} \div 2^{15}$ (знаковое представление) либо $0 \div (2^{16}-1)$ (беззнаковое представление). Второе представление – с фиксированной точкой. Для этого вида динамический диапазон составляет $-1 \div (1-2^{-15})$ (знаковое представление) и $0 \div (2-2^{-15})$ (беззнаковое представление). В последнем случае величины, меньшие 2^{-15} , являются нулями.

Для обработки аналоговых информационных сигналов использовалась микросхема аналогового ввода/вывода (кодек) AD-1847. Кодек имеет два 16-битовых цифро-аналоговых преобразователя (ЦАП) и два 16-битовых аналого-цифровых преобразователя (АЦП), управляемые входные усилители для обеспечения большего динамического диапазона, мультиплексоры и аттенюаторы для динамического переключения аналоговых входов и выходов, тактовый генератор и цифровую часть управления и приема/передачи данных в сигнальный процессор. Это позволяет использовать плату EZkitLite для проведения экспериментов по обработке сигналов, ограниченных звуковым диапазоном частот, без дополнительных доработок. Обмен данными между кодеком и процессором производится по последовательному каналу. После инициализации кодек передает сигнальному процессору пары отсчетов АЦП и получает от него пары отсчетов ЦАП через интервал, определяемый частотой дискретизации. Микросхема аналогового ввода/вывода AD-1847 позволяет работать с частотой дискретизации от 5 до 48 кГц. Тактовая частота процессора

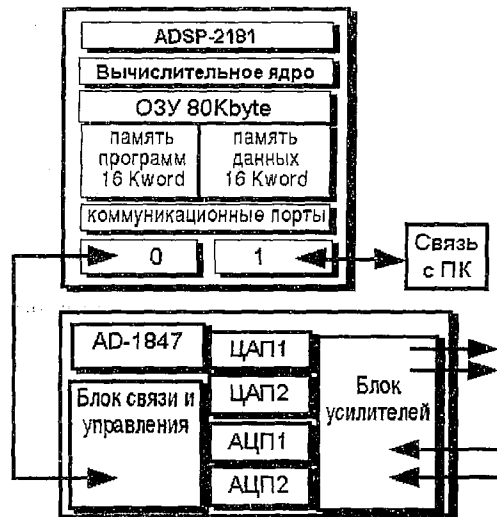


Рис. 4. Блок-схема платы сигнального процессора. Сигнальный процессор ADSP-2181 и микросхема аналогового ввода/вывода AD1847

33 МГц обеспечивает возможность использования до 1000 простых операций (кроме деления) для обработки входных отсчетов, соответствующих звуковым фрагментам высокого качества (частота дискретизации 44 кГц).

3. Генерация хаоса с использованием сигнального процессора

Для генерации цифровых хаотических сигналов с помощью сигнального процессора использовали несколько известных отображений: логистическое отображение (1); несимметричное «tent»-отображение

$$x_{n+1} = \begin{cases} 1 - 2x_n, & x_n \geq 0, \\ 1 + 1.8x_n, & x_n < 0; \end{cases} \quad (2)$$

двумерное отображение Хенона

$$\begin{cases} x_{n+1} = 1 - \alpha x_n^2 + y_n, \\ y_{n+1} = \beta x_n. \end{cases} \quad (3)$$

Для 16-битового процессора при точности 2^{-15} диапазон вычислений не выходит за пределы интервала $(-1,1)$, поэтому применение сигнальных процессоров с фиксированной точкой требует перенормировки исходных используемых точечных отображений.

В случае отображения (1) дополнительного преобразования не требуется. Более того, поскольку функция (1) лежит в первом квадранте, можно воспользоваться беззнаковым представлением.

Для (2) подобная перенормировка приводит отображение к виду

$$x_{n+1} = \begin{cases} 0.5 - 2x_n, & x_n \geq 0, \\ 0.5 + 1.8x_n, & x_n < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Перенормированное отображение Хенона (3) выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} x_{n+1} = 0.5 - 2\alpha x_n^2 + y_n, \\ y_{n+1} = \beta x_n. \end{cases} \quad (5)$$

Цифровое моделирование динамики отображений продемонстрировало идентичность видов исходных и получаемых с помощью 16-битового сигнального процессора отображений. Соответствующий вид реализованного с помощью сигнального процессора аттрактора Хенона при трех наборах значений параметров (α, β) представлен на рис. 5, а–в. В классической точке пространства параметров $(\alpha=1.4, \beta=0.3)$ [25] наблюдался типичный аттрактор Хенона (рис. 5, а). Точка $(\alpha=1.498, \beta=0.15)$ соответствует в пространстве параметров окну периодичности с периодом 5 [26]. В эксперименте также наблюдался периодический режим (рис 5, б). Для $\alpha=1.252, \beta=0.39$ вновь реализовывались хаотические колебания. Соответствующий этому режиму аттрактор приведен на рис. 5, в.

Спектры мощности сигналов, генерируемых отображениями (4), (5) с помощью сигнального процессора, приведены на рис. 6.

Поскольку генерируемые с помощью ЦСП хаотические отсчеты предполагается в дальнейшем использовать в качестве носителя информации, важное значение имеет устойчивость реализуемых алгоритмов, определение допустимого уровня возмущений, не разрушающих исходные хаотические режимы. В экспериментах в качестве внешнего возмущающего сигнала использовалась последовательность отсчетов $\{s_n\}$, которая представляла собой оцифрованный с

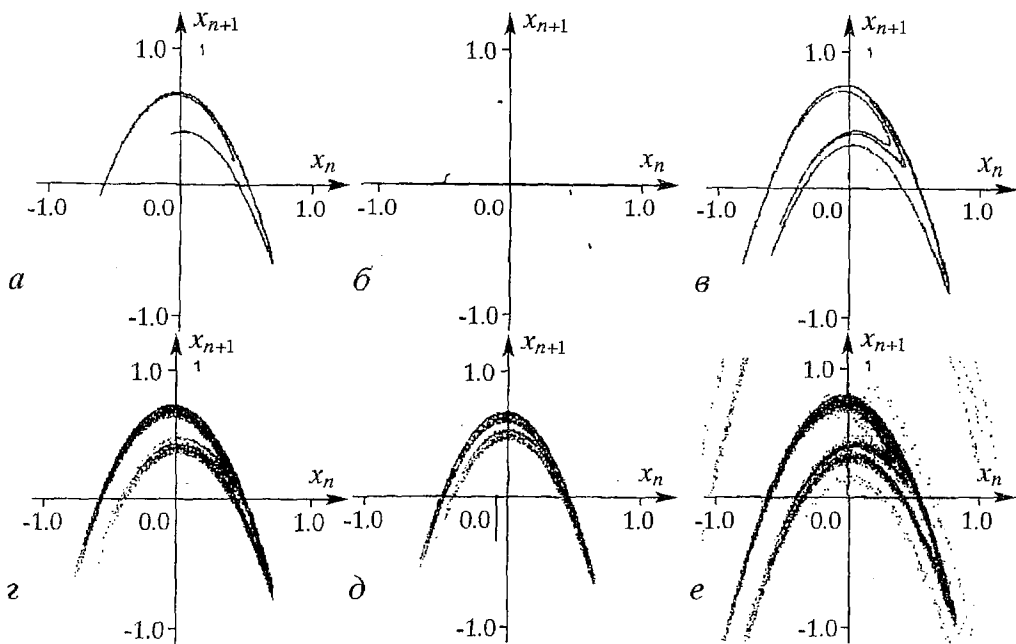


Рис. 5. Отображение Хенона, реализованное с помощью сигнального процессора: невозмущенное (а-в); при подмешивании внешнего возмущающего сигнала (г-е)

помощью АЦП тестовый аналоговый сигнал с фиксированным уровнем амплитуд. Эти отсчеты аддитивно добавлялись к хаотическим отсчетам перед функцией нелинейного преобразования исследуемых отображений $x_{n+1}=f(x_n+s_n)$. Вид возмущенного отображения Хенона для различных параметров приведен на рис. 5, г-е. Уровню внешнего сигнала -26 дБ и параметрам $\alpha=1.4$, $\beta=0.3$ соответствует рис. 5, г. Добавление внешнего сигнала при $\alpha=1.498$, $\beta=0.15$ приводило, как и ожидалось, к возникновению более сложного режима (рис. 5, д).

Возмущение динамики отображения (5) при значениях параметров $\alpha=1.252$, $\beta=0.39$, находящихся вблизи границы устойчивости отображения (5), приводило к тому, что отсчеты начинали попадать за пределы интервала $(-1, 1)$, то есть нарушалась корректность представления переменных (рис. 5, е).

Проведенные эксперименты продемонстрировали устойчивость алгоритмов сигнальных процессоров отображений (1), (3), (4) при относительно небольших уровнях возмущений (порядка $-25 \div 30$ дБ) а также позволили выбрать значения параметров отображений (1), (4), (5), обеспечивающие устойчивую генерацию хаотических отсчетов.

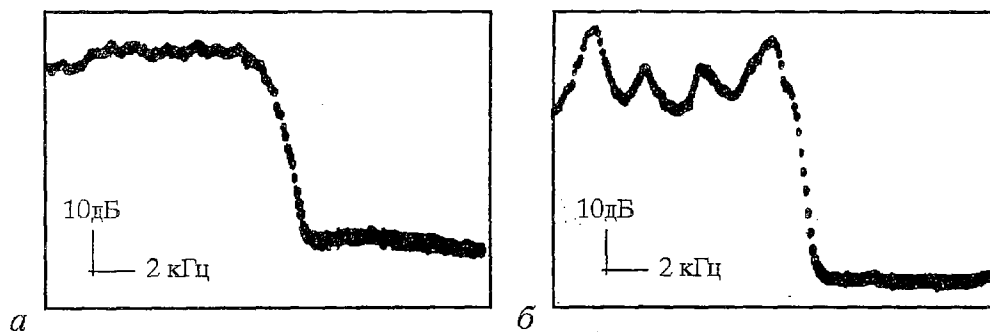


Рис. 6. Спектральные характеристики сигналов, соответствующих «tent»-отображению (а) и отображению Хенона (б)

4. Схема передачи информации

В качестве базовой схемы передачи информации была выбрана схема с нелинейным подмешиванием информационного сигнала в хаотический [5,6, 12–15]. Структура рассматриваемой схемы представлена на рис. 7. Здесь $\{s_n\}$ – последовательность отсчетов кодируемого информационного сигнала; x_n+s_n – закодированный сигнал, который передается по каналу; $f(\cdot)$ – функция нелинейного преобразования, осуществляющая генерацию следующего отсчета по предыдущему.

Передатчик состоит из сумматора, блока вычислений следующего отсчета x_{n+1} , и блока задержки на один такт. Эти элементы замкнуты в кольцо обратной связи и при нулевом информационном сигнале передатчик генерирует выборку хаотических отсчетов $\{x_n\}$. При добавлении информационного отсчета, получаемого с помощью АЦП, на вход нелинейного преобразователя поступает сумма, то есть в формировании последующего хаотического отсчета принимают участие как информационный, так и собственный отсчеты $x_{n+1}=f(x_n+s_n)$. В канал связи поступает суммарный сигнал x_n+s_n .

Извлечение полезного сигнала в приемнике, построенном на тех же самых элементах, производится вычитанием сигнала, прошедшего по разомкнутому кольцу, из сигнала, поступающего на вход приемника. При отсутствии информационного сигнала ($s_n=0$) в рассматриваемой схеме и при использовании идентичного нелинейного преобразования f в передатчике и приемнике, последний формирует синхронный хаотический отклик, представляющий собой точное воспроизведение хаотической последовательности отсчетов, генерируемых передатчиком. В результате на выходе вычитающего элемента устанавливается нулевой сигнал. При передаче информации в установившемся режиме на вход приемника поступает сигнал x_n+s_n , на выходе блока задержки формируется сигнал x'_n . После вычитания $s_n+x_n-x'_n$ при $x_n=x'_n$ происходит извлечение полезного передаваемого информационного отсчета s_n . Одновременно в блок задержки загружается следующее значение x'_{n+1} , которое вычисляется так же, как и x_{n+1} в передатчике, и приемник готов к обработке следующего отсчета.

В силу цифрового характера формирования хаотического сигнала и его обработки в приемнике, вопрос о воспроизводимости параметров передатчика и приемника сводится к точности вычислений. Если информационный сигнал отсутствует, то на выходе приемника наблюдается остаточный шум, связанный с конечной точностью вычислений. Экспериментальное исследование показало, что для различных типов используемых отображений (4), (5) уровень остаточного шума не превышал $-80 \div -85$ дБ.

Поскольку в канал передается сумма информационного и хаотического отсчетов, то при относительно малом уровне информационной составляющей

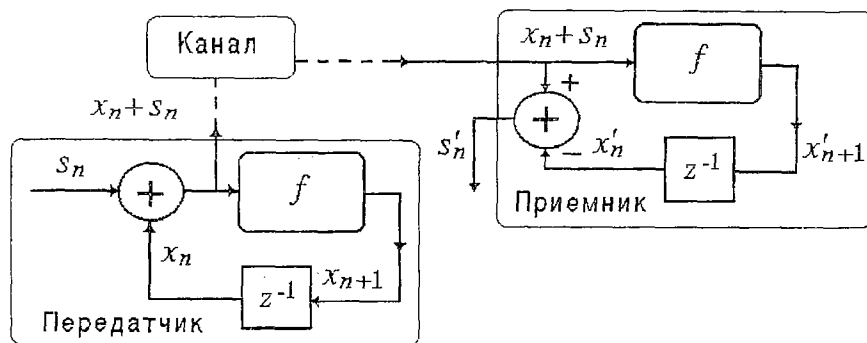


Рис. 7. Структура схемы передачи с нелинейным подмешиванием информационного сигнала в динамику хаотической системы

($-26 \div 30$ дБ), обеспечивается определенная степень конфиденциальности передаваемой информации.

Рассматриваемая схема передачи реализована на основе одномерного отображения, но она может быть обобщена на отображения более высокого порядка $x_{n+1} = f(x_n)$. В этом случае информационные отсчеты добавляются к одной компоненте, а остальные компоненты остаются свободными, то есть и в передатчике и в приемнике поступают на вход блока вычислений следующего значения непосредственно из блока задержки. Такая схема, в частности, была реализована для двумерного отображения Хенона (5), где в качестве модулируемой использовалась координата x_n .

5. Эксперименты по передаче аналоговых сигналов

Эксперименты по передаче информации с использованием цифровых процессоров проводились для различных типов дискретных динамических систем: «tent»-отображения (4), логистического отображения (1), отображения Хенона (5). Исходный аналоговый информационный сигнал подавался на вход АЦП1 (см. рис. 4), где с частотой дискретизации 44 кГц производилась выборка отсчетов, поступающих далее на вход алгоритма передатчика. Для каждого входного отсчета передатчик формировал отсчет хаотического сигнала, моделируемый буфером в памяти и поступающий в канал связи. Одновременно этот отсчет подавался на вход ЦАП1. Приемник, получая данные из буфера, обрабатывал их по своему алгоритму и подавал восстановленный сигнал на вход ЦАП2. Таким образом, на выходе ЦАП1 имеется возможность прослушивать сигнал в канале, а на выходе ЦАП2 – восстановленный информационный сигнал. При подключении двухлучевого осциллографа к АЦП1 и к ЦАП1 можно было одновременно наблюдать информационный сигнал и сигнал в канале.

Первоначально были проведены эксперименты по передаче простых тестовых аналоговых сигналов. Рис. 8, а, б иллюстрируют передачу гармонического сигнала с использованием «tent»-отображения (4). На рис. 8, а верхний сигнал представляет собой вводимую информацию, а нижняя осциллограмма соответствует сигналу в канале. Масштаб приведенных амплитуд соответствует соотношению уровней информационного сигнала и сигнала в канале, которое составляло -28 дБ. Как следует из формы сигнала в канале, он не содержит никаких признаков информационной составляющей. Качество восстановления гармонического информационного сигнала в системе иллюстрируется рис. 8, б. Нижняя и верхняя осциллограммы соответствуют извлекаемому в приемнике сигналу, и сигналу на входе передатчика. Уровень остаточных шумов, определяемый ошибками вычислительных алгоритмов сигнального процессора, не превышал -40 дБ. Эксперименты продемонстрировали аналогичное качество восстановления исходного тестового сигнала и для других используемых в качестве генератора хаоса отображений (1), (5).

Следующий шаг заключался в передаче более сложных аналоговых сигналов, а именно, речевой и музыкальной информации. На рис. 8, в, г представлены результаты экспериментов по передаче речевого сигнала в системе, реализованной на основе отображения (4). Уровень входного сигнала составлял -30 дБ по отношению к хаотическому сигналу (см. рис. 8, в). Остаточные шумы не превышали величину $-35 \div 40$ дБ. При отсутствии искажений и помех в канале связи форма восстанавливаемых сигналов практически не отличалась от исходной (см. рис. 8, г). Характер спектральных характеристик сигналов в канале, которые практически повторяли спектры мощности автономных источников хаоса (см. рис. 6, а, б), свидетельствует о том, что реализованная схема передачи информации обладает конфиденциальностью, поскольку спектральная плотность передаваемых информационных речевых сигналов совпадает по полосе со спектральной плотностью хаотических сигналов и по уровню существенно ниже последних. Оценка восстанавливаемого речевого сигнала, проводимая на основании

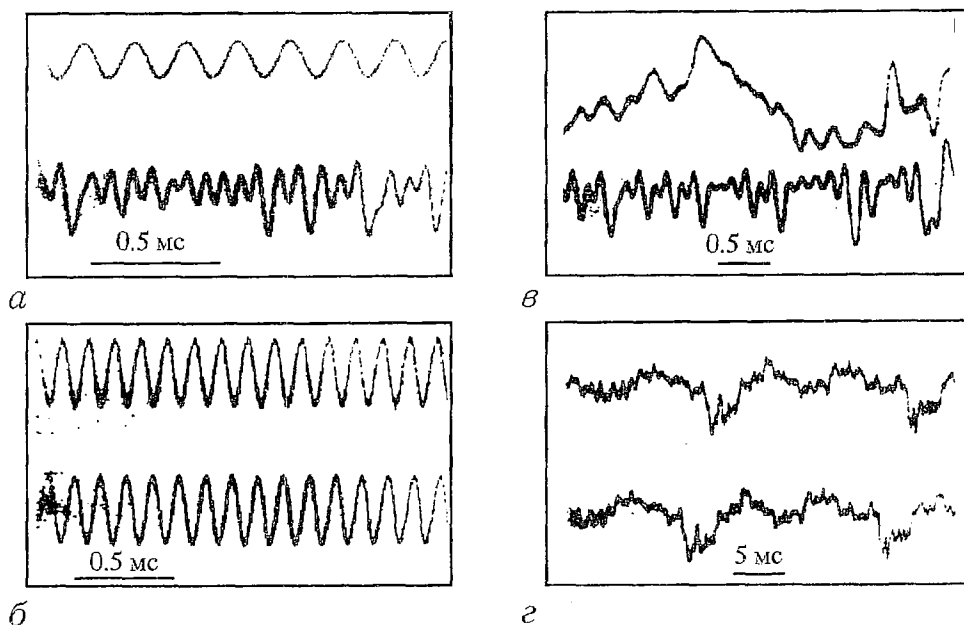


Рис. 8. Эксперименты по передаче информации с использованием сигнальных процессоров. Передача гармонического сигнала на основе «tent»-отображения (4); информационный гармонический сигнал: а – входной сигнал (верхняя осциллограмма) и сигнал в канале (нижняя осциллограмма); б – исходный и восстановленный приемником сигналы. Передача речевых сигналов на основе «tent»-отображения (4), информационный сигнал – фрагменты речи: в – входной сигнал (верхняя осциллограмма) и сигнал в канале (нижняя осциллограмма); г – исходный и восстановленный приемником сигналы

прослушивания исходного и извлекаемого в приемнике фрагментов, подтвердила хорошее качество извлекаемого сигнала. При этом прослушивание сигнала в канале не представлялось возможным. Невозможно было также идентифицировать сам факт передачи информации по каналу.

Заключение

Проведенные исследования продемонстрировали возможность применения цифровых сигнальных процессоров для генерации хаотических сигналов и построения цифровых систем передачи с использованием хаоса в качестве информационного носителя.

Сигнальные процессоры представляют собой удобную элементную базу для создания хаотических генераторов, позволяющую достаточно точно воспроизводить характерные динамические режимы. Высокая производительность сигнальных процессоров, быстрое развитие технологий позволяют создавать высокоточные, легко тиражируемые источники хаотических сигналов в широком (вплоть до сотен МГц) диапазоне частот.

На примере схемы с нелинейным подмешиванием показана возможность передачи информационного сигнала с помощью хаотической несущей с высоким качеством воспроизведения в приемной части системы. Экспериментально продемонстрирована конфиденциальность передачи аналоговых сообщений звукового диапазона (речь, музыка).

Авторы выражают признательность А.С. Дмитриеву, А.И. Панасу за полезные обсуждения в ходе выполнения настоящей работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 99-02-18315).

Библиографический список

1. Pecora L.M., Carrol T.L. Synchronization in chaotic systems // *Phys. Rev. Lett.* 1990. Vol. 64, № 8. P. 821.
2. Kocarev L., Halle K.S., Eckert K., Chua L., Parlitz U. Experimental demonstration of secure communications via chaotic synchronization // *Int. J. Bifurcation and Chaos.* 1992. Vol. 2, № 3. P. 709.
3. Parlitz U., Chua L., Kocarev L., Halle K., Shang A. Transmission of digital signals by chaotic synchronization // *Int. J. Bifurcation and Chaos.* 1992. Vol. 2, № 4. P. 973.
4. Cuomo K., Oppenheim A. Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communications // *Phys. Rev. Lett.* 1993. Vol. 71, № 1. P. 65.
5. Бельский Ю.Л., Дмитриев А.С. Передача информации с использованием детерминированного хаоса // *Радиотехника и электроника.* 1993. Т. 38, № 7. С. 1310.
6. Волковский А.Р., Рульков Н.В. Синхронный хаотический отклик нелинейной системы передачи информации с хаотической несущей // *Письма в ЖТФ.* 1993. Т. 38, № 7. С. 1310.
7. Halle K.S., Wu C.W., Itoh M., Chua L.O. Spread spectrum communication through modulation of chaos // *Int. J. Bifurcation and Chaos.* 1993. Vol. 3, № 2. P. 469.
8. Hasler M., Dedieu H., Kennedy M., Schweizer J. Secure communication via Chua's circuit // *Proc. International Symposium on Nonlinear Theory and Applications,* 1993, Hawaii, USA. P. 87.
9. Heyes S., Grebogi C., Ott E. Communicating with chaos // *Phys. Rev. Lett.* 1993. Vol. 70, № 20. P. 87.
10. Dmitriev A.S., Panas A.I., Starkov S.O. Ring oscillating systems and their application to the synthesis of chaos generator // *Int. J. Bifurcation and Chaos.* 1996. Vol. 6, № 5. P. 851.
11. Gotz M., Kelber K., Schwarz W. Discrete-time chaotic coders for information encryption // *Proc. NDES'96.* Sevilla, Spain, 1996. P. 15.
12. Бельский Ю.Л., Дмитриев А.С. Влияние возмущающих факторов на работоспособность системы передачи информации с хаотической несущей // *Радиотехника и электроника.* 1995. Т. 40, № 2. С. 265.
14. Dmitriev A., Panas A., Starkov S. Transmission of complex analog signals by means of dynamical chaos // *Proc. NDES'95.* 1995. Dublin. Ireland. P. 241.
15. Dmitriev A.S., Panas A.I., Starkov S.O. Experiments on music and speech transition in system with nonlinear mixing of chaotic and information oscillations // *Proc. ECCTD'95 / Istanbul.* Turkey. 1995. P.475.
16. Panas A.I., Dmitriev A.S., Kuzmin L.V., Starkov S.O. Experiments on RF-band communication using chaos // *Int. J. of Bifurcation and Chaos.* 1997. Vol. 7, № 11. P. 2511.
17. Bohme F., Schwarz. The chaotizer-dechaotizer channel // *IEEE Trans. on Circuits and Systems II.* 1993. Vol. 40, № 10. P. 660.
18. Itoh M., Murakami H. Chaos synchronization in discrete-time dynamical systems and secure communication // *Proc. European Conference on Circuit Theory and Design.* 1993. P. 611.
19. Kelber K., Kiliass T. Analysis of encoder-decoder-system based on digital filter structure with two's complements overflow characteristics // *Proc. ISCAS'96.* 1996. Vol. 3. P. 166.
20. Restituto M.D., Ahumada R.L., Vasques A.E. Secure communication using CMOS current-mode sampled-data circuits // *Proc. Nonlinear Dynamics of Electronic System.* 1995. P. 237.
21. Дмитриев А.С., Емец С.В., Панас А.И., Старков С.О. Эксперименты по применению сигнальных процессоров для передачи информации с использованием хаотических колебаний // *Препринт ИРЭ РАН.* 1997, № 618.
22. Starkov S.O., Emetz S.V. Digital communication system using chaos // *Proc. International Conference Control of Oscillation and Chaos.* 1996. P. 207.
23. Dmitriev A.S., Panas A.I., Starkov S.O., Emetz S.V. Digital processing for chaos generation and information transmission // *Proc. NDES'97.* Moscow. 1997. P. 370.

24. *Dmitriev A., Starkov S., Emetz S.* Chaotic communication using digital signal processing // Proc. NOLTA '98. Crans–Montana. Switzerland. 1998. P. 1093.

25. *Шустер Г.* Детерминированный хаос. Москва. Мир. 1988. С.112.

26. *Дмитриев А.С., Старков С.О., Широков М.Е.* Структура периодических орбит хаотической автоколебательной системы, описываемой разностными уравнениями второго порядка // РЭ. 1994. Т. 39, № 9. С. 1392.

Институт радиоэлектроники РАН

Поступила в редакцию 24.12.98

USING OF DIGITAL SIGNAL PROCESSORS FOR CHAOS GENERATION AND CHAOTIC COMMUNICATION

S.O. Starkov, S.V. Emetz

The use of digital processing for chaos generation and chaotic communication is discussed. The possibility of implementation of the digital signal processors is shown. The affect of digital processing precision on chaos properties is investigated. Chaotic communication scheme with nonlinear mixing of information and chaos, based on digital signal processor, is realized. Experiments on voice and music transmission are carried out.



Старков Сергей Олегович – 1956 года рождения. Окончил факультет радиотехники и электроники Московского физико–технического института (1979), кандидат физ.–мат. наук (1987). Старший научный сотрудник ИРЭ РАН. Область научных интересов: динамический хаос в радиоэлектронных устройствах; информационные технологии на основе динамического хаоса. Автор более 60 научных трудов. Лауреат премии Ленинского комсомола в области науки и техники. E–mail: chaos<chaos@mail.cplire.ru>



Емец Сергей Вячеславович – 1973 года рождения. Окончил факультет радиотехники и электроники Московского физико–технического института (1996). В настоящее время аспирант ИРЭ РАН. Область научных интересов: использование динамического хаоса для передачи информации, цифровые методы обработки сигналов. Автор 5 публикаций.