

На правах рукописи



Кусайкин Дмитрий Вячеславович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
ДИСКРЕТНЫХ СИГНАЛОВ, ЗАДАННЫХ НА НЕРАВНОМЕРНОЙ
ВРЕМЕННОЙ СЕТКЕ С НЕИЗВЕСТНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ КООРДИНАТ
УЗЛОВ**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (связь и информатизация)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2015

Работа выполнена в Уральском техническом институте связи и информатики (филиал) Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (УрТИСИ ФГОБУ ВПО «СибГУТИ») в городе Екатеринбурге.

Научный руководитель: **Поршнев Сергей Владимирович,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Зобнин Борис Борисович,**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информатики
ФГБОУ ВПО «Уральский государственный
горный университет»

Белозеров Вадим Анатольевич,
кандидат технических наук, начальник группы
защиты информации Федерального казенного
предприятия «Нижнетагильский институт
испытания металлов»

Ведущая организация: ОАО «Научно-производственное
объединение автоматики имени
академика Н.А.Семихатова»

Защита состоится 06 ноября 2015 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 219.005.03 при ФГОБУ ВПО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» по адресу 630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86, ауд. 625.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГОБУ ВПО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» по адресу 630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86, и на сайте университета, http://www.sibsutis.ru/science/postgraduate/dis_sovets/

Автореферат разослан «___» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 219.005.03

к.т.н.



Полетайкин Алексей Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При реализации высокоскоростных аналого-цифровых преобразователей (АЦП), обрабатывающих высокочастотные сигналы порядка сотен мегагерц и единиц гигагерц, одной из основных проблем, ограничивающей дальнейшее повышение скорости, является проблема нестабильности частоты дискретизации по времени (джиттера). В результате сигнал, получаемый на выходе высокоскоростного АЦП, представляет собой дискретный сигнал (ДС), заданный на неравномерной временной сетке (НВС) с неизвестными значениями координат ее узлов. ДС данного типа получают, например:

- на выходе высокоскоростных АЦП из-за несоответствия синхросигнала, задающего частоту дискретизации по времени;
- в системе, состоящей из набора АЦП, работающих параллельно с временным разделением (Time- Interleaved ADCs);
- в многоскоростных дециматорах.

Кроме того, ДС, заданные на НВС с неизвестными точно значениями координат ее узлов, возникают и ряде других технических систем: в системах звукозаписи, в навигационных системах в подводной акустики, в парашютных радиозондах, в автоматических платформах, в системах, реализующих парадигму «умной пыли» (smart dust), в оптических фурье-спектрометрах, в медицине (например, при исследовании variability сердечного ритма; в лазерной доплеровской анемометрии при измерении скорости частиц) и др.

Существуют две отличные друг от друга постановки задачи восстановления ДС с НЧД:

Задача 1. Дана последовательность значений ограниченного по спектру ДС $x \in \{x_0, x_1, \dots, x_N\}$, заданного на НВС, с соответствующими значениями координат $t_i \in \{t_0, t_1, \dots, t_N\}$, $i = \overline{1, N}$. Необходимо по данным наборам произвести восстановление ДС в узлах равномерной временной сетки

$$\eta_m = mT_1, \quad m = \overline{1, M}, \quad (1)$$

где $t_1 \leq \eta_1 \leq t_2$; T_1 – период дискретизации ($T_1 < T$); M – число узлов ВС η_m .

Задача 2. Дана последовательность значений ограниченного по спектру ДС $x \in \{x_0, x_1, \dots, x_N\}$, заданного на НВС, например с джиттером

$$t_i = iT + \tau_i, \quad t_i > t_{i-1}, \quad i = \overline{1, N} \quad (2)$$

T – период дискретизации; $\tau_i \in]-T/2, T/2[$ – случайная величина, точные значения которой неизвестны. Необходимо произвести восстановление ДС в узлах равномерной временной сетки η_m (1).

Отличие данных задач поясняется рис. 1. Отметим, что наибольший интерес представляет собой вторая задача, наиболее часто встречающаяся на практике.

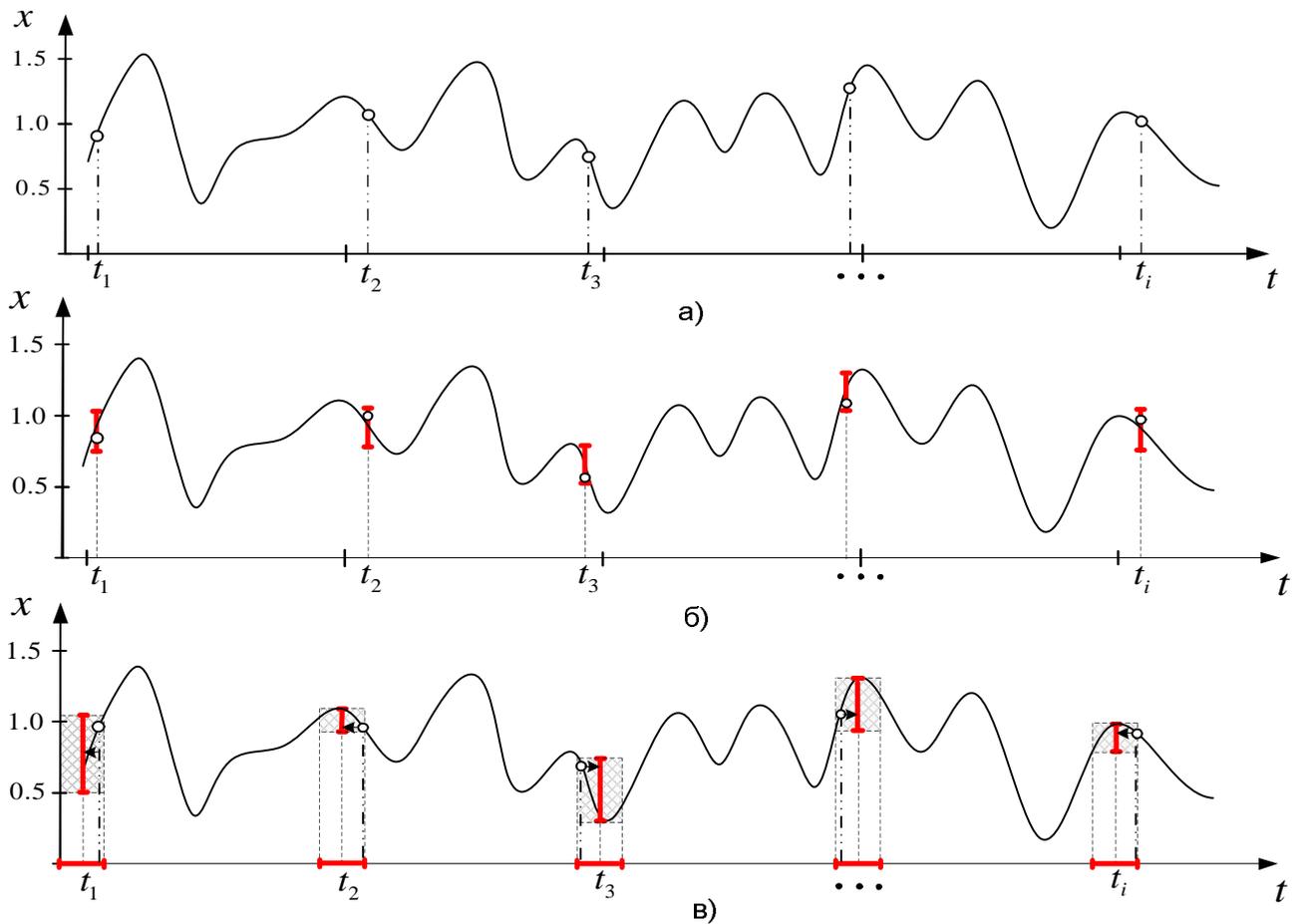


Рис. 1 К постановке задачи восстановления ДС, заданного на НВС: а), б) с известными значениями координат узлов (Задача №1) в рамках задачи интерполяции и аппроксимации, соответственно; в) с неизвестными значениями координат узлов (Задача № 2)

В связи с тем, что в большинстве методов цифровой обработки сигналов (ЦОС), явно или неявно предполагается, что значения ДС заданы в узлах временной сетки (ВС) с фиксированным расстоянием между ее узлами (дифференцирование, интегрирование, Фурье-анализ и т.д.), неотъемлемой частью процесса ЦОС данного типа ДС является процедура восстановления ДС – вычисления значений ДС в узлах той или иной равномерной ВС. На сегодняшний день существуют методы восстановления ограниченных по спектру сигналов, заданных в узлах НВС [Senay S., Feichtinger H. G., Grochenig K., Strohmer T., Tuncer T. E., Marvasti F., Selva J. и др.]. Анализ данных методов показывает, что в их основу положено предположение (явно или неявно) о том, что координаты узлов НВС известны точно, которое, как очевидно, делает задачу восстановления ДС по своей постановке аналогичной классической задаче интерполяции, методы решения которой известны.

Большой вклад в рассматриваемую тему внесли работы следующих отечественных исследователей: Горелов Г.В., Билинский И. Я., Микелсон А. К., Прохоров, С. А., Ефимов В. М., Бондаренко Ю. В., Касперович А. Н., Резник А. Л., Хургин Я. И., Яковлев В. П. и др.

Значительно более сложной задачей оказывается задача восстановления ДС, заданного на НВС с неизвестными точно значениями координат ее узлов. Здесь,

априори, можно ожидать, что известные методы восстановления сигналов, дискретизированных на НВС, окажутся неработоспособными или не обеспечат требуемой точности восстановления ДС.

Отметим, что сегодня известен ряд методов восстановления ДС, заданного на НВС с точно неизвестными координатами ее узлов [Browning J., Marziliano P., Vetterli M. и др.], основанные на нахождении оценок неизвестных значений координат НВС, представляющих собой решение некоторой многопараметрической задачи глобальной оптимизации. Однако на практике, когда число отсчетов ДС составляет 1000 отсчетов, использовать данные методы оказывается невозможным из-за высокой вычислительной сложности оптимизационной задачи и проблем выбора начального приближения, обеспечивающего сходимость итерационного процесса к истинному глобальному максимуму.

Отметим, что Задача № 2 оказывается схожей с задачей восстановления функциональной зависимости при наличии ошибок в независимых переменных по активной схеме регрессионного анализа, методы решения которой рассматривал В.Я. Катковник. При этом его основное внимание было направлено на разработку вычислительных алгоритмов, позволяющих оценивать параметры тех или иных стохастических моделей на основе локальной аппроксимации, но не собственно алгоритмов вычисления истинных значений эмпирических зависимостей, вычисляемых по данным моделям, и анализа их точности. Однако, сам подход, основанный на локальной аппроксимации, представляется достаточно конструктивным и его целесообразно использовать при решении Задачи №2.

В этой связи разработка алгоритмов восстановления ДС, заданных на НВС с точно неизвестными значениями координат ее узлов, свободных от отмеченных недостатков, оказывается актуальной.

Целью диссертационной работы является разработка алгоритмов восстановления ДС, заданных на НВС с точно неизвестными значениями координат ее узлов, и исследование точности данных алгоритмов.

Для достижения поставленной цели поставлены и решены следующие **основные задачи исследования:**

1. Проведен анализ состояния предметной области.
2. Исследована точность восстановления ДС, заданных на НВС с неизвестными точно значениями координат узлов, с помощью интерполяционных методов и оптимизационных методов оценивания координат узлов НВС.
3. Разработаны алгоритмы восстановления ДС, заданных на НВС с точно неизвестными значениями координат ее узлов, не требующие решения сложных с вычислительной точки зрения оптимизационных задач, и получены соответствующие оценки точности восстановления (среднее значение отношения мощности сигнала к мощности разности квадратов отклонений) ДС.
4. Проведен анализ точности восстановления ДС, получаемых на выходе реальных цифровых систем, с помощью разработанных алгоритмов восстановления ДС, заданного в узлах НВС.

Объектом исследования являются ДС, заданные на НВС с неизвестными точно значениями координат ее узлов.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы восстановления ДС, заданных на НВС с неизвестными значениями координат ее узлов.

Методы исследования. В работе использованы методы вычислительной математики, системного анализа, имитационного моделирования, математической статистики.

Научная новизна полученных результатов. К основным новым результатам, полученным в диссертации, относятся:

1. Результаты исследования влияния джиттера частоты дискретизации на точность восстановления ДС, заданных на НВС с точно неизвестными значениями координат ее узлов, с помощью интерполяционных методов.

2. Результаты исследования оптимизационных методов оценивания координат узлов, предложенных J. Browning, свидетельствующие о их неработоспособности в случае, если на интервале анализа сигнала укладывается нецелое число периодов одной или нескольких из его гармоник.

3. Разработанные алгоритмы восстановления ДС, заданных на НВС с неизвестными значениями координат ее узлов (алгоритм №1, основанный на использовании метода статистических испытаний; алгоритм № 2, основанный на учете знака мгновенных значений джиттера; алгоритм № 3, основанный на вычислении значений координат узлов неравномерной сетки с помощью аппроксимации по методу наименьших квадратов (МНК); алгоритм № 4, основанный на применении сглаживающего по МНК нерекурсивного цифрового фильтра; алгоритм № 5, основанный на локальной аппроксимации сигнала по МНК), которые обеспечивают более высокую точность восстановления исследованных модельных сигналов в сравнении с другими известными методами.

4. Результаты исследования особенностей восстановления периодического ДС, регистрируемого на выходе 8-битного высокоскоростного АЦП и системы параллельных 5 битных АЦП.

Теоретическая значимость исследования состоит в разработке алгоритмов восстановления ДС, заданных на НВС с точно неизвестными значениями координат ее узлов, и получении оценок точности восстановления данного типа ДС, получаемой при использовании разработанных алгоритмов.

Практическая значимость работы:

1. Разработана программная реализация MATLAB Non-uniform sampling Toolbox известных методов восстановления неравномерно дискретизированных сигналов, включающая графический интерфейс пользователя.

2. Разработаны программные реализации алгоритмов восстановления ДС, заданных на НВС с неизвестными значениями координат ее узлов.

3. Получены оценки точности разработанных алгоритмов восстановления ДС, заданных на НВС с точно неизвестными значениями координат ее узлов.

4. Получены оценки точности восстановления периодических ДС, регистрируемых на выходе 8-битного высокоскоростного АЦП на основе КМОП-технологии 0.18 мкм и системы 8 параллельных 5 битных АЦП на основе КМОП-технологии 65 нм, с помощью разработанных алгоритмов восстановления ДС, заданных на НВС с неизвестными значениями координат ее узлов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Точность восстановления модельных ДС, заданных на НВС с неопределенными значениями координат узлов, с помощью интерполяционных методов при $\tau_i / T \in]-0.5; 0.5[$ уменьшается не менее чем на 16 дБ в сравнении с аналогичной величиной без джиттера.

2. Точность восстановления ДС, заданных на НВС с неопределенными значениями координат узлов с помощью метода J. Browning оценивания координат узлов в случае, когда на интервале анализа сигнала укладывается нецелое число периодов одной или нескольких из его гармоник, оказывается не менее чем на 4 дБ меньше точности восстановления сигнала по таблице $[iT, x_i]$.

3. Алгоритмы восстановления ДС с неопределенными значениями координат узлов временной сетки и оценки их точностных характеристик.

4. Результаты исследования особенностей восстановления ДС, регистрируемого на выходе высокоскоростных АЦП, свидетельствующие о том, что:

- наименьшую погрешность восстановления периодического ДС, регистрируемого на выходе 8-битного высокоскоростного АЦП на основе КМОП-технологии 0.18 мкм, обеспечивает алгоритм, основанный на применении нерекурсивного цифрового фильтра, реализующий скользящее сглаживание по методу наименьших квадратов (среднее значение отношения мощности сигнала к мощности погрешности восстановления составляет 47.7 ± 0.4 дБ и 51.2 ± 0.3 дБ при равномерном и нормальном законе распределения джиттера соответственно);

- точность восстановления периодического ДС, регистрируемого на выходе системы 8 параллельных 5 битных АЦП на основе КМОП-технологии 65 нм, при малых значениях джиттера ($|\tau_i| / T < 0.06$) определяется шумом квантования сигнала по амплитуде и дифференциальной нелинейностью АЦП, при $|\tau_i| / T \geq 0.06$ – величиной джиттера.

Достоверность полученных результатов подтверждается обоснованным применением методов системного анализа, имитационного моделирования, математической статистики, численного анализа и вычислительной математики, а также согласованностью теоретических результатов с результатами экспериментальных исследований программных реализаций разработанных алгоритмов восстановления.

Внедрение результатов диссертационного исследования. Результаты диссертационного исследования используются в ООО «Институт информационных датчиков и технологий» в системах технического зрения для восстановления значений геометрических параметров измеряемых объектов; в ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина» в учебном курсе «Теория информационных процессов и систем»; в Уральском техническом институте связи и информатики (филиал) ФГОБУ ВПО «СибГУТИ» в учебном курсе «Цифровая обработка сигналов».

Апробация работы. Материалы работы докладывались на следующих научных конференциях: Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы в научной работе и образовательной деятельности»,

Тамбов, 31 января 2013 г.; Международной научно-практической конференции «Общество, наука и инновации», Уфа, 29-30 ноября 2013 г.; 16-ой Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA 2014», Москва, 26 марта – 28 марта 2014 г.; XV Международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронных технологии», Украина, г. Одесса, 26-30 мая 2014 г.; Международной научно-практической конференции «Информационные технологии в мире коммуникаций», Москва, 11-17 мая 2014 г.; Межвузовском научном семинаре «Информационные технологии и когнитивная электросвязь», Екатеринбург, 26 марта 2014; XI Международной IEEE Сибирской конференции по управлению и связи SIBCON-2015, Омск, 21-23 мая 2015 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, среди которых шесть статей в журналах, включенных в перечень ВАК, из них одна статья вышла в переводной версии журнала на английском языке, пять текстов докладов в материалах международных научно-практических конференций. Получено свидетельство о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 167 наименований, пяти приложений, содержит 86 рисунков и 35 таблиц. Основной текст работы составляет 163 страницы, общий объем – 206 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложена общая характеристика диссертационной работы: показана ее актуальность, сформулирована цель работы, отражена научная новизна и практическая ценность.

В **первой главе** рассмотрены постановки задачи восстановления ДС с НЧД, существующие способы их решения, а также предложена их классификация.

На основании предложенной классификации сделан обоснованный вывод о том, что сигналы с неизвестными координатами узлов ВС возникают только при стохастической и рекуррентной неравномерной дискретизации, что позволило в ходе дальнейших исследований ограничиться изучением методов восстановления ДС, регистрируемых при данных типах дискретизации.

Обосновано сходство между постановками Задачи 2 и задачи восстановления функциональной зависимости при наличии ошибок в независимых переменных по активной схеме регрессионного анализа, для решения которой используется локальная аппроксимация эмпирических зависимостей и выдвинута гипотеза о целесообразности данного подхода при разработке методов решения Задачи 2.

Сформулированы основные задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** приведены результаты численных исследований интерполяционных методов восстановления ДС, заданного на НВС с точно неизвестными координатами ее узлов, а также методов, основанных на уточнении значений координат узлов НВС (для этого решается некоторая оптимизационная задача). Для оценки точности восстановления исходного сигнала было

использовано отношение мощности сигнала к мощности ошибки восстановления (Signal-to-Error Ratio – SER):

$$SER = 10 \log \frac{\sum_{m_1=1}^{M_1} s_{m_1}^2}{\sum_{m_1=1}^{M_1} (s_{m_1} - u_{m_1})^2}, \quad (3)$$



Рис. 2 Блок-схема алгоритма оценки точности восстановления ДС

где $s_{m_1} = f(\eta_{m_1})$ – значения исходного сигнала, вычисленные в узлах равномерной сетки (1); u_{m_1} – восстановленный сигнал в узлах равномерной сетки (1).

Принимая во внимание, что τ_i в (2) является случайной величиной, для повышения достоверности оценок точности восстановления сигналов был использован метод Монте-Карло. Блок-схема алгоритма оценки точности восстановления ДС, заданного на временной сетке с неизвестными значениями координат узлов представлена на рис. 2. Данный алгоритм реализуется следующей последовательностью действий: генерация ВС (2) в соответствии с равномерным и нормальным законами распределения случайных величин (ЗРСВ) τ_i , точные значения которых далее считались неизвестными; вычисление в узлах ВС (2) множества значений ДС $x_i = f(t_i)$; восстановление ДС в узлах ВС (1) по таблице значений $[g_i, x_i]$, при использовании интерполяционных методов $g_i = iT, i = \overline{1, N}$; при

использовании методов, предполагающих уточнение координат узлов ВС, $g_i = \tilde{t}_i$, где \tilde{t}_i – вычисленные в соответствии с исследуемым методом значения координат узлов.

Для оценки точности известных методов восстановления ДС в рамках Задачи №2, были использованы модельные ДС, представляющие собой значения функций в узлах соответствующих ВС. (Выбор функций определялся их использованием для анализа реальных ВР, представляющих собой измеренные значения характеристик различных систем, изучаемых, в том числе, в радиотехнике, метеорологии, экономике, экологии, медицине и других науках.) В том числе получены оценки точности восстановления ДС, порожденных следующими функциями:

1) сигнал № 1 (линейный тренд)

$$x_1(t) = 0.1 \cdot t, \quad (4)$$

2) сигнал №2 (полиномиальный тренд)

$$x_2(t) = 3 \cdot t^3 + 2 \cdot t^2 + t + 0.5, \quad (5)$$

3) сигнал № 3 (периодический сигнал)

$$x_3(t) = 2 \sin(2\pi 0.5 f_c t) + 1.2 \cos(2\pi f_c t), \quad (6)$$

4) сигнал № 4 (с линейной частотной модуляцией, ЛЧМ-сигнал)

$$x_4(t) = \cos\left(2\pi\left(f_{\min} t + \frac{h}{2} t^2\right)\right), \quad (7)$$

где f_{\min} – максимальное значение частоты сигнала, f_{\max} – минимальное значение частоты сигнала, T_C – длительность сигнала, $h = (f_{\max} - f_{\min}) / T_C$.

5) сигнал № 5 (амплитудно-модулированный сигнал, АМ-сигнал)

$$x_5(t) = \cos(f_{\text{нес}} t) [1 + M \cos(f_c t)], \quad (8)$$

где f_c – частота информационного сигнала; $f_{\text{нес}}$ – частота несущей; M – коэффициент модуляции.

б) сигнал № 6 (сигнал со скачкообразным изменением частоты, СИЧ-сигнал)

$$x_6(t) = \begin{cases} \sin(2\pi f_1 \cdot t), & 0 \leq t \leq T_C / 2, \\ \sin(2\pi f_2 \cdot t), & T_C / 2 < t \leq T_C, \end{cases} \quad (9)$$

где f_1, f_2 – частоты сигнала; T_C – длительность сигнала.

Необходимость проведения исследований интерполяционных методов восстановления ДС, заданных на НВС с неизвестными значениями координат ее узлов, в соответствии с описанной выше методикой, потребовала разработки соответствующего программного средства – пакета «MATLAB Non-uniform sampling TOOLBOX». На данный программный пакет было получено авторское свидетельство о государственной регистрации программного продукта. В данном пакете реализованы: метод адаптивных весов (Feichtinger, Grochenig, Strohmer); метод Марвасти; метод вытянутых сфероидальных волновых функций; методы интерполяции с помощью ряда Котельникова, полиномов Лагранжа, Ньютона и сплайн-интерполяции.

Основные результаты исследования точности восстановления ДС, заданных на НВС с неизвестными значениями координат ее узлов, с помощью интерполяционных методов приведены в таблице 1. (В данном исследовании использовались модельные сигналы №3-6).

Таблица 1. Результаты исследования точности восстановления ДС интерполяционными методами

Модельный сигнал	Метод, обеспечивающий наибольшую точность восстановления ДС	Среднее значение SER без джиттера, $ \tau_i /T = 0$	Среднее значение SER с джиттером, $ \tau_i /T \in (-0.1, 0.1)$	Среднее значение SER с джиттером, $ \tau_i /T \in (-0.5, 0.5)$
№ 3	адаптивных весов	304.6	43.9±2.9	28.6±2.8
№ 4	сплайн-интерполяции	65.5	31.5±0.6	17.6±0.5
№ 5	сплайн-интерполяции	46.5	37.4±1.4	24.9±1.1
№ 6	сфероидальных функций	35.6	31.3±0.5	18.9±0.8

Из табл. 1 видно, что с увеличением величины размаха джиттера $|\tau_i|/T$ точность восстановления ДС, заданного на НВС с неизвестными точно значениями координат ее узлов, с помощью интерполяционных методов значительно снижается, что определяет необходимость применения иных подходов к решению рассматриваемой задачи.

Далее были проведены исследования методов восстановления ДС, заданного на НВС с точно неизвестными значениями координат ее узлов, предложенные J. Browning, в которых восстановление ДС осуществляется в два этапа. На первом этапе получают оценки значений неизвестных координат узлов ВС, являющиеся решением той или иной оптимизационной задачи. На втором этапе по вычисленным значениям координат производится интерполяция сигнала на равномерную временную сетку. Отметим, что при обосновании данных методов их автор: не привел каких-либо обоснований гипотезы о наличии у выбранной целевой функции глобального минимума, достигаемого при истинных значениях координат узлов ВС; не дал рекомендаций по выбору начального приближения и области поиска решения оптимизационной задачи; не провел исследования точности восстановления ДС на основе оценок значений координат узлов ВС, полученных на первом этапе данного метода.

Отмеченные обстоятельства определили необходимость проведения целенаправленного исследования методов J. Browning, в соответствии с описанной выше методикой. При этом был использован модельный сигнал № 3, а также сигнал, который использовал в своей работе J. Browning (сигнал № 7):

$$\begin{aligned}
 x_7(t_i) = u_i = & 0.25 \cos\left(\frac{2}{3}\pi \hat{f}\left(i + \frac{\tau_i}{T}\right)\right) + 0.265 \cos\left(\frac{10}{9}\pi \hat{f}\left(i + \frac{\tau_i}{T}\right)\right) + \\
 & + 0.26 \cos\left(\frac{4}{3}\pi \hat{f}\left(i + \frac{\tau_i}{T}\right)\right) + 0.25 \cos\left(2\pi \hat{f}\left(i + \frac{\tau_i}{T}\right)\right), \quad (10)
 \end{aligned}$$

где $\hat{f} = f_c \cdot T$ – безразмерная частота дискретизации.

Анализ результатов проведенных исследований позволил сделать следующие выводы:

1. Решение многопараметрической оптимизационной задачи всегда требует больших вычислительных ресурсов, вопреки утверждениям J. Browning о том, что

его оптимизационные алгоритмы могут легко работать с сотнями или даже тысячами отсчетов данных.

2. Методы, предложенные J. Browning, требуют знания такой информации, которая в практических применениях недоступна, например, точных значений координат первого и последнего отсчетов.

3. Глобальный минимум целевой функции, использованной J. Browning, в тех случаях, когда на интервале анализа сигнала, укладывается нецелое число периодов любой из его гармоник, достигается при значениях τ_i , отличных от истинных значений джиттера, поэтому данный метод не обеспечивает повышения точности восстановления сигнала даже в сравнении с тривиальным подходом (восстановление ДС по таблице $[iT, x_i]$).

В **третьей главе** приведено обоснование новых алгоритмов, призванных обеспечить более высокую точность восстановления ДС, заданных на НВС с точно неизвестными значениями координат ее узлов, основанные на использовании следующих подходов:

1. определение тем или иным образом неизвестных значений координат отсчетов неравномерно дискретизированного сигнала и далее интерполяция по вычисленным значениям координат узлов исходной временной сетки на равномерную временную сетку;

2. отнесение значений сигнала x_i к узлам равномерной временной сетки и их корректировка с учетом характеристик джиттера, например, используя сглаживающие нерекурсивные цифровые фильтры (ЦФ) и т.д.

Алгоритм восстановления №1, основанный на использовании метода статистических испытаний, реализуется следующей последовательностью действий:

1. Генерация ансамбля НВС

$$\xi_{i,j} = iT + \delta_{i,j}, \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (11)$$

где δ_i – векторы, координаты которых – случайные числа, выбираемые случайным образом из генеральной совокупности с заданным ЗРСВ; J – число независимых реализаций ансамблей N -мерных векторов.

2. Вычисление в каждом из узлов ВС (1) с помощью тех или иных интерполяционных методов по таблице $[\xi_{i,j}, x_i]$ значений ДС $\tilde{x}_{m,j}$.

3. Вычисление в каждом из узлов восстановленного значения сигнала x_m как среднего по ансамблю независимых реализаций сигнала $\tilde{x}_{m,j}$ значения:

$$x_m = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \tilde{x}_{m,j}, \quad m_1 = \overline{1, M_1}, \quad j = \overline{1, J}. \quad (12)$$

Алгоритм восстановления №2, основанный на учете знака мгновенных значений джиттера, реализуется следующей последовательностью действий:

1. Восстановление с помощью того или иного метода интерполяции значений ДС в узлах временных сеток $(i-0.5)T$ и $(i+0.5)T$, $i = \overline{1, N}$, на основе табличных значений сигнала $[iT, x_i]$, соответственно, $u_i^{(1)}$ и $u_i^{(2)}$.

2. Вычисление разностей $|u_i^{(1)} - x_i|, |u_i^{(2)} - x_i|$.
3. Сравнение друг с другом значений $|u_i^{(1)} - x_i|, |u_i^{(2)} - x_i|$: при выполнении условия $|u_i^{(1)} - x_i| \leq |u_i^{(2)} - x_i|$ принимаем, что τ_i в (2) имеет отрицательный знак, в противном случае τ_i в (2) имеет положительный знак.
4. Генерация в соответствии с заданным законом распределения случайного числа ζ .
5. Сравнение знаков ζ, τ_j . Если знаки $\text{sign}(\zeta) = \text{sign}(\tau_j)$, то $\delta_j = \zeta, j = j + 1$, иначе повторить п. 4.
6. Если $j < N$ повторить пп. 4,5.
7. Восстановление дискретного сигнала u_m в узлах временной сетки (1) на основе табличных значений $[iT + \delta_i, x_i]$.

Алгоритм восстановления № 3, основанный на вычислении значений координат узлов НВС (2) с помощью аппроксимации сигнала по методу наименьших квадратов, реализуется следующей последовательностью действий:

1. Инициализация вектора $v_i = iT, i = \overline{1, N}$.
2. Инициализация счетчика цикла итерационной процедуры алгоритма $l = \overline{1, L}$, (L – число итераций).
3. Создание массива $g_i, i = \overline{1, N}$, в котором далее хранятся уточненные значения координат узлов новой неравномерной временной сетки.
4. Инициализация счетчика вложенного цикла h последовательных сдвигов локальной области с числом точек K , по которым далее строится аппроксимирующий в смысле МНК полином на основе табличных значений $[v_i, x_i], h = \overline{1 + (K - 1)/2, N - (K - 1)/2}$. (Число циклов h равняется $(N - K)$).
5. Задание на интервале $(t_h - T_1 / 2; t_h + T_1 / 2)$ равномерной временной сетки:

$$x_{m_2} = v_h - \frac{T_1}{2} + \frac{m_2 T_1}{M_2}, m_2 = \overline{1, M_2}. \quad (13)$$
6. Вычисление значений аппроксимирующего в соответствии с МНК полинома n -ой степени u_{m_2} , параметры которого вычисляются по K точкам на основе табличных значений $[v_i, x_i], i = \overline{1, N}$, в узлах равномерной ВС x_{m_2} (13).
7. Нахождение значения u_k , удовлетворяющего условию: $\arg \min_{k \in \{m_2\}} |x_h - u_k|$, абсцисса которого принимается за новое значение временной сетки v_i и заносится в массив $g: g_h = x_k$.
8. Повторение пп. 5–7 $(N - K)$ раз.
9. Присвоение значений $v_i = g_i$ – формирование новой ВС v_i , в узлах которой в следующем цикле итерации вычисляются значения u_{m_2} .
10. Повторение пп. 3–9 L раз.

11. Восстановление с помощью того или иного метода интерполяции на основе таблицы $[v_i, x_i]$ значений ДС u_{m_1} в узлах временной сетки η_{m_1} (2).

Алгоритм восстановления №4, основанный на применении сглаживающего по МНК нерекурсивного цифрового фильтра, реализуется следующей последовательностью действий:

1. Выбор размера окна сглаживающего фильтра и степени полинома, аппроксимирующего сигнал.

2. Пропускание сигнала $x(t_i)$ через соответствующий сглаживающий нерекурсивный фильтр – получение ДС $\tilde{x}(t_i)$.

3. Восстановление сигнала по таблице значений $[t, \tilde{x}(t_i)]$ в узлах равномерной сетки (2) одним из классических интерполяционных способов.

Алгоритм восстановления №5, основанный на локальной аппроксимации сигнала по МНК, реализуется следующей последовательностью действий:

1. Выбор размера скользящего окна $K = 2k + 1$, на котором будет строиться аппроксимирующий полином.

2. Инициализация счетчика числа шагов: $h = 1 + (K - 1) / 2$.

3. Построение на локальном интервале, содержащем K точек, полинома, аппроксимирующего сигнал в смысле МНК, по таблице $[t(z), x_i(z)]$, где $z = h - (K - 1) / 2, h - (K - 1) / 2 + 1, \dots, h + (K - 1) / 2$.

4. Вычисление значений аппроксимирующего полинома (восстановленных значений сигнала u_m) в узлах равномерной временной сетки η_{m_1} (2) принадлежащих отрезку $[t(h) - 0.5 \cdot T; t(h) + 0.5 \cdot T]$.

5. Сдвиг скользящего окна – увеличение значения счетчика цикла: $h = h + 1$.

6. Если $h \leq M_0 - (K - 1) / 2$, повторение пп. 3–5.

Из описаний алгоритмов № 1–5, приведенных выше видно, что при использовании данных алгоритмов не требуется решения каких-либо оптимизационных задач, как правило, требующих больших вычислительных затрат, а также наличия априорной информации о точном значении первого и последнего узлов НВС, в отличие от методов, предложенных J. Browning.

Проведен анализ точности восстановления ДС, заданных в узлах НВС, основные результаты которого представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Результаты исследования точности алгоритмов восстановления

Модельный сигнал	Значение SER тривиального алгоритма		Алгоритм, обеспечивающий наибольшую точность восстановления ДС	Значение SER алгоритма	
	равномерный ЗРСВ τ_i	нормальный ЗРСВ τ_i		равномерный ЗРСВ τ_i	нормальный ЗРСВ τ_i
№1	67.2±0.2	76.8±0.2	№ 4, 5	79.0±0.7	88.0±1.4
№2	61.0±0.2	70.6±0.3	№ 4, 5	71.7±0.7	78.7±1.4
№3	16.5±0.6	25.9±0.9	№ 4	20.6±1.2	29.4±0.9
№4	18.2±0.6	26.7±0.7	№ 5	21.7±1.5	29.6±1.0
№5	25.5±0.8	35.2±1.2	№ 3	29.8±1.4	37.4±1.1
№6	17.9±0.6	26.3±0.7	№ 3	22.7±1.0	30.0±1.0

В четвертой главе приведен анализ результатов восстановления ДС, получаемых на выходе реальных цифровых систем, с помощью алгоритмов, описанных в Главе 3.

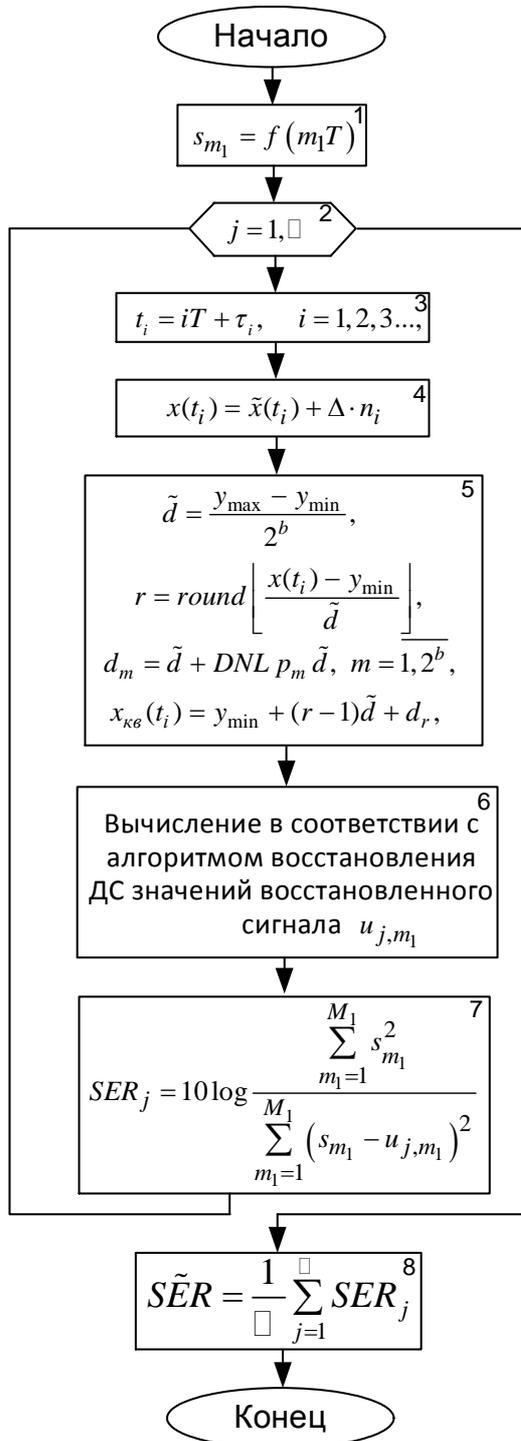


Рис. 3 Блок-схема моделирования оценки точности восстановления ДС

DNL – значение дифференциальной нелинейности, измеряемое в долях младшего значащего разряда АЦП.)

Основные результаты исследования точности восстановления дискретного сигнала, получаемого на выходе одиночного высокоскоростного 8-ми битного

Для этого была использована математическая модель АЦП. В данной модели учитываются: джиттер тактовой частоты задающего генератора (блок № 3, рис. 3); внутренний шум АЦП, присутствующий во всех цифровых системах (блок № 4, рис. 2); ошибки квантования сигнала по амплитуде, а также дифференциальную нелинейность переходной характеристики АЦП (Differential Non Linearity, DNL) (блок № 5).

В качестве тестового сигнала для анализа работы АЦП, следуя стандарту международной ассоциации Института инженеров электротехники и электроники (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE), был использован синусоидальный сигнал:

$$x(t) = \sin(2\pi f_c t). \quad (14)$$

Для повышения достоверности оценок точности восстановления сигналов в соответствии с описанными выше алгоритмами был использован метод статистических испытаний Монте-Карло.

Блок-схема алгоритма проведения исследований точности восстановления ДС, получаемых на выходе высокоскоростных АЦП, представлена на рис. 2. (Здесь: n_i – гауссова случайная последовательность; Δ – среднеквадратическое отклонение теплового шума АЦП; b – разрядность АЦП; $[y_{\min}, y_{\max}]$ – динамический диапазон АЦП; p_m – случайная последовательность, генерируемая в соответствии с равномерным законом распределения на интервале $[-1, 1]$;

аналого-цифрового преобразователя на основе КМОП-технологии 0.18 мкм, приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Значения параметра SER при восстановлении ДС, заданного на временной сетке (1), в соответствии с алгоритмами № 1-5

Алгоритм восстановления	Среднее значение SER, дБ, равномерный ЗРСВ τ_i	Параметры алгоритма, равномерный ЗРСВ τ_i		Среднее значение SER, дБ, нормальный ЗРСВ τ_i	Параметры алгоритма, нормальный ЗРСВ τ_i	
		Степень полинома	Размер окна		Степень полинома	Размер окна
Тривиальный	44.6±0.2	–	–	47.2±0.3	–	–
№ 1	44.6±0.2	–	–	47.2±0.3	–	–
№ 2	44.7±0.2	–	–	47.2±0.3	–	–
№ 3	46.2±0.2	5	7	48.3±0.3	5	7
№ 4	47.7±0.4	11	19	51.2±0.3	11	19
№ 5	45.7±0.2	5	7	49.1±0.2	5	7

Из табл. 3 видно, что алгоритмы № 3–5 имеют значение параметра *SER*, превосходящее точность тривиального алгоритма, и, следовательно, обеспечивают более высокую точность восстановления дискретного сигнала, получаемого на выходе изучаемого аналого-цифрового преобразователя. Из алгоритмов № 3–5 наибольшее среднее значение *SER* имеет алгоритм № 4, которое превышает аналогичную величину тривиального алгоритма на 3.1 дБ и 4 дБ при равномерном и нормальном законах распределения случайной величины τ_i соответственно.

Также проведено исследование точности восстановления дискретного сигнала, получаемого на выходе системы восьми параллельных 5-ти битных аналого-цифровых преобразователей на основе КМОП-технологии 65 нм, в которой из-за неустойчивой синхронизации АЦП дискретный сигнал, регистрируемый на выходе изучаемой системы, оказывается заданным в узлах неравномерной временной сетки

$$t_{i,p} = \delta_p + iP T, \quad \delta_p = p T + \tau_p, \quad i = 0, 1, \dots, \quad p = \overline{1, P}, \quad (15)$$

где

P – число параллельных каналов;

T – период дискретизации;

τ_p – случайная величина (джиттер), $\tau_p \in (-0.5T; 0.5T)$.

Основные результаты исследования точности восстановления ДС для значения безразмерной частоты $f^2 = 0.1$ приведены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что из всех изученных алгоритмов восстановления дискретного сигнала, заданного на неравномерной временной сетке с неизвестными точно координатами ее узлов, наибольшее среднее значение параметра *SER* имеет алгоритм № 4. Среднее значение отношения мощности сигнала к мощности ошибки восстановления *SER* у алгоритма № 4 превышает

соответствующее значение тривиального алгоритма на 5.3 дБ и на 6.0 дБ при равномерном и нормальном законах распределения случайной величины τ_p соответственно.

Таблица 4 – Результаты восстановления ДС, заданного на временной сетке (15), в соответствии с алгоритмами №1-5

Алгоритм восстановления	Среднее значение SER, дБ, равномерный ЗРСВ τ_p	Параметры алгоритма, равномерный ЗРСВ τ_p		Среднее значение SER, дБ, нормальный ЗРСВ τ_p	Параметры алгоритма, нормальный ЗРСВ τ_p	
		Степень полинома	Размер окна		Степень полинома	Размер окна
Тривиальный	33.8±2.5	–	–	33.8±2.4	–	–
№ 1	33.8±2.5	–	–	33.8±2.3	–	–
№ 2	34.2±2.6	–	–	34.2±3.1	–	–
№ 3	35.5±2.8	5	9	35.0±3.5	5	9
№ 4	39.1±3.5	9	19	39.8±4.0	9	19
№ 5	38.0±3.4	5	9	37.8±3.8	5	9

Таким образом, наибольшую точность восстановления дискретного сигнала, получаемого с выхода системы восьми параллельных 5-ти битных аналого-цифровых преобразователей, обеспечивает алгоритм, основанный на применении сглаживающего по методу наименьших квадратов нерекурсивного цифрового фильтра.

Далее были проведены исследования особенностей измерительной системы, состоящей из параллельных 5-ти битных АЦП, основные результаты которых представлены на рис. 4: рис. 4а – зависимости величины SER от безразмерной частоты дискретизации f^2 (здесь и далее номер кривой соответствует номеру алгоритма, № 6 – тривиальному алгоритму; τ_p распределена в соответствии с равномерным законом распределения случайной величины, $|\tau_p|/T = 0.007$); рис. 4б – зависимость шума квантования по амплитуде от безразмерной частоты f^2 ; рис. 4в – зависимость мощности шума квантования по амплитуде (кривая 1) и мощности шума дискретизации по времени, обусловленного джиттером (кривая 2) от величины $|\tau_p|/T$, равномерный закон распределения случайной величины τ_p , $DNL = 0.5$; рис. 4г – зависимость отношения мощности сигнала к мощности ошибки восстановления SER от безразмерной частоты дискретизации f^2 , $|\tau_p|/T = 0.1$.

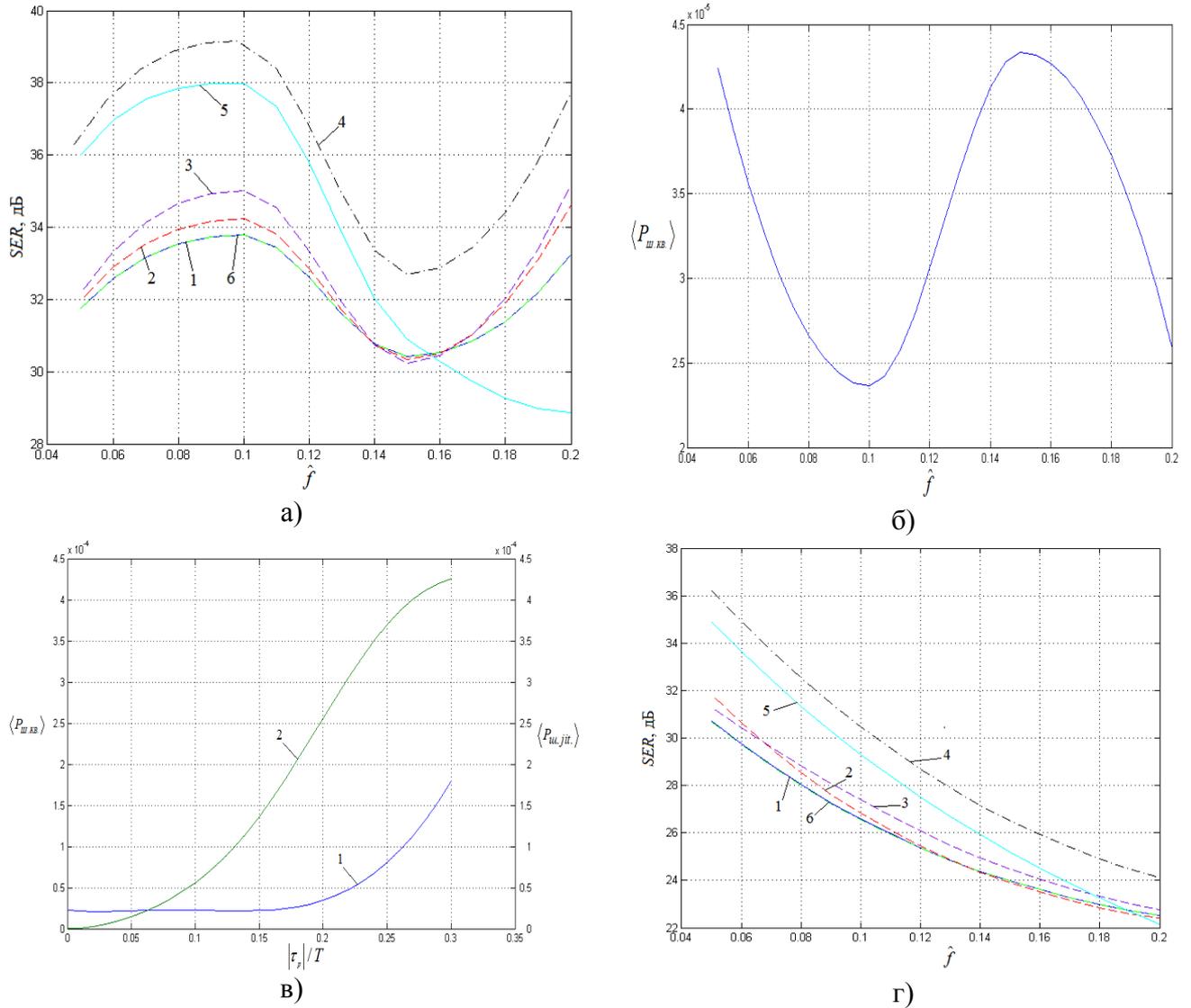


Рис. 4 Результаты исследования системы параллельных 5-ти битных АЦП

Из рис 4а видно, что зависимость SER от безразмерной частоты дискретизации \hat{f} оказывается немонотонной. Данный результат объясняется влиянием на точность восстановления ДС шума квантования сигнала, подаваемого на вход АЦП, по амплитуде, мощность которого также немонотонно зависит от безразмерной частоты дискретизации \hat{f} (рис. 4б). Из рис. 4в видно, что мощности шума квантования по амплитуде (кривая 1) и мощности шума дискретизации по времени являются монотонно возрастающими функциями переменной $|\tau_p|/T$. При $|\tau_p|/T > 0.06$ мощность шума дискретизации по времени $P_{ш.jit.}$ становится больше мощности шума квантования по амплитуде $P_{ш.кв.}$. В этом случае шум дискретизации по времени становится определяющим фактором точности восстановления исследуемого ДС и, соответственно, зависимость SER от безразмерной частоты дискретизации \hat{f} становится монотонной. Таким образом, точность восстановления ДС, получаемого на выходе системы, состоящей из 8 параллельных 5 битных АЦП, при малых значениях джиттера определяется шумом квантования сигнала по амплитуде и дифференциальной нелинейностью

АЦП, при больших значениях – величиной джиттера. Аналогичные результаты получены для случая нормального ЗРСВ τ_p .

В **заключении** изложены основные результаты диссертационного исследования.

Приложения содержат исходные программные коды, реализующие разработанные алгоритмы, а также таблицы, содержащие результаты исследования точности алгоритмов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ интерполяционных методов восстановления ДС, заданных на НВС, а также известных методов восстановления ДС, заданных на НВС с неизвестными точно значениями координат ее узлов, позволивший оценить состояние предметной области.

2. Исследована точность восстановления ДС, заданных на НВС с неизвестными точно значениями координат узлов, с помощью интерполяционных методов и двух этапных методов восстановления ДС, предложенных J. Browning

3. Разработаны алгоритмы восстановления ДС, заданных на НВС с точно неизвестными значениями координат ее узлов, и их программная реализация, а также получены оценки точности восстановления ДС с помощью данных алгоритмов.

4. Проведен анализ точности восстановления ДС, получаемых на выходе реальных цифровых систем, с помощью разработанных алгоритмов восстановления ДС, заданного в узлах НВС.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи опубликованные в журналах из перечня, рекомендованного ВАК

1. Поршнеv С.В. Исследование точности методов восстановления дискретных сигналов, заданных на неравномерной временной сетке / С.В. Поршнеv, Д.В. Кусайкин // В мире научных открытий. – 2013. – Т. 46. – № 10. – С. 261-279.

2. Поршнеv С.В. Методы повышения точности восстановления неравномерно дискретизированных сигналов при неизвестных значениях координат узлов временной сетки / С.В. Поршнеv, Д.В. Кусайкин // Вестник СибГУТИ. – 2014. – №1. – С. 24-34.

3. Поршнеv С.В. Алгоритмы повышения точности восстановления дискретных сигналов, заданных на неравномерной временной сетке с неизвестными значениями координат узлов / С.В. Поршнеv, Д.В. Кусайкин // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2014. – № 6. – С. 17-23.

4. Поршнеv С.В. Исследование методов восстановления неравномерно дискретизированных сигналов с неизвестными координатами узлов временной сетки / С.В. Поршнеv, Д.В. Кусайкин // Электросвязь. – 2015. – №2. – С. 32-37.

5. Поршнеv С.В. О восстановлении неравномерно дискретизированных сигналов с неизвестными значениями координат узлов временной сетки / С.В. Поршнеv, Д.В. Кусайкин // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – №6. – С.3-35.

6. Поршнеv С.В. Оценка точности алгоритмов восстановления дискретных сигналов, заданных на неравномерной временной сетке с точно неизвестными значениями координат узлов / С.В. Поршнеv, Д.В. Кусайкин // Вестник СибГУТИ. – 2015. – №1. – С. 97-108.

Другие публикации

1. Porshnev S.V. Evaluation of accuracy of recovery methods of discrete signals, set in the non-uniform time grid / S.V. Porshnev, D.V. Kusaykin // In the world of scientific discoveries. – 2014. – Vol. 2. – No. 1. – P. 130-140.

2. Кусайкин Д.В. Пакет MATLAB Non-uniform Sampling Toolbox / Д.В. Кусайкин, С.В. Поршнеv // Актуальные вопросы в научной работе и образовательной деятельности: сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. М-во обр. и науки РФ. – Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. – Ч. 2. – С. 91-92.

3. Кусайкин Д.В. Исследование методов восстановления частотно модулированных сигналов, заданных на неравномерной временной сетке / Д.В. Кусайкин // Общество, наука и инновации: сборник статей Международной научно-практической конференции 29-30 ноября 2013 г.: в 4 частях. Ч. 2. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2013. – С. 71-75.

4. Кусайкин Д.В. О возможности повышения точности восстановления дискретного сигнала, заданного на неравномерной временной сетке с неизвестными значениями координат ее узлов / Д.В. Кусайкин, С.В. Поршнеv // 16-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA 2014». – М., 2014. – С. 216-220.

5. Поршнеv С.В. Алгоритмы восстановление неравномерно дискретизированных сигналов с неизвестными координатами отсчетов / С.В. Поршнеv, Д.В. Кусайкин // Современные информационные и электронных технологии: труды XV международной научно-практической конференции. – Украина, Одесса, 2014. – Том 1. – С. 201-202.

6. Кусайкин Д.В. Исследование методов восстановления дискретных сигналов с неравномерной частотой дискретизации в системах телекоммуникаций / Д.В. Кусайкин, Л.С. Каменева, И.О. Крохалева // Информационные технологии в мире коммуникаций: сборник тезисов участников VII Всероссийской научно-практической конференции. – М., 2014. – С. 153-159.

7. Кусайкин Д.В. О восстановлении дискретных сигналов, заданных на неравномерной временной сетке, с неопределенными местоположениями отсчетов / Д.В. Кусайкин // Информационные технологии и когнитивная электросвязь: межвузовский научный семинар. – Екатеринбург: типография УрТИСИ ФГОБУ ВПО «СибГУТИ», 2014. – С. 30-38.

8. Кусайкин Д.В. Исследование методов восстановления сигналов с неравномерной частотой дискретизации / Д.В. Кусайкин, С.В. Поршнеv // Теория,

техника и экономика сетей связи: сборник научно-технических и методических трудов. Под ред. Е.А. Субботина. – Екатеринбург: УрТИСИ ФГОБУ ВПО «СибГУТИ», 2014. – Вып. 12. – С. 218-226.

9. Кусайкин Д.В. Неравномерная дискретизация, ее виды и области применения в телекоммуникационных системах / Д.В. Кусайкин // Теория, техника и экономика сетей связи: сборник научно-технических и методических трудов. Под редакцией Е.А. Субботина. – Екатеринбург: УрТИСИ ФГОБУ ВПО «СибГУТИ», 2013. – Вып. 11. – С. 8-11.

10. Кусайкин Д.В. Классификация видов неравномерной дискретизации / Д.В. Кусайкин, С.В. Поршнев // Теория, техника и экономика сетей связи: сборник научно-технических и методических трудов. Под редакцией Е.А. Субботина. – Екатеринбург: УрТИСИ ФГОБУ ВПО «СибГУТИ», 2013. – Вып. 11. – С. 51-54.

11. Porshnev S.V. Accuracy of discrete-time signal reconstruction registered at 8-bit high-rate ADC output based on 0.18 μ m CMOS technology / S.V. Porshnev, D.V. Kusaykin // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Omsk: Omsk State Technical University. Russia, Omsk, May 21–23, 2015. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR. ISBN: 978-1-4799-7102-2

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1. Поршнев С.В. MATLAB Non-uniform Sampling Toolbox / С.В. Поршнев, Д.В. Кусайкин // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №20136115162 от 29 мая 2013 г.