

ВЕСТНИК 2(6) 2009

МАРИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Научно-технический журнал

Издаётся с ноября 2007 года

Выходит три раза в год

СЕРИЯ «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы»

Учредитель:

ГОУ ВПО «Марийский государственный
технический университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере масс-
совых коммуникаций, связи и охраны
культурного наследия (свидетельство о
регистрации ПИ № ФС77-30177
от 02.11.07)

Полное или частичное воспроизведе-
ние материалов, содержащихся в
настоящем издании, допускается толь-
ко с письменного разрешения редак-
ции.

Адрес редакции:

424006 Йошкар-Ола, ул. Панфилова, 17

Тел. (8362) 68-60-12, 68-78-46

Факс (8362) 41-08-72

e-mail: vestnik@marstu.net

Редактор *Т. А. Рыбалка*

Дизайн обложки *Л. Г. Маланкина*

Компьютерная верстка

А. Ю. Желонкин, Ю. А. Ипатов

Перевод на английский язык

О. В. Филиппчук

Подписано в печать 22.09.09.

Формат 60×84 1/8. Усл. п. л. 9,9.

Тираж 500 экз. Заказ № 63/08.

Марийский государственный
технический университет

424000 Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

Отпечатано с готового оригинал-макета
в ООО «Реклайн»

424007 Йошкар-Ола,
ул. Машиностроителей, 117

Главный редактор **Е. М. Романов**

Главная редакционная коллегия:

Е. М. Романов, д-р с.-х. наук, профессор
(главный редактор)

В. А. Иванов, д-р физ.-мат. наук, профессор
(первый зам. гл. редактора)

А. Д. Арзамасцев, д-р экон. наук, профессор
(зам. гл. редактора)

С. А. Денисов, д-р с.-х. наук, профессор
(зам. гл. редактора)

Н. В. Рябова, д-р физ.-мат. наук, профессор
(зам. гл. редактора)

А. Н. Леухин, д-р физ.-мат. наук, профессор
(отв. секретарь)

Редакционная коллегия серии:

Н. В. Рябова, д-р физ.-мат. наук, профессор
(зам. гл. редактора)

А. П. Аниютин, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва)

В. А. Иванов, д-р физ.-мат. наук, профессор

Д. В. Иванов, д-р физ.-мат. наук, профессор

А. Н. Леухин, д-р физ.-мат. наук, профессор

А. М. Насыров, д-р физ.-мат. наук, профессор (Казань)

И. Я. Орлов, д-р техн. наук, профессор (Нижний Новгород)

В. А. Песошин, д-р техн. наук, профессор (Казань)

А. А. Роженцов, д-р техн. наук, профессор

И. Г. Сидоркина, д-р техн. наук, профессор

Н. М. Скулкин, д-р техн. наук, профессор

Я. А. Фурман, д-р техн. наук, профессор

© Марийский государственный технический университет
Вестник Марийского государственного
технического университета, 2009

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И РАДИОТЕХНИКА

- Р. Р. Бельгибаев, Д. В. Иванов, В. А. Иванов, М. И. Рябова.* Автоматическое обнаружение работы и поддержание синхронизации станций в мировой сети ЛЧМ ионозондов 3
- А. Ю. Чернышев.* Синхронизация многоуровневых кодов линий передачи 13
- И. В. Рябов, П. М. Юрьев.* Системы синтеза частот и сигналов как основные функциональные узлы современных радиоэлектронных средств 22

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

- Р. Г. Хафизов, Я. А. Фурман.* Исследование влияния яркостной информации точек пространственного группового точечного объекта на устойчивость его проволоочной модели 35
- А. А. Рожнецов, А. А. Баяев, А. С. Наумов.* Распознавание и оценка параметров многоградационных пространственных изображений с неупорядоченными отсчетами 43
- Ю. Е. Гарипова.* Предварительная обработка и выделение контуров изображений предстательной железы в сценах рентгеновской томографии 50

ЭЛЕКТРОНИКА

- В. Т. Изиков.* Организация и проектирование функционально ориентированных процессоров, управляемых потоком данных 58
- М. А. Ляпина.* Статистические методы оценки качества технологических процессов изготовления металлокерамических корпусов и плат 68
- Н. В. Белова, Л. А. Стешина, И. О. Танрывердиев.* Способ и алгоритм повышения динамической точности измерения параметров газовой среды 77

НОВИНКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОРЫ. КОНФЕРЕНЦИИ. ВАЖНЫЕ ДАТЫ

- И. Е. Царев.* Участие молодых инноваторов МарГТУ во Всероссийском образовательном форуме «Селигер – 2009» 82
- Информация для авторов* 85

CONTENTS

TELECOMMUNICATION AND RADIO ENGINEERING

- R. R. Belgibaev, D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, M. I. Ryabova.* Automatic detection of work and maintenance of synchronization of stations in the global network of LFM ionosondes 3
- A. Yu. Chernyshev.* Synchronization of multilevel codes of transmission lines 13
- I. V. Ryabov, P. M. Yuryev.* Systems of frequencies and signals synthesis as basic functional units of modern radio-electronic means 22

COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY

- R. G. Khafizov, Ya. A. Furman.* Research of points brightness information influence of a spatial group dot object on the stability of its wire model 35
- A. A. Rozhentsov, A. A. Bayev, A. S. Naumov.* Recognition and estimation of parameters of multi-gradational spatial images with the disorder readout 43
- Yu. Ye. Garipova.* Preliminary processing and allocation of contours of a prostate gland images in the scenes of x-ray tomography 50

ELECTRONICS

- V. T. Izikov.* The organization and designing of functionally focused processors controlled by the stream of data 58
- M. A. Lyapina.* Statistical methods for assessment of the manufacturing quality of ceramic-metal cases and boards technological processes 68
- N. V. Belova, L. A. Steshina, I. O. Tanriverdiev.* Way and algorithm of increasing dynamic accuracy of gas environment parameters measurement 77

THE NOVELTIES IN THE FIELD OF ENGI- NEERING AND TECHNOLOGIES. REVIEWS. CONFERENCES. IMPORTANT DATES

- I. Ye. Tzaryov.* Participation of young innovators of the MarSTU in the All-russia educational forum «Seliger – 2009» 82
- Information for the authors* 85

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.391.83

**Р. Р. Бельгибаев, Д. В. Иванов,
В. А. Иванов, М. И. Рябова**

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ РАБОТЫ И ПОДДЕРЖАНИЕ СИНХРОНИЗАЦИИ СТАНЦИЙ В МИРОВОЙ СЕТИ ЛЧМ ИОНОЗОНДОВ

Представлены созданные алгоритмы обнаружения работающих станций мировой сети ЛЧМ ионозондов, а также методики и алгоритмы, позволяющие обеспечить поддержание синхронизации между ними и новым приемным пунктом. Приводятся ионограммы, полученные с использованием разработанных методик и алгоритмов для приемного пункта в Йошкар-Оле.

Ключевые слова: ионосфера, ионозонд, ЛЧМ сигнал, синхронизация, ионограмма.

Введение. В последнее время в мировой практике для научных исследований ионосферы и распространения радиоволн высокочастотного (ВЧ) диапазона стали использовать панорамные ионозонды со сложными линейно-частотно-модулированными (ЛЧМ) сигналами (ЛЧМ ионозонды) [1,2]. Рост числа пользователей этих ионозондов вызван его малыми габаритами и энергопотреблением, высокой энергетической и структурной скрытностью, возможностью зондирования сверхдальних трасс вплоть до кругосветных, высокой разрешающей способностью и помехозащищенностью по сравнению с традиционными импульсными ионозондами [3].

В России создана экспериментальная сеть ЛЧМ ионозондов при участии МарГТУ (г. Йошкар-Ола) и в большей степени ИСЗФ СО РАН (г. Иркутск). В составе сети функционирует пять передающих станций, расположенных в п. Вяземский (Хабаровский край), в городах Магадан, Норильск, Иркутск, Йошкар-Ола, и пять приемных станций, расположенных в городах Йошкар-Ола, Нижний Новгород, Иркутск, Москва и Ростов-на-Дону.

За пределами нашей страны работает более 100 передающих станций ЛЧМ ионозондов с мощностью 10 и 100 Вт. Однако расписание работы передающих станций этих ионозондов может изменяться.

Для функционирования приемных станций ЛЧМ ионозондов требуется выполнение двух требований:

- согласование частотно-временных параметров сигнала гетеродина радиоприемного устройства (РПУ) с параметрами излучаемого зондирующего сигнала,
- синхронизация гетеродинного и принимаемого ЛЧМ сигналов для того, чтобы анализируемый разностный сигнал попал в полосу пропускания приемника.

Первое требование легко выполняется с применением метода прямого цифрового синтеза зондирующего и гетеродинного сигналов [4]. Для выполнения второго требуется проведение исследований.

Цель работы – разработка алгоритмов автоматического обнаружения работающих ЛЧМ ионозондов, установления и поддержания временной синхронизации между приемной и передающими станциями в сети таких ионозондов.

1. Методика установления синхронизации

Далее будем пользоваться понятием шкал времени (ШВ), которые несут информацию о мгновенном времени на передающей и приемной станциях сети ЛЧМ ионозондов. Они могут отличаться между собой, а также от шкалы единого мирового времени (ЕМВ) как началом отсчета, так и своим масштабом. Поскольку сведение ШВ передающих и приемных станций осуществляется путем согласования их с ШВ ЕМВ, то рассмотрим соответствующую методику, схематично представленную на рис.1.

На рис.1,а показана ШВ ЕМВ со стабильным масштабом T . На рис 1,б показана ШВ передающей станции ЛЧМ ионозонда с масштабом T' , отличающимся от T на некоторую величину, определяемую нестабильностью применяемого опорного генератора станции. На рис.1,г показана ШВ приемной станции ЛЧМ ионозонда с масштабом T'' . Начало отсчета на ШВ передающей и приемной станций ЛЧМ ионозонда имеют временной сдвиг относительно ШВ ЕМВ соответственно Δt_H и Δt_G , обусловленные неточностью установки синхронизации к ЕМВ. Дополнительное рассогласование ШВ передающей и приемной станций ЛЧМ ионозонда вызвано временем распространения τ зондирующего сигнала в ионосферной радиолинии (см. рис. 1,в), которое зависит от протяженности радиотрассы, времени суток, сезона и т.д. [5].

Таким образом, задачу установления синхронизации можно условно разделить на две: первичная – привязка начал отсчета шкал времени (ШВ) передающей и приемной станций к ЕМВ для компенсации задержек Δt_H и Δt_G и вторичная – учет времени распространения зондирующего сигнала τ в ионосфере путем измерения и компенсации в устройстве управления гетеродинным сигналом приемной станции.

Задача поддержания синхронизма станций состоит в компенсации изменения задержек Δt_H , Δt_G и τ , а также коррекции ШВ приемной и передающей станций из-за нестабильностей их масштабов.

Для определения точности установления синхронизации рассмотрим процесс выполнения зондирования ионосферной радиолинии ЛЧМ ионозондом. Предложим, что передающая станция ЛЧМ ионозонда начинает излучать зондирующий ЛЧМ сигнал в момент начала отсчета ШВ – t_H .

Выражение для мгновенной частоты зондирующего сигнала может быть записано следующей формулой:

$$f_H(t) = f_H + \dot{f} \cdot (t - t_H), \quad (1)$$

где f_H – начальная частота ЛЧМ сигнала, $\dot{f}$ – скорость изменения частоты ЛЧМ сигнала.

Приемная станция ЛЧМ ионозонда формирует сигнал гетеродина, когерентный излучаемому сигналу, частота которого изменяется по закону:

$$f_r(t) = f_H + \dot{f} \cdot (t - t_r), \quad (2)$$

где t_r – начало ШВ приемной станции.

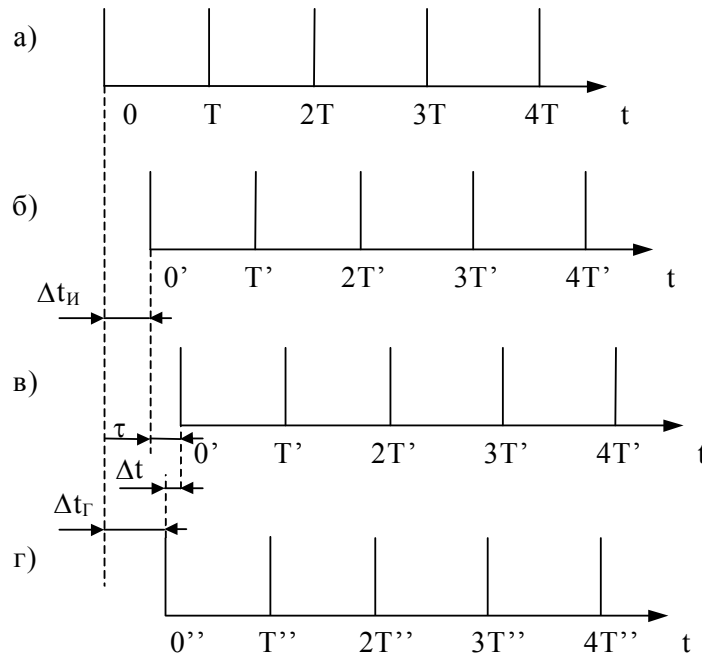


Рис. 1. Временные шкалы: единого мирового времени (а); передающей станции (б); передающей станции, смещенная на время распространения сигнала в ионосфере (в); приемной станции (г)

В РПУ сигнал гетеродина перемножается с принимаемым зондирующим сигналом, задержанным в ионосфере на время τ . В результате перемножения выделяется разностный сигнал частотой:

$$F_P(t) = f_r(t) - f_H(t - \tau) = \dot{f} \cdot (t_H - t_r + \tau) = \dot{f} \cdot \Delta t \quad (3)$$

На рис. 2 показаны частотно-временные зависимости зондирующего $f_H(t)$, гетеродина $f_r(t)$ и разностного $F_P(t)$ сигналов.

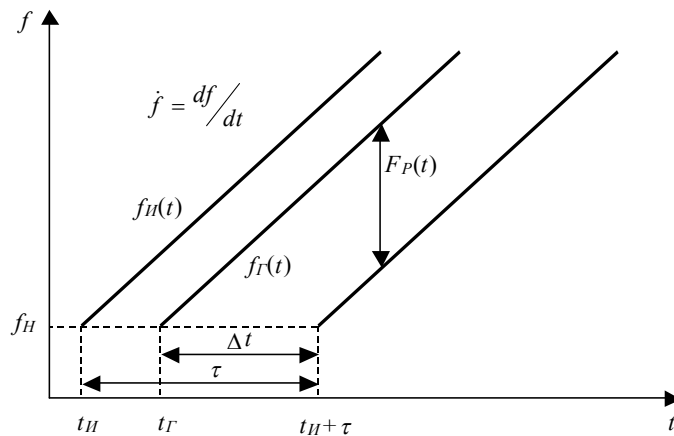


Рис. 2. Частотно-временные характеристики радиосигналов

Как видно из рисунка, разностный сигнал попадает в полосу анализа РПУ ΔF_A , если выполняется условие:

$$\Delta t \cdot \dot{f} < \Delta F_A \quad (4)$$

Например, если $\Delta F_A = 3$ кГц, а $\dot{f} = 100$ кГц/с, то Δt должно быть меньше 30 мс.

2. Установление первичной синхронизации

Решение проблемы установления синхронизации начинается с первоначальной привязки ШВ передающей и приемной станции к единому мировому времени (ЕМВ). ЕМВ является эталонным и его применение предпочтительно в системах синхронизации радиотехнических систем, использующих сложные сигналы, к которым относятся и ЛЧМ ионозонд. Поэтому ШВ передатчиков и приемников ЛЧМ ионозондов, расположенных в различных точках Земли, обычно синхронизируются к ЕМВ. Методы получения мгновенного значения точного времени могут быть различны с различной степенью достоверности. Рассмотрим некоторые из них.

Первый способ получения данных о точном времени – по сигналам станций точного времени (СТВ) ДКМ диапазона. СТВ излучают секундные радиоимпульсы на строго определенных несущих частотах, фронт которых привязан к ЕМВ. Однако сигнал СТВ, распространяясь по ионосферному каналу, поступает на вход приемной и передающей станций ЛЧМ ионозонда с задержкой на некоторое время τ . Приблизленно время распространения сигнала СТВ можно оценить по формуле:

$$\tau = \frac{D}{c}, \quad (5)$$

где D – расстояние между станцией точного времени и станцией ЛЧМ ионозонда, c – скорость света.

Время распространения τ можно уточнить при использовании модели распространения сигнала СТВ в ионосфере, что является отдельной научной задачей для исследования. В общем случае точность привязки к ЕМВ по сигналам СТВ (по ионосферному радиоканалу) составляет единицы миллисекунд.

Другой способ привязки к ЕМВ заключается в использовании спутниковой системы Global Positioning System (GPS). Применяемый в системе GPS принцип состоит в том, что установленные у потребителей специальные приемники измеряют дальности до нескольких спутников и определяют свои координаты по точкам пересечения поверхностей равного удаления. Дальность вычисляется путем умножения скорости распространения радиосигнала на время задержки при прохождении им расстояния от спутника до пользователя. Величина временной задержки определяется сопоставлением кодов сигналов, излучаемых спутником и генерируемых приемным устройством, методом временного сдвига до их совпадения. Временной сдвиг измеряется по часам приемника. Координаты спутников известны с высокой точностью. Точность установления ШВ с использованием системы GPS составляет 100 мкс.

Таким образом, первичная синхронизация ШВ передающих и приемных станций к ЕМВ может быть проведена по радиосигналам станций точного времени или с использованием GPS приемников. Задача процедуры вторичной синхронизации заключается в учете времени распространения зондирующего ЛЧМ сигнала от передатчика до приемника и разработке действий на приемном конце радиолинии, обеспечивающих начало формирования гетеродинного сигнала в момент прихода зондирующего сигнала.

3. Установление вторичной синхронизации

Для решения проблемы автоматизации процедуры синхронизации авторами был разработан эффективный метод с применением периодического ЛЧМ сигнала [6].

Передающая станция ионозонда излучает периодический ЛЧМ сигнал с периодом $T = 1$ с. Момент времени запуска периодического ЛЧМ сигнала равен t_H – начало отсчета на ШВ передающей станции. На приемной станции ионозонда гетеродин РПУ формирует когерентный излучаемому периодический ЛЧМ сигнал, который запускается во время t_T – начало ШВ приемной станции. Частота разностного сигнала на выходе РПУ будет подчиняться выражению (2), при условии, что выполняется неравенство:

$$|t_H - t_T + \tau| = \Delta t < 1c \quad (6)$$

Выполнение неравенства (6) обеспечивается при проведении первичной синхронизации. Далее на приемной станции, последовательно от такта к такту уменьшая Δt на величину $\frac{\Delta F_A}{2 \cdot \dot{f}}$, добиваемся выполнения условия (4).

На рис.3 изображен режим вхождения в синхронизм приемной станции ЛЧМ ионозонда (его сигнал представлен на рисунке пунктирной линией) с принимаемым синхронизирующим сигналом передающей станции (сигнал обозначен сплошной линией).

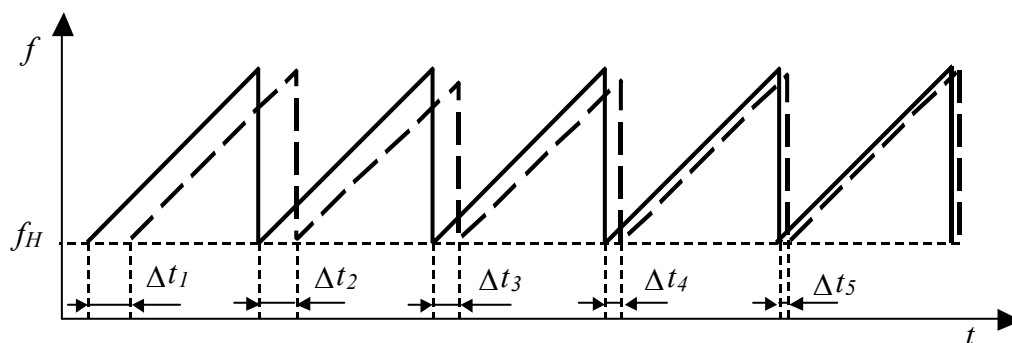


Рис. 3. Процесс вхождения приемной станции в синхронизм

Максимальное время, которое необходимо на режим синхронизации, составляет не более 1 минуты при $\frac{\Delta F_A}{\dot{f}} = 50$ мс.

4. Поддержание синхронизма

Нами также разработан метод автоматического поддержания синхронизма при длительных экспериментах, обеспечивающий высокую эффективность при небольшом, порядка нескольких миллисекунд, временном рассогласовании ШВ. При больших значениях рассогласования необходимо использовать методы установления синхронизации. Идея метода поддержания синхронизма для длительных экспериментов состоит в том, что отслеживаются временные нестабильности опорных генераторов ионозонда, условия распространения сигнала в ионосфере и автоматически корректируется время запуска гетеродинного сигнала. Статистический учет нестабильностей ионосферы позволяет моделировать процессы, возникающие в ней, и прогнозировать дальнейшее их развитие.

На рис. 4 изображена блок-схема алгоритма поддержания синхронизма. После проведения сеанса зондирования и формирования ионограммы алгоритм поддержания синхронизма начинает свою работу. Для автоматизации процедуры необходимо выделять первую приходящую моду сигнала. С этой целью был разработан метод обработки данных [7]. Алгоритм обработки включает в себя метод детекции и удаления шумовых спектров, пороговый метод с адаптацией к уровню шума в спектре, метод сглаживания с перекрытием прямоугольным окном, метод удаления мелких объектов. При этом набор, последовательность применяемых алгоритмов и их параметры подбираются исходя из особенностей данной радиолинии.

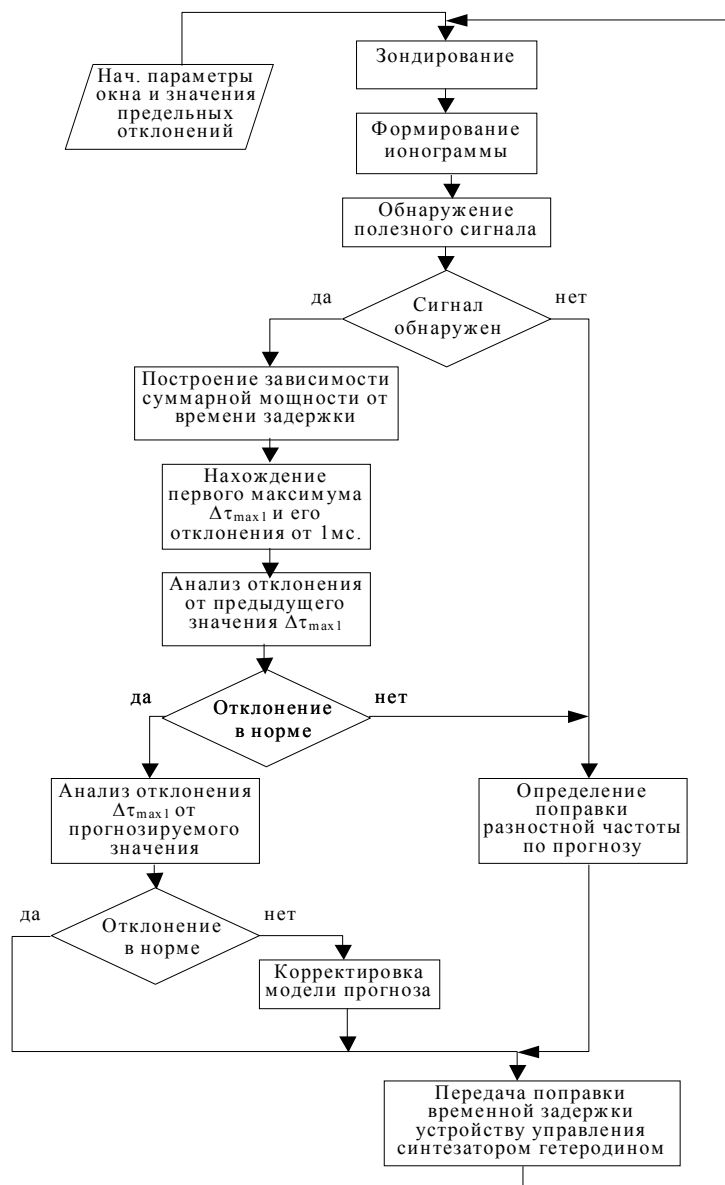


Рис.4. Алгоритм поддержания синхронизма

На основе ионограммы (см. рис. 5,б), строится зависимость суммарной мощности сигнала от времени группового запаздывания на радиолинии [8]. Для этого в каждом спектре ионограммы (один спектр соответствует частотному диапазону 0,1 МГц) фикс-

сируется локальный максимум амплитуды. Далее отобранные пики с тремя соседними значениями используются для построения гистограммы значений амплитуд, усредненных по частоте в диапазоне 1 МГц (или другом, в зависимости от входных данных программы). Построенные гистограммы отображаются на экране в нормализованном по глобальному максимуму виде. Так же строится интегральная (усреднение производится по всему частотному диапазону) гистограмма, отображаемая справа на поле ионограммы. Пример построенной гистограммы, усредненной по частотному диапазону в 2 МГц, приводится на рис 5,в.

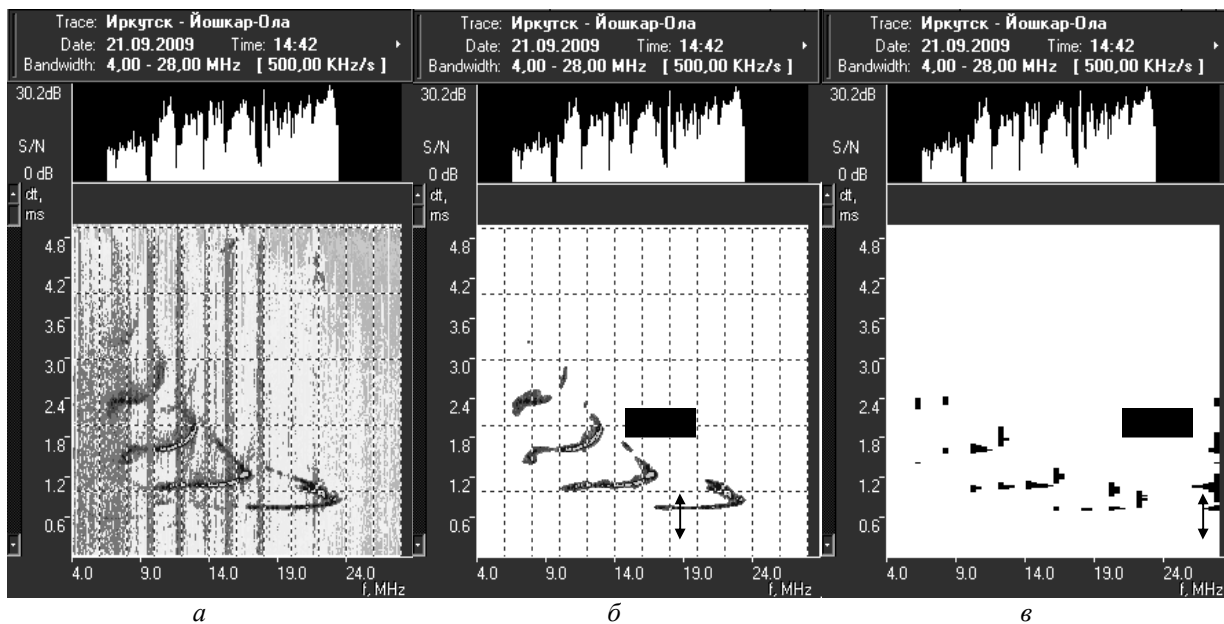


Рис.5. Ионограмма и методика ее обработки

На поле интегральной гистограммы выбирается первый максимум мощности. Далее его аппликате присваивается значение, равное 1 мс. Затем вычисляется разность значений задержки для нового и предыдущего положения максимума, которая вносится в устройство управления синтезатором гетеродинного сигнала. По результатам нестабильности времени распространения сигнала в ионосфере строится прогноз изменения разности задержки τ , выводится на информационную панель ионозонда для регистрации.

1. Обнаружение передающих станций ЛЧМ ионозондов

Нами разработан метод, позволяющий обнаруживать работающие передающие станции ЛЧМ ионозондов и входить в синхронизм с ними. Идея метода заключается в следующем.

Передающая станция работает в режиме зондирования, излучая непрерывный ЛЧМ сигнал со скоростью изменения частоты $\dot{f}$ с начальной частоты f_H с момента времени t_H (см. выражение (1)). Зондирование производится, как правило, несколько раз в час.

Приемная станция формирует гетеродинный периодический ЛЧМ сигнал с периодом 1 с и начальной частотой f_C большей f_H (см. рис.6) в течение 1 часа. В определенный момент времени t_C мгновенные частоты зондирующего и гетеродинного сигнала будут различаться на величину $F_p(t_C) = \Delta t \cdot \dot{f}$ при $\Delta t < 1$ с в течение одного периода

гетеродинного сигнала. Обнаружение передающих станций происходит по появлению на выходе РПУ однотонального сигнала частотой F_p в течение 1 с при условии, что разностный сигнал попадает в полосу РПУ. Для обнаружения передающих станций, разностный сигнал от которых не попал в полосу РПУ, каждый час время запуска гетеродинного сигнала t_r изменяется на величину $\frac{\Delta F_A}{2 \cdot \dot{f}}$.

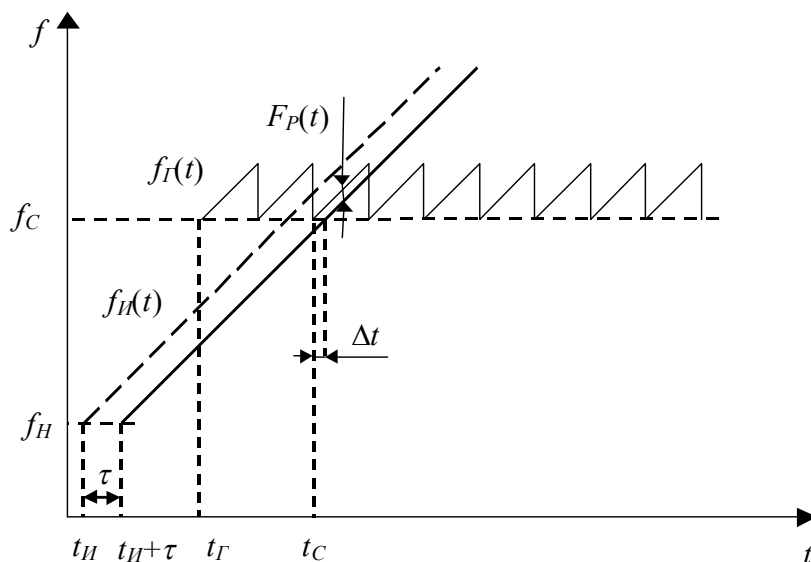


Рис.6. Частотно-временная характеристика сигнала гетеродина приемной станции в режиме обнаружения

Момент времени t_C и значение Δt для соответствующих значений t_H , t_r , τ , f_H , f_C , $\dot{f}$ могут быть найдены на основе следующих формул:

$$t_C = \text{int}(t' - t_r) + t_r, \quad (7)$$

$$\Delta t = t_C - t', \quad (8)$$

где $t' = \frac{f_C - f_H}{\dot{f}} + t_H + \tau$, $\text{int}(x)$ – операция округления числа x .

Далее, зная время появления разностного сигнала в полосе РПУ и скорость изменения частоты обнаруженных передающих станций, можно вычислить начальную частоту зондирования и время начала режима зондирования этих станций. При одновременном наблюдении обнаруженной передающей станции тремя разнесенными приемными станциями можно по разности задержек распространения зондирующего сигнала вычислить ее местоположение. Определив таким образом расписание работы обнаруженной передающей станции ЛЧМ ионозонда, включаем ее в общее расписание работы ЛЧМ ионозондов имеющейся сети и проводим исследования на новой радиолинии.

Таким образом, была обнаружена работа около десяти передающих станций ЛЧМ ионозондов, расположенных в Западной Европе.

Интеграция в Европейскую сеть ионозондов расширила возможности созданной нами Российской сети ЛЧМ ионозондов за счет диагностики радиолиний в новом регионе Земного шара.

Ионограммы, полученные путем приема зондирующих сигналов ряда передающих станций, приведены на рис. 7.

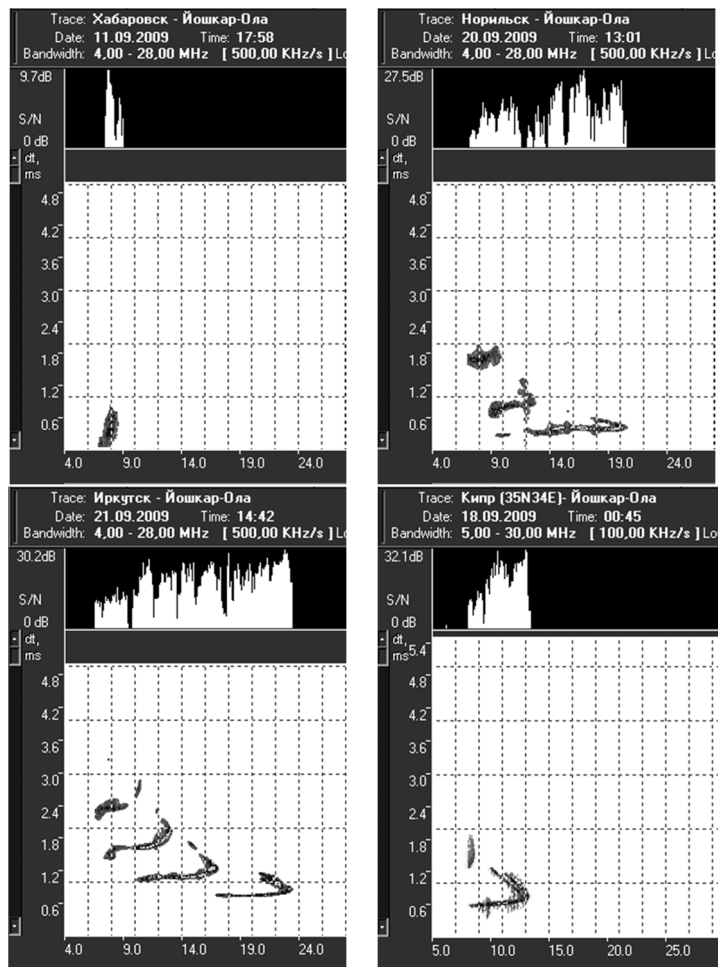


Рис. 7. Примеры полученных ионограмм

Выводы

1. Разработаны методики и алгоритмы автоматизированного вхождения в синхронизм станций наклонного зондирования ионосферы.
2. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение автоматического поддержания синхронизма.
3. Разработана методика обнаружения передающих станций сети ЛЧМ ионозондов и установления синхронизма с ними.

Список литературы

1. Иванов, В. А. ЛЧМ ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях/ В. А. Иванов, В. И. Куркин, В. Е. Носов и др. // Изв. вузов. Радиофизика. – 2003. – Т.47. – №11. – С. 919-952.
2. Barry, H.G. A low –power vertical-incidence ionosonde / H. G. Barry // IEEE Transactions on Geoscience Electronics. – 1971. – P.86-89.
3. Иванов, В. А. Особенности распространения коротковолновых ЛЧМ сигналов в регулярной ионосфере / В. А. Иванов – Йошкар-Ола: Марийский политехнический институт. Деп. В ВИНТИ, № 3064-85, 1985. – 41с.
4. Иванов, Д. В. Методы и математические модели исследования распространения в ионосфере сложных декаметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений: Монография / Д. В. Иванов. – Йошкар-Ола, Марийский государственный технический университет, 2006. – 268 с.
5. Иванов, Д. В. Диагностика широкополосных ионосферных радиоканалов сигналами с линейной частотной модуляцией / Д. В. Иванов // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы». – Йошкар-Ола, 2007. – №1. – С. 41-53.

6. Рябова, Н. В. Диагностика и имитационное моделирование помехоустойчивых декаметровых радиоканалов: монография / Н. В. Рябова. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2003. – 292 с.

7. Батухтин, В. И. Методы цифровой обработки сигналов радиолокационного зондирования ионосферы / В. И. Батухтин, А. Б. Егошин, В. А. Иванов и др. // V Международная н.-т. конференция «Радиолокация, навигация и связь» (RLNCC 99). – Воронеж, Россия, 1999. – Т.2. – С.1025-1036.

8. Измерение памяти канала по данным наклонного ЛЧМ зондирования ионосферы / В. А. Иванов, А. Б. Егошин, Н. В. Рябова // Тр. науч. конф. по итогам н.-и. работ Мар. гос. техн. ун-та. Секц. радиофизики, техники, локации и связи. – Йошкар-Ола, 24-28 апреля. 2000 / Мар. гос. техн. ун-т. – Йошкар-Ола, 2000. – С. 34 - 45: илл. - Библиогр.: 3 назв.- Рус.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 08-02-12081, 09-07-00331), АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (2009-2010), проект №2.1.3896 и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009-2013), проект П 1740.

Статья поступила в редакцию 10.09.09.

*R. R. Bel'gybayev, D. V. Ivanov,
V. A. Ivanov, M. I. Ryabova*

AUTOMATIC DETECTION OF WORK AND MAINTENANCE OF SYNCHRONIZATION OF STATIONS IN THE GLOBAL NETWORK OF LFM IONOSONDES

The created algorithms for detection of working stations of global network of LFM ionosondes are submitted, as well as techniques and algorithms allowing to provide maintenance of synchronization between them and a new place of acceptance. Ionograms obtained implementing the techniques developed and algorithms for place of acceptance in Yoshkar Ola are presented.

Key words: *ionosphere, ionosonde, LFM signal, synchronization, ionogram.*

ИВАНОВ Владимир Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной работе и инновационной деятельности МарГТУ, заслуженный деятель науки, академик Международной академии технологической кибернетики и Нью-Йоркской АН. Область научных интересов – распространение в ионосфере широкополосных радиосигналов, разработка новых принципов диагностики ионосферы и ионосферных каналов КВ-связи. Автор более 250 публикаций. E-mail: vai@marstu.net.

ИВАНОВ Дмитрий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики МарГТУ. Область научных интересов – моделирование технических систем, сигналы с расширенным спектром, распространение декаметровых радиоволн. Автор более 90 публикаций. E-mail: dvi@marstu.net.

РЯБОВА Мария Игоревна – студентка МарГТУ. Область научных интересов – ионосферное распространение декаметровых радиоволн и инфотелекоммуникационные системы. Автор более 30 публикаций. E-mail: vai@marstu.net.

БЕЛЬГИБАЕВ Руслан Рашидович – аспирант кафедры высшей математики МарГТУ. Область научных интересов – синтез широкополосных радиосигналов, распространение в ионосфере широкополосных радиосигналов. Автор 4 публикаций. E-mail: kvm@marstu.net.

УДК 621.396.2

А. Ю. Чернышев

СИНХРОНИЗАЦИЯ МНОГОУРОВНЕВЫХ КОДОВ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

Предложены и исследованы многоуровневые коды для проводных и кабельных линий связи, одновременно обеспечивающих возможность самосинхронизации системы и обладающих узким эффективным спектром. В четверичном коде самосинхронизация обеспечивается за счет возврата уровня сигнала к нулю на каждом втором интервале. В относительных троичных кодах использована избыточность, позволяющая избежать постоянства уровня в течение нескольких тактовых интервалов подряд.

Ключевые слова: код линии, тактовая синхронизация, тактовая частота, самосинхронизирующийся код, троичный/четверичный код, относительный код, линейный модем.

Введение. В цифровых системах передачи на основе проводных и кабельных линий роль несущего колебания выполняют так называемые коды линий (линейные коды) [1]. По сути они представляют собой сигналы специальной формы, параметры которых согласованы с характеристиками соответствующей линии электрической связи. Для всех без исключения кодов обязательным является требование однозначности прямого и обратного преобразований. Кроме того, в зависимости от вида линии и особенностей системы передачи к кодам линий могут предъявляться специфические требования [2], например:

1. Линейный код должен обеспечивать выделение или восстановление тактовой частоты из принятого сигнала (возможность самосинхронизации).
2. Спектр сигнала должен быть сосредоточен в узкой полосе частот.
3. В спектре сигнала должна отсутствовать постоянная составляющая.

Первое и второе требования в принципе не являются обязательными, тем не менее их выполнение дает существенные преимущества. Третье требование существенно лишь в системах с дистанционным питанием по общей физической линии.

Как правило, коды линий формируются таким образом, чтобы гарантированно обеспечить выполнение одного из перечисленных выше требований. В то же время на практике нередко требуется одновременное выполнение двух, а то и трех требований. Наиболее сложным является сочетание возможности самосинхронизации с узкой шириной спектра.

Цель работы – найти виды сигналов, которые гарантированно обеспечивают выполнение названных параметров.

Четверичный код с возвратом к нулю. Вообще, выделение или восстановление тактовой частоты из линейного сигнала гарантировано, если в спектре сигнала имеется составляющая на частоте тактовой синхронизации или если на каждом тактовом интервале происходит изменение уровня линейного сигнала [3].

С точки зрения восстановления тактовой частоты наиболее эффективным является биполярный код с возвратом к нулю RZ-2, представленный на рис. 1. Видно, что для восстановления последовательности тактовых импульсов (рис. 1, д) достаточно разделить принятый сигнал (рис. 1, а) на две составляющие с положительными (рис. 1, б) и отрицательными импульсами (рис. 1, в), а затем сложить первую с инвертированной копией второй (рис. 1, г). Однако существенным недостатком кода RZ-2 является расширение спектра сигнала вдвое вследствие соответствующего сокращения длительности значащих сигнальных импульсов.

С другой стороны, сжатие спектра характерно для многоуровневых линейных кодов. Например, популярный код 2B1Q, представленный на рис. 2, обеспечивает сжатие спектра сигнала в линии вдвое [3]. В этом коде используются четыре значащих уровня напряжения, определяемых одновременно двумя последовательными битами цифрового сигнала. Но, как видно даже из рис. 2, этот код в отличие от кода RZ-2 не содержит никаких встроенных механизмов восстановления тактовой частоты. При передаче продолжительных однородных последовательностей «...111111...», «...000000...» или «...01010101...» в линейном сигнале как минимум на протяжении шести тактовых интервалов изменения будут отсутствовать.

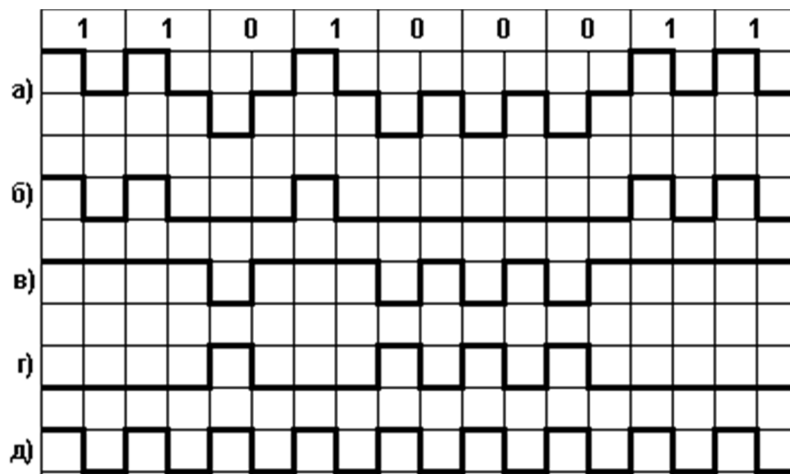


Рис. 1. Линейный код RZ-2

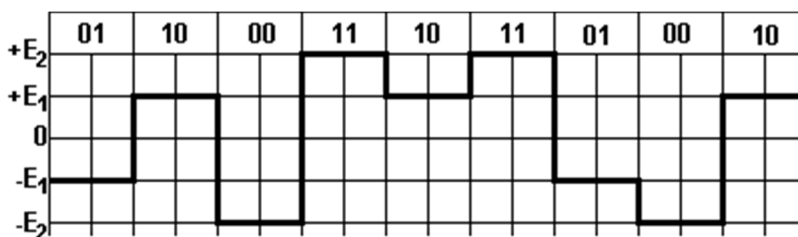


Рис. 2. Линейный код 2B1Q (один из вариантов)

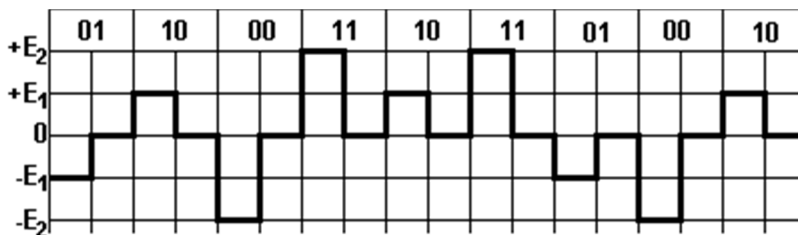


Рис. 3. Синтетический код (RZ-2B1Q)

Выполнить оба предъявляемых требования можно при помощи синтетического кода, показанного на рис. 3. От кода 2B1Q в нем сохранено наличие четырех значащих уровней, а следовательно, и сжатие спектра линейного сигнала вдвое. От кода RZ-2 заимствован возврат мгновенных значений напряжения к нулевому уровню, вследствие чего длительность значащего импульса сокращается вдвое и вдвое расширяется спектр сигнала. В результате расширение спектра, характерное для кода RZ-2, и его сжатие, характерное для 2B1Q, взаимно компенсируются, и результирующий коэффициент сжатия спектра равен 1.

Модем четверичного кода с возвратом к нулю. Структура модулятора (линейного кодера), позволяющего сформировать линейный сигнал в коде RZ-2B1Q, представлена на рис. 4 и помимо формирователя сигнала 2B1Q (ФС-2B1Q) содержит перемножитель П, на второй вход которого поступает стробирующая последовательность с выхода делителя частоты ДЧ. Необходимость деления в два раза частоты следования тактовых импульсов, вырабатываемых генератором ГТИ, видна из рис. 3 и 5 (буквенные обозначения соответствуют контрольным точкам на рис. 4).

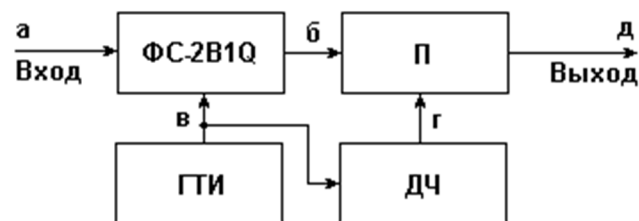


Рис. 4. Структура модулятора (линейного кодера) RZ-2B1Q

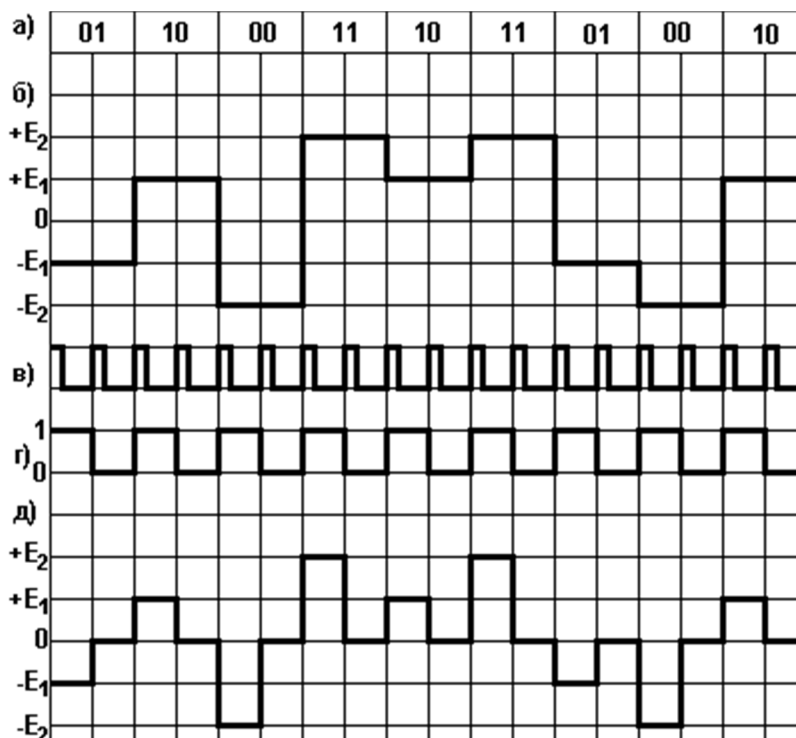


Рис. 5. Алгоритм формирования кода RZ-2B1Q:
а – входной цифровой поток; б – сигнал в коде 2B1Q;
в – последовательность тактовых импульсов;
г – последовательность стробирующих импульсов;
д – выходной сигнал в коде RZ-2B1Q.

Особый интерес представляет схема восстановления тактовой частоты из кода RZ-2B1Q, показанная на рис. 6. Как видно из рис. 7 (буквенные обозначения соответствуют контрольным точкам на рис. 6), вначале линейный биполярный сигнал (рис. 7, а) разделяется на два униполярных сигнала с импульсами положительной (рис. 7, б) и отрицательной (рис. 7, в) полярности. Следует отметить, что один из сигналов при этом дополнительно инвертируется. При помощи ограничителей уровня трехуровневые последовательности преобразуются в двухуровневые (рис. 7, г, д). Логическая сумма этих последовательностей (рис. 7, е) фактически представляет собой последовательность тактовых импульсов, но с вдвое меньшей частотой. Следует также отметить, что на практике компараторы и ограничители уровней можно выполнить в виде единого функционального узла.

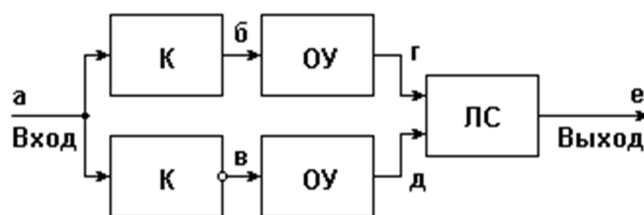


Рис. 6. Структура схемы выделения тактовой частоты из кода RZ-2B1Q (К – компараторы; ОУ – ограничители уровня; ЛС – логический сумматор)

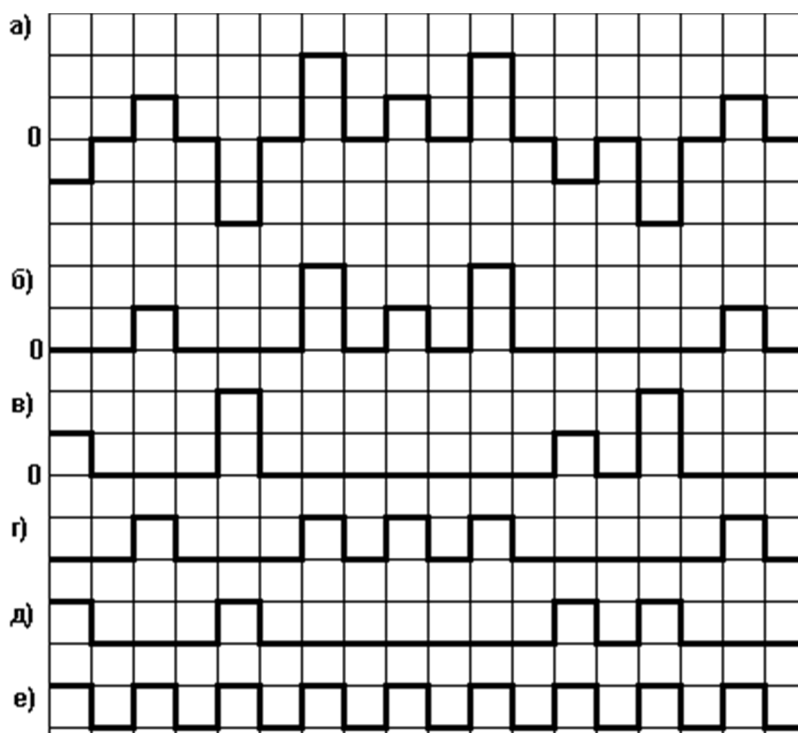


Рис. 7. Алгоритм выделения тактовой частоты из кода RZ-2B1Q

а – входной сигнал в коде RZ-2B1Q;
 б, в – трехуровневые униполярные последовательности;
 г, д – двухуровневые униполярные последовательности;
 е – последовательность тактовых импульсов

Истинную последовательность тактовых импульсов, синхронизированных по частоте со скоростью передачи цифрового сообщения (рис. 5, в), можно получить из сигнала, показанного на рис. 7, е, при помощи схемы, представленной на рис. 8. При помощи элемента 2И на основе входной последовательности и ее инвертированной копии, задержанной в инверторе на время его переключения, формируются короткие импульсы по передним фронтам входных импульсов. Аналогичные короткие импульсы по задним фронтам импульсов формируются при помощи элемента 2ИЛИ-НЕ. Парциальные последовательности коротких импульсов объединяются в единую последовательность тактовых импульсов при помощи выходного элемента 2ИЛИ.

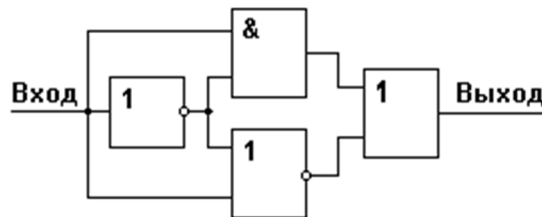


Рис. 8. Схема восстановления тактовых импульсов

Относительный троичный код. Наряду с кодом 2B1Q в проводных и кабельных системах широко применяются троичные сигналы 3B2T и 4B3T, передаваемые тремя уровнями напряжения (условно +1, 0 и -1) и представленные на рис. 9. Достоинствами многоуровневых кодов являются сужение эффективной ширины спектра линейного сигнала и вследствие этого снижение требований к полосе пропускания, а также уменьшение влияния затухания и шума [1]. В частности, код 3B2T обеспечивает сужение полосы в полтора, а код 4B3T – в 4/3 раза. Однако существенным недостатком этих кодов является отсутствие встроенных механизмов восстановления тактовой частоты или самосинхронизации.

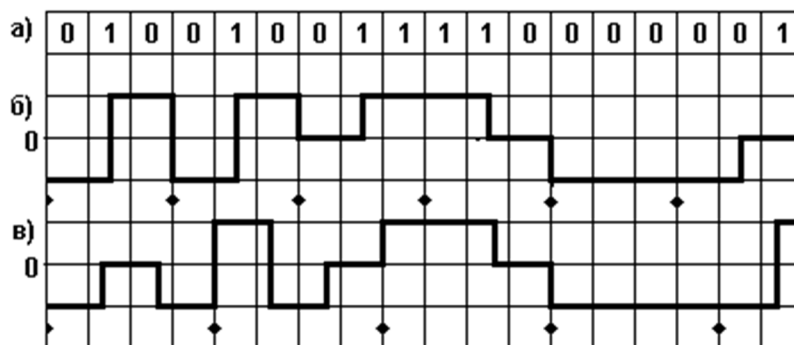


Рис. 9. Многоуровневые линейные коды:

а – исходный бинарный (цифровой) сигнал; б – сигнал в коде 3B2T;
в – сигнал в коде 4B3T (символами ♦ отмечены границы формирования групп 3B и 4B)

Код 3B2T представляет каждый набор из трех битов (3В) с восемью возможными комбинациями нулей и единиц в виде пары троичных величин (2Т), позволяющей составить $3^2=9$ комбинаций. Коэффициент сжатия спектра у такого сигнала равен $3/2$. Код обладает одним избыточным троичным состоянием. Как правило, на практике не используется троичная пара 00, обладающая минимальной энергией. Именно такой подход учтен при составлении табл. 1 и построении рис. 9, б. Наличие нулевого уровня не позволяет использовать возврат к нулю в качестве механизма обеспечения самосинхронизации.

Т а б л и ц а 1

Таблица истинности кода 3В2Т

Цифровой сигнал	Элементы кода 3В2Т	
	1	2
000	-1	-1
001	-1	0
010	-1	+1
011	0	+1
100	0	-1
101	+1	-1
110	+1	0
111	+1	+1

Код 4В3Т представляет каждую группу из четырех битов (4В) с шестнадцатью возможными комбинациями в виде группы из трех троичных величин (3Т), допускающей 27 комбинаций. Коэффициент сжатия спектра равен $4/3$, а коэффициент избыточности – $27/16$. На практике отображение 4В3Т сокращают до двух отображений 3В2Т: первый из четырех бит определяет значение первой троичной величины (+1 или -1), а оставшиеся в группе 4В три бита отображаются в соответствии с кодом 3В2Т. Пример сокращенного кода 4В3Т приведен на рис. 9, в.

Из рис. 9 и табл. 1 видно, что вероятность срыва синхронизации в точке приема или промежуточной регенерации (ретрансляции) существенно возрастает при передаче продолжительных однородных последовательностей, в первую очередь одиночных и нулевых. Такие последовательности образуют сигнал с постоянным уровнем на протяжении более чем одного цикла. Можно считать, что вероятность срыва становится достаточно высокой при длине однородной последовательности, равной или большей некоторой критической. Устранить указанный недостаток позволяет имеющаяся в многоуровневых кодах избыточность. Благодаря ей можно от абсолютного кода перейти к относительному и обеспечить переход к другому уровню на очередном троичном цикле. При этом алгоритм относительного кодирования не должен допускать повторение текущего состояния в следующем цикле.

Относительный линейный код на базе кода 3В2Т. В коде 3В2Т имеется лишь один избыточный троичный набор, поэтому исключение какого-либо из троичных наборов, в том числе комбинации 00, невозможно. Алгоритм относительного линейного кодирования в общем случае имеет вид

$$A^+ = (A^- + C + D) \bmod 9, \quad (1)$$

где A^+ и A^- – соответственно, значения троичных наборов 2Т в текущем и предыдущем циклах, выраженные в девятиричном формате и определяемые в соответствии с табл. 2; C – значение входного 3В сигнала, выраженное в восьмеричном формате и определяемое в соответствии с табл. 3; D – параметр относительного сдвига. Обратное преобразование определяется выражением

$$C = (A^+ - A^- + D) \bmod 9. \quad (2)$$

С учетом возможных значений величины A и невозможности многократного повторения сигналов 2Т значение D может лежать в пределах от 1 до 8, т.е. $0 < D < 9$. Следует отметить, что в выражениях (1) и (2) величина D может быть контекстно зависимой и

определяться текущим значением параметра A , т.е. A^+ . Однако это может привести к усложнению процедур кодирования и декодирования.

Критическая длина относительного кода 3В2Т составляет 4 троичных элемента, например, троичная последовательность $\dots(-1; 0)(0; 0)(0; -1)\dots$ возникает при передаче пары двоичных комбинаций (010)(000). Проведенный анализ показал, что дальнейшее снижение критической длины кода невозможно.

Т а б л и ц а 2

Сигнал 2Т в девятиричном формате

Код 2Т	-1; -1	-1; 0	-1; +1	0; -1	0; 0	0; +1	+1; -1	+1; 0	+1; +1
A	0	1	2	3	4	5	6	7	8

Т а б л и ц а 3

Сигнал 3В в восьмеричном формате

Код 3В	000	001	010	011	100	101	110	111
C	0	1	2	3	4	5	6	7

Следует отметить, что длительность отдельных троичных элементов сигнала 3В2Т остается неизменной, следовательно, коэффициент сжатия спектра также остается неизменным и равным $3/2$.

Относительный линейный код на базе кода 4В3Т. Код 4В3Т обладает большей избыточностью (27 троичных наборов на 16 двоичных комбинаций). Это дает возможность полностью исключить из использования три однородных 3Т-набора (-1; -1; -1), (0; 0; 0) и (+1; +1; +1) при сохранении избыточности как таковой (коэффициент избыточности снижается точно до 3). Среди оставшихся 3Т-групп двенадцать, т.е. ровно половина, содержат по два одинаковых элемента либо в начале, либо в конце набора. Их исключение ведет к потере избыточности (12 3Т-наборов недостаточно для передачи 16 4В-символов). Однако за счет принципа относительного кодирования максимальное количество следующих друг за другом одинаковых троичных символов можно уменьшить до двух. В этом случае процедуры кодирования и декодирования описываются соответственно выражениями

$$A = (C + D) \bmod 24; \quad (3)$$

$$C = 24B + A - D, \quad (4)$$

где A – десятичный эквивалент троичного кода в конечном числовом поле $G(24)$, определяемый в соответствии с табл. 4; C – десятичный эквивалент исходного цифрового сигнала в поле $G(16)$, определяемый в соответствии с табл. 5; D – параметр смещения, определяемый по табл. 6 в зависимости от значения последнего элемента троичного кода; $B=0$, если $A \geq 8$, и $B=1$, если $A < 8$.

Результаты применения относительных кодов 3В2Т (при $D=1$) и 4В3Т (по табл. 4, 5 и 6) представлены на рис. 10. В табл. 4 и 6 символом N обозначен уровень -1, символом Z – нулевой уровень (0), символом P – уровень +1. Для обоих сигналов в качестве исходного состояния использовано состояние «все нули», которое ассоциировано с нулевым состоянием (NN и NNZ соответственно для кодов 3В2Т и 4В3Т). В сигнале 3В2Т (рис. 10, б) замечен критический участок уровня «-1» длиной 4 троичных элемента,

предсказанный выше. В сигнале 4ВЗТ (рис. 10, в) длина критических участков не превышает длительность двух троичных элементов, и на каждом интервале троичного кода имеется как минимум два изменения уровня сигнала. Этого достаточно для выделения сигнала тактовой синхронизации в приемнике или регенераторе.

Т а б л и ц а 4

Сигнал 3Т в десятичном формате

Код 3Т	NNZ	NNP	NZN	NZZ	NZP	NPN	NPZ	NPP
<i>A</i>	0	1	2	3	4	5	6	7
Код 3Т	ZNN	ZNZ	ZNP	ZZN	ZZP	ZPN	ZPZ	ZPP
<i>A</i>	8	9	10	11	12	13	14	15
Код 3Т	PNN	PNZ	PNP	PZN	PZZ	PZP	PPN	PPZ
<i>A</i>	16	17	18	19	20	21	22	23

Т а б л и ц а 5

Сигнал 4В в десятичном формате

Код 4В	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111
<i>C</i>	0	1	2	3	4	5	6	7
Код 4В	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111
<i>C</i>	8	9	10	11	12	13	14	15

Т а б л и ц а 6

Контекстные параметры смещения

Код 3Т	NNZ	NNP	NZN	NZZ	NZP	NPN	NPZ	NPP
<i>D</i>	16	0	8	16	0	8	16	0
Код 3Т	ZNN	ZNZ	ZNP	ZZN	ZZP	ZPN	ZPZ	ZPP
<i>D</i>	8	16	0	8	0	8	16	0
Код 3Т	PNN	PNZ	PNP	PZN	PZZ	PZP	PPN	PPZ
<i>D</i>	8	16	0	8	16	0	8	16

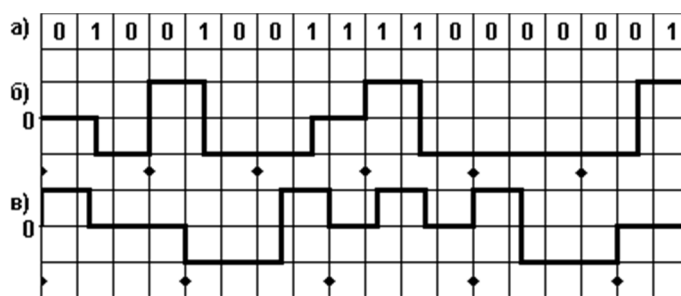


Рис. 10. Многоуровневые относительные линейные коды:

a – исходный бинарный (цифровой) сигнал; *б* – сигнал в коде 3В2Т;
в – сигнал в коде 4ВЗТ (символами ♦ отмечены границы формирования групп 3В и 4В)

Следует отметить, что длительность отдельных троичных элементов сигнала 4ВЗТ остается неизменной, следовательно, коэффициент сжатия спектра также остается неизменным и равным 4/3. Очевидно, что для модифицированного линейного сигнала характерны те же прочие свойства, что и для базового линейного кода.

Заключение. Предложены и проанализированы модифицированные многоуровневые сигналы, обеспечивающие самосинхронизацию системы передачи. В четверичном коде 2B1Q-RZ выделение тактовой частоты обеспечивается за счет периодического возврата к нулю на каждом интервале. Этот механизм также может применяться в системах с многоуровневыми сигналами, содержащими четное число значащих уровней, но не включающими в качестве значащего нулевого уровня. Результирующий коэффициент сжатия спектра сигнала равен 1. В троичных кодах (3B2T и 4B3T) выделение тактовой частоты основано на относительном принципе преобразования цифрового сигнала в линейный и принудительном исключении продолжительных однородных последовательностей в линейном сигнале. В коде 3B2T длина однородного участка не превышает четырех тактов троичного сигнала, а в более совершенном коде 4B3T – двух тактов. При этом сохраняется неизменной величина коэффициента сжатия спектра, присущая исходным сигналам ($3/2$ для сигнала 3B2T и $4/3$ для сигнала 4B3T).

Список литературы

1. Гольдштейн, Б. С. Протоколы сети доступа. Том 2 / Б. С. Гольдштейн. – М.: Радио и связь, 2001. – 292 с.
2. Уайндер, С. Справочник по технологиям и средствам связи / С. Уайндер; пер. с англ. – М.: Мир, 2000. – 429 с.
3. Кротов, А. В. Линейный код двойной оптимальности / А. В. Кротов, А. Ю. Чернышев // XI Вавиловские чтения: материалы Всеросс. междисциплинар. науч. конф. – Йошкар-Ола, 2008. – С. 306-307.

Статья поступила в редакцию 01.07.09.

A. Yu. Chernyshev

SYNCHRONIZATION OF MULTILEVEL CODES OF TRANSMISSION LINES

Multilevel codes for the wire and cable communication lines simultaneously providing the opportunity of self-synchronization of a system and possessing a narrow effective spectrum are offered and investigated. In a quaternary code self-synchronization is provided due to return of a level of a signal to zero on every second interval. In relative ternary codes the redundancy is used, allowing to avoid a constancy of a level during several clock intervals successively.

Key words: line code, clock synchronization, clock frequency, self-synchronizing code, ternary / quaternary code, relative code, linear modem.

ЧЕРНЫШЕВ Александр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и связи МарГТУ. Область научных интересов – формирование колебаний и сигналов; сверхширокополосные радиотехнические системы; системы передачи информации; защита информации в каналах связи. Автор 90 научных, научно-методических и учебно-методических публикаций. E-mail: krts@marstu.net.

УДК 621.391, 621.396

И. В. Рябов, П. М. Юрьев

СИСТЕМЫ СИНТЕЗА ЧАСТОТ И СИГНАЛОВ КАК ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УЗЛЫ СОВРЕМЕННЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Представлены принципы построения и структурно-схемотехнические решения систем синтеза частот и сигналов, построенных на базе метода прямого цифрового синтеза. Проведен анализ технических характеристик различных структур цифровых вычислительных синтезаторов, выявлены их достоинства и недостатки. Предложена новая схемотехническая структура – цифровой синтезатор частотно- и фазомодулированных сигналов с улучшенными техническими характеристиками.

Ключевые слова: *прямой цифровой синтез, цифровые вычислительные синтезаторы, ЦАП, преобразователь кодов, умножитель частоты, фазовый шум, аккумулятор фазы.*

Введение. В конце XX века возродился интерес к радиотехнологиям, что повлекло за собой бурное развитие средств радиосвязи, радиолокации и телевидения. Одним из основных функциональных узлов современных радиоэлектронных средств (РЭС), определяющих их высокие технические характеристики, являются синтезаторы прецизионных частот и сигналов, поэтому задача формирования высокостабильных частот и сигналов крайне актуальна.

Синтезом частот называют процесс формирования одного или нескольких стабильных по частоте периодических колебаний с заданными номинальными значениями частоты [1].

Теория синтеза частот и сигналов является сравнительно новой и стремительно развивающейся областью радиоэлектроники, которая выделилась в самостоятельную научную дисциплину только в 1980-х годах. Развитие методов синтеза частот и сигналов позволило значительно улучшить технические характеристики РЭС: в радиовещании и телевидении – улучшить качество звуковых и телевизионных сигналов; в радиорелейных и спутниковых системах связи – повысить качество телефонной и телевизионной связи; в радиолокации – повысить разрешающую способность по дальности и по скорости; в навигации и радиопеленгации – снизить ошибки определения координат объекта; в радиосвязи – улучшить помехоустойчивость, скрытность и надежность сеанса связи; в измерительной технике – формировать прецизионные сигналы с малым шагом сетки частот и низким уровнем фазовых шумов.

Большой вклад в развитие методов синтеза частот и сигналов внесли такие видные исследователи, как В. В. Шахгильдян, В. С. Станков, Н. П. Ямпурин и др. Несомненно, стоит отметить и зарубежных ученых, которые заложили теоретические основы прямого цифрового синтеза, таких как Л. Рабинер, Дж. Терни, С. Ридер, Б. Гоулд, Б. Голдберг и др.

В 40-е годы XX века в связи с развитием производства электровакуумных приборов появились первые широкодиапазонные синтезаторы частот, построенные по методу прямого синтеза частот на основе идентичных декад. Однако появление в конце 50-х годов транзисторов, а позднее интегральных схем, способствовало развитию другого метода синтеза частот – косвенного, в основе которого лежит метод фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Данное направление в своих трудах активно развивали Л. Рабинер и Б. Гоулд, а также Дж. Клептер и Дж. Френкл [2,3]. Во второй половине 60-х годов XX века появились твердотельные (цифровые) интегральные схемы малой и средней степени интеграции, что дало возможность построить схемы делителей частоты с переменным коэффициентом деления (ДПКД). Включение ДПКД в схему синтезатора частот привело к значительному снижению граничной частоты фильтра нижних частот (ФНЧ), и как следствие – улучшению чистоты спектра выходного сигнала [4]. Учитывая стремительное развитие элементной базы радиоэлектроники, которая в 70-х годах XX века была представлена фильтрами на поверхностных акустических волнах (ПАВ-фильтры), большими интегральными микросхемами – как аналоговыми, так и цифровыми, произошло резкое уменьшение массы и габаритных размеров вычислительной техники. В развитие данного направления большой вклад внес В.Н. Кочемасов [5]. Кроме того, с появлением цифровых интегральных схем был разработан и описан новый вычислительный метод синтеза частот – цифровой, в основе которого лежит формирование мгновенных значений сигнала в цифровом виде. Данный метод интенсивно развивался в 90-е годы XX века, что было связано с появлением высокочастотных БИС, делителей частоты, цифро-аналоговых преобразователей и других цифровых узлов, изготавливаемых на основе GaAs-технологии и HEMT-транзисторов [6].

В настоящее время разработаны основные принципы построения цифровых синтезаторов частот (ЦСЧ) и цифровых вычислительных синтезаторов (ЦВС), в значительной степени изучены их особенности и характеристики формируемых сигналов. Однако на сегодняшний день отсутствует строгая классификация ЦСЧ, недостаточно исследованы предельные возможности ЦСЧ по быстродействию и чистоте спектра формируемых сигналов. Развитие ЦВС в настоящее время идет в основном в рамках известных структурных схем по пути их интегральной реализации, технологического повышения быстродействия, снижения энергопотребления и стоимости [7].

На сегодняшний день наибольший интерес представляет метод прямого цифрового синтеза частот.

Основными параметрами оценки свойств ЦВС являются:

- чистота спектра выходного сигнала (уровень побочных спектральных составляющих);
- диапазон перестройки частоты (полоса частот выходного сигнала);
- скорость перестройки частоты;
- разрешение по частоте;
- непрерывность фазы выходного сигнала при перестройке частоты.

Цель работы заключается в разработке новых схемотехнических структур цифровых вычислительных синтезаторов, построенных на базе прямого цифрового синтеза, на основе анализа наиболее перспективных методов синтеза частот и сигналов, выявления существующих проблем и путей их решения.

1. Метод прямого цифрового синтеза частот

ЦВС характеризуются тем, что генерируемый ими сигнал синтезируется с высокой точностью. Частота, амплитуда и фаза сигнала в любой момент времени точно определены, что дает возможность управлять ими. ЦВС устойчивы к температурному дрейфу

и, соответственно, в меньшей степени подвержены старению. Единственным функциональным узлом, который обладает свойственной аналоговым схемам нестабильностью, является ЦАП. Поэтому ЦВС получают все большее распространение. ЦВС обладают целым рядом конкурентных преимуществ, таких как цифровое управление частотой и фазой выходного сигнала, цифровой интерфейс, который легко позволяет реализовать микроконтроллерное управление, высокое разрешение по фазе и частоте, сверхбыстрое переключение на другую частоту без фазовых разрывов и др. [8].

Для рассмотрения особенностей структуры и функционирования ЦВС воспользуемся простейшей структурной схемой его работы (рис. 1).

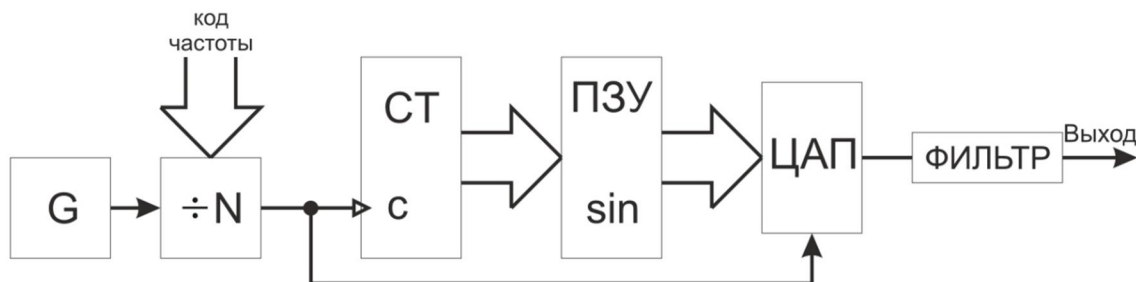


Рис. 1. Функциональная схема простейшего прямого цифрового синтезатора

Задача любого ЦВС заключается в получении на выходе сигнала синусоидальной формы с заданной частотой. Так как в ЦВС формирование выходного сигнала происходит в цифровой форме, совершенно очевидна необходимость ЦАП и ФНЧ. Чтобы получить синусоидальный сигнал на вход ЦАП, необходимо подать последовательность отсчетов функции синуса $\sin(x)$, следующих с частотой дискретизации. Закон изменения функции $\sin(x)$ во времени сложен и цифровыми методами просто не реализуется. Поэтому наиболее подходящим методом формирования отсчетов функции $\sin$ является табличный метод, который реализуется посредством ввода в постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) таблицы соответствий. Код, который подается на адресные входы ПЗУ, является аргументом функции $\sin(x)$, а выходной код ПЗУ равен значению функции для данного аргумента. Аргумент функции $\sin(x)$, или фаза, в отличие от значения функции, меняется во времени линейно. Сформировать линейно меняющуюся во времени последовательность кодов гораздо проще, это способен сделать простой двоичный счетчик. Поэтому простейший ЦВС выглядит так: двоичный счетчик формирует адрес для ПЗУ, куда записана таблица одного периода функции $\sin(x)$, отсчеты с выхода ПЗУ поступают на ЦАП, который формирует на выходе синусоидальный сигнал, подвергающийся фильтрации в ФНЧ и поступающий на выход. Для перестройки выходной частоты используется ДПКД, на вход которого поступает тактовый сигнал с опорного генератора (ОГ).

Такая структура ЦВС имеет целый ряд принципиальных недостатков, основным из которых является неудовлетворительная способность к перестройке по частоте. Так как тактовая частота делится на целое число, то шаг перестройки частоты будет переменным, и чем меньше коэффициент деления, тем больше относительная величина шага перестройки. Этот шаг будет очень грубым при малых коэффициентах деления. Кроме того, при перестройке выходной частоты будет меняться и частота дискретизации. Это затрудняет фильтрацию выходного сигнала, а также ведет к уменьшению эффективности работы ЦАП, и лишь на максимальной выходной частоте ЦАП будет работать мак-

симально быстро. Из вышесказанного можно сделать вывод, что ЦВС должен работать на постоянной частоте дискретизации, близкой к максимальной для используемого ЦАП.

Однако все эти недостатки легко устраняются путем введения накапливающего сумматора (аккумулятор фазы) вместо двоичного счетчика (рис. 2).

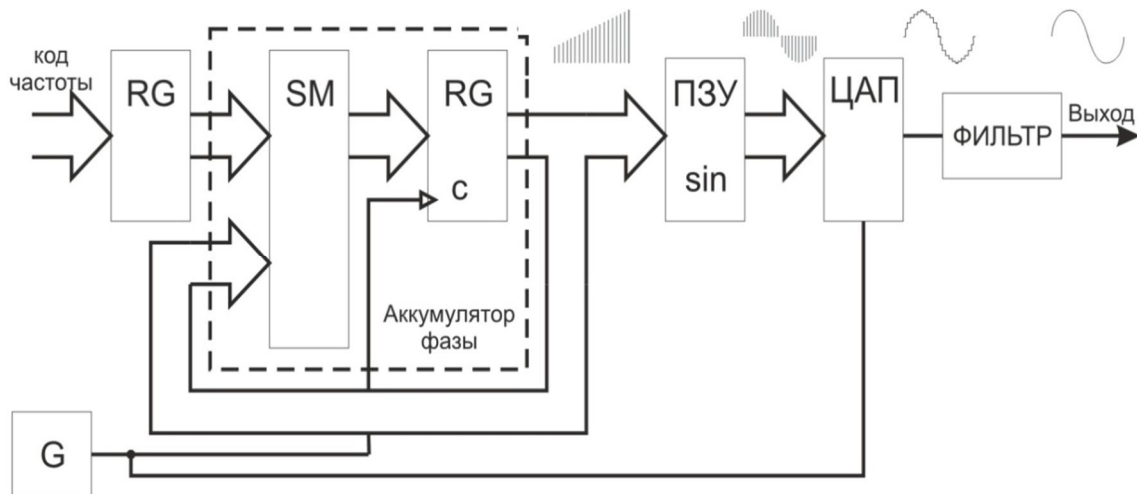


Рис. 2. Прямой цифровой синтезатор на основе аккумулятора фазы

Содержимое аккумулятора фазы линейно увеличивается во времени, но приращение не всегда единично, а зависит от величины постоянного приращения. Выходной код аккумулятора фазы представляет собой код мгновенной фазы выходного сигнала. Постоянное приращение представляет собой приращение фазы за один такт работы устройства. Чем быстрее изменяется фаза во времени, тем больше частота генерируемого сигнала. Поэтому значение приращения фазы фактически является кодом выходной частоты. Если приращение фазы равно единице, то работа аккумулятора фазы полностью идентична работе двоичного счетчика. Но если приращение фазы будет, например, равно двум, то код фазы будет изменяться вдвое быстрее. Частота генерируемого сигнала при этом будет вдвое большей, а частота дискретизации останется прежней.

Аккумулятор фазы работает с периодическими переполнениями, обеспечивая арифметику по модулю 2^N . Такое периодическое переполнение соответствует периодическому поведению функции $\sin(x)$ с периодом 2π . Другими словами, частота переполнений аккумулятора фазы равна частоте выходного сигнала. Эта частота определяется формулой:

$$f_{\text{вых}} = M \cdot f_m / 2^N, \quad (1)$$

где $f_{\text{вых}}$ – выходная частота,

f_m – тактовая частота,

M – код частоты,

N – разрядность аккумулятора фазы.

По существу, тактовая частота испытывает деление на некоторое число, которое определяется кодом частоты и разрядностью аккумулятора фазы. При этом шаг перестройки частоты не зависит от ее значения и равен

$$\Delta f_{\text{вых}} = f_m / 2^N. \quad (2)$$

Например, если тактовая частота равна 25 МГц, а разрядность $N = 32$, то шаг перестройки частоты составит 0,005 Гц.

Из этого соотношения следует, что если увеличить разрядность N , то уменьшится шаг перестройки частоты. Причем особых ограничений здесь нет. Увеличение разрядности аккумулятора фазы не требует обязательного увеличения разрядности адреса ПЗУ. Для адресации можно использовать лишь необходимое количество старших разрядов кода фазы. Для уменьшения объема ПЗУ можно использовать свойства симметрии функции $\sin(x)$. В большинстве ЦВС в ПЗУ содержится только 1/4 периода функции.

Таким образом, в ЦВС аккумулятор фазы формирует последовательность кодов мгновенной фазы сигнала, которая изменяется линейно. Скорость изменения фазы задается кодом частоты. Далее с помощью ПЗУ линейно изменяющаяся фаза преобразуется в изменяющиеся по синусоидальному закону отсчеты выходного сигнала. Эти отсчеты поступают на ЦАП, на выходе которого формируется ступенчатый синусоидальный сигнал. Этот ступенчатый синусоидальный сигнал фильтруется с помощью аналогового ФНЧ, на выходе которого получается синусоидальный сигнал.

Выходной синусоидальный сигнал восстанавливается из отдельных отсчетов. Целое число отсчетов на период укладывается лишь в частном случае. В большинстве случаев на каждом новом периоде сигнала отсчеты находятся в новых местах (рис. 3). Это приводит к появлению так называемой паразитной амплитудной модуляции, так как в синтезируемом сигнале амплитуда не достигает максимальных и минимальных значений.

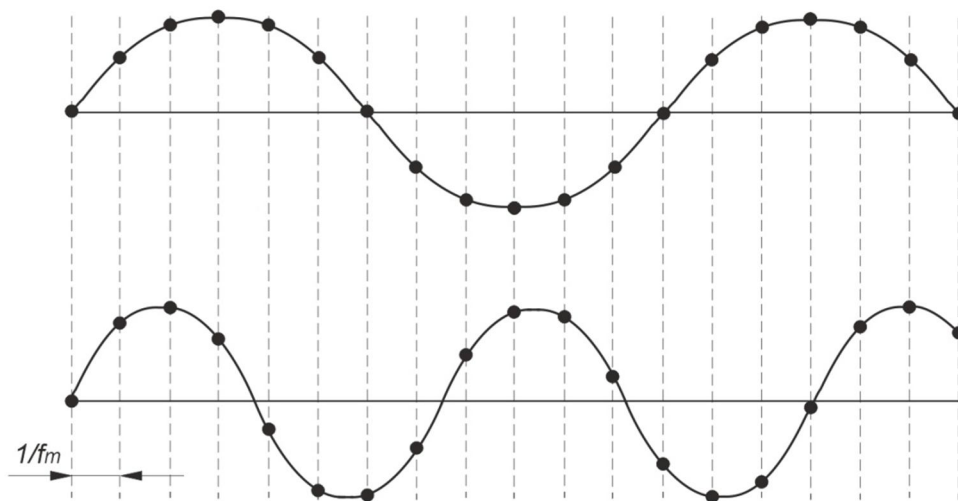


Рис. 3. Формирование сигналов различной частоты при изменении кода приращения

Процесс периодически повторяется, но период повторения может быть различным. Он зависит от кода частоты, разрядности аккумулятора фазы и от усечения разрядов кода фазы. В любом случае из последовательности отсчетов будет восстановлен сигнал синусоидальной формы.

ЦВС могут иметь некоторые дополнительные цифровые блоки, выполняющие над сигналом различные дополнительные операции. Эти блоки обеспечивают расширение функциональных возможностей ЦВС и улучшенные технические характеристики:

- умножитель опорной частоты;
- дополнительный цифровой сумматор для программирования фазы;
- инверсный $\sin(x)/(x)$ -фильтр для компенсации неравномерности АЧХ;
- дополнительный цифровой умножитель для формирования сигнала с амплитудной модуляцией;
- дополнительный ЦАП для получения квадратурных сигналов I и Q ;
- дополнительный компаратор с малым дрожанием для формирования цифрового тактового сигнала;
- дополнительные регистры частоты и фазы, которые могут быть заранее запрограммированы для частотной или фазовой манипуляции.

Для того чтобы правильно применять ЦВС, необходимо иметь четкое представление о том, как различные факторы влияют на его выходные характеристики.

Важнейшими характеристиками синтезатора являются: нестабильность частоты, дрожание выходного сигнала («джиттер»), уровень амплитудных и фазовых шумов.

Главным источником фазовых шумов является генератор тактового сигнала. Фазовый шум выходного сигнала синтезатора теоретически меньше фазового шума сигнала тактового генератора на $20\lg(f_m/f_{\text{вых}})$ дБ. На практике это улучшение ограничено свойствами схем, входящих в состав синтезатора (типовое значение составляет – 130 дБ/Гц при расстройке на 1 кГц от выходной частоты). Эта величина фазового шума является минимально возможной, и получила название «остаточный фазовый шум» [7].

Некоторые типы высокочастотных ЦВС содержат встроенный умножитель частоты на основе ФАПЧ. Однако умножение частоты в несколько раз вызывает увеличение фазового шума.

Аккумуляторы фазы выпускаемых ЦВС имеют разрядность 28, 32 или 48 бит. Но только часть старших разрядов используется для адресации ПЗУ, в которое записаны коэффициенты функции $\sin(x)$. Это вынужденная мера, связанная с необходимостью уменьшения объема ПЗУ. Если использовать, например, 32 бита адреса ПЗУ и десятиразрядное представление каждого отсчета, то понадобилось бы ПЗУ емкостью $2^{32} \times 10 = 42\,949\,672\,960 \approx 43$ Гбит. Отсечение младших разрядов кода адреса приводит к возникновению ошибки в представлении фазы. Как следствие, это приводит к появлению погрешности при преобразовании фазы в амплитуду выходного сигнала. Эта погрешность является периодической, так как в зависимости от кода частоты одно и то же состояние аккумулятора фазы повторяется чаще или реже. В результате в спектре выходного сигнала синтезатора появляются дискретные составляющие, возникающие из-за усечения кода фазы. Значения амплитуды и фазы этих составляющих зависят от разрядности аккумулятора фазы (N), разрядности слова фазы после усечения (N_{yc}) и значения кода частоты (M).

Максимальный уровень этих составляющих приблизительно можно рассчитать по формуле:

$$U = -6,02 \cdot N_{yc}. \quad (3)$$

Например, при $N_{yc} = 15$ максимальный уровень этих составляющих приблизительно равен –90 дБ. Причем наихудшим является случай, когда в отбрасываемой части кода фазы старший бит равен 1, а все остальные биты – 0. Дополнительные составляющие в спектре будут отсутствовать при условии, что в отбрасываемой части кода все составляющие равны нулю. На рис. 4 приведен спектр выходного сигнала ЦВС при $N_{yc} = 15$.

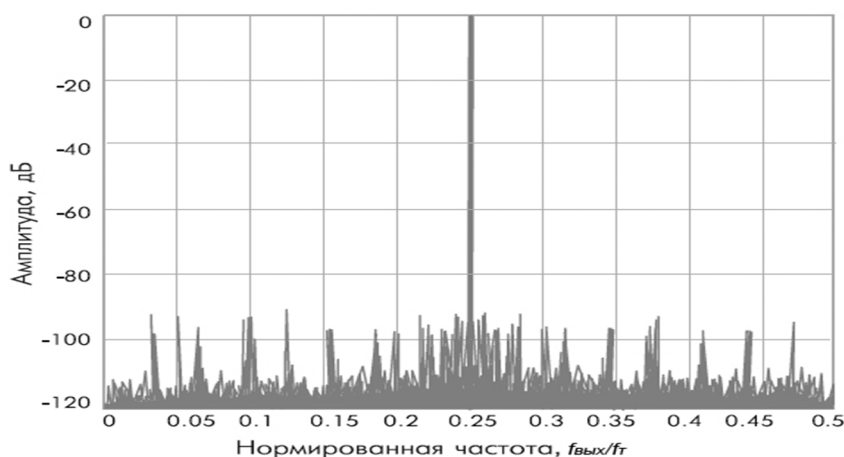


Рис. 4. Спектр выходного сигнала при усечении длины кода аккумулятора фазы до 15 бит

Частотное распределение составляющих, вызванных усечением кода фазы, не может быть проанализировано так просто, как их максимальная амплитуда. Рассматривая вопрос на качественном уровне, можно сказать, что усечение фазы приводит к появлению фазовой ошибки, величина которой меняется по пилообразному закону. Сигнал фазовой ошибки появляется в результате отбрасывания битов кода фазы. Поэтому для того, чтобы вычислить частоту этого сигнала, нужно рассмотреть только ту часть аккумулятора фазы, которая отбрасывается при усечении ее кода. Разрядность этой части аккумулятора равна числу отбрасываемых битов.

При этом необходимо учитывать, что частота пилообразного сигнала или ее гармоники могут лежать на частотах выше $f_m/2$. В этом случае они способны попасть в рабочую область частот в результате зеркального отображения спектра относительно частот $n \cdot f_m$.

На рис. 5 приведены зависимости уровня побочных компонентов от разрядности кода фазы для ЦАП разной разрядности. Неограниченно наращивать разрядность кода фазы нет необходимости еще и потому, что снижение уровня побочных компонентов происходит только до определенного значения, зависящего от уровня шумов квантования ЦАП. На практике разрядность кода фазы должна быть на 2–3 разряда больше, чем разрядность ЦАП.

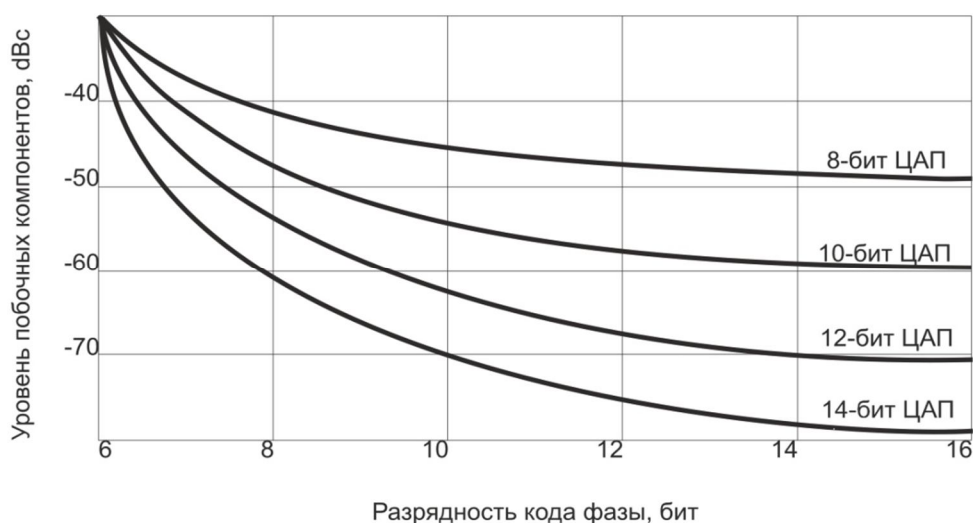


Рис. 5. Зависимость уровня амплитудных шумов ЦВС от разрядности ЦАП

Следует отметить, что существуют методы уменьшения влияния усечения кода фазы, основанные на добавлении к фазовой информации псевдослучайного шума. Таким образом удастся уменьшить энергию соответствующих побочных компонентов, но при этом увеличивается общий шумовой порог [7].

Как уже было сказано, максимальная выходная частота не может быть выше половины тактовой частоты f_m . Огибающая спектра сигнала на выходе ЦАП изменяется по закону $\sin(x)/x$, и амплитуду сигнала можно определить по формуле:

$$A(f_{\text{вых}}) = \frac{\sin[(\pi \cdot f_{\text{вых}}) / f_m]}{(\pi \cdot f_{\text{вых}}) / f_m}, \quad (4)$$

где $A(f_{\text{вых}})$ – амплитуда сигнала на выходе ЦАП на заданной частоте.

2. Современные направления развития синтезаторов частот на основе метода прямого цифрового синтеза

Наметившиеся в последние годы тенденции развития синтезаторов частот на основе метода прямого цифрового синтеза в основном предполагают дальнейшее усовершенствование известных структурных схем, в том числе улучшение их технических характеристик посредством внедрения в них дополнительных узлов. Эти тенденции в последние годы нашли свое отражение в работах зарубежных исследователей: Дж. Ванкка, В. Кроупа, К. Халонена, С. Ли, А. МакИвана, С. Коллинса, Г. Лахиджи, Д. Аль Кхалили, Р. Керра и др.

Коллектив авторов Дж. Ванкка, Дж. Линдберг, К. Халонен представил метод с обратной связью для компенсации погрешности (EF – error feedback), который используется для подавления фазовых и амплитудных побочных спектральных составляющих в прямых цифровых синтезаторах (DDS). Она позволяет сократить длины слов преобразователей фазы в амплитуду и ЦАП. Недостаток обычной фазовой EF в том, что она уменьшает фазовые побочные спектральные составляющие только в выходных частотах DDS, которые близки к половине частоты дискретизации. Представлены новые структуры фазовой EF со случайной несущей частотой для косинусоидального и квадратурного выходного сигнала DDS. Косинусоидальные и квадратурные DDS с настраиваемой фазовой и амплитудной EF разработаны и реализованы на программируемом логическом устройстве [9].

А. МакИван и С. Коллинс разработали маломощную систему прямого цифрового синтеза частоты без ПЗУ, которая превышает чистоту спектра существующих маломощных систем DDS приблизительно на 10 дБ [10].

Тайваньские исследователи Ч.-Ч. Ванг, Я.-М. Хунг и Ю.-Л. Тзенг предложили быстродействующий прямой цифровой синтезатор без ПЗУ с управлением фазой, использующий тригонометрическую учетверенную угловую формулу. Десятиуровневая конвейерная архитектура применяет разложение операндов фазы. Чистота спектра улучшена до -130 дБ. Разрешение до 12 бит. Выходная частота выше 40 МГц, что намного выше, чем требование в 32 МГц глобальной системы мобильной связи и Bluetooth. Не требуется никаких масштабирующих и корректирующих ошибки таблиц. Максимальная ошибка математически проанализирована. Длина слова каждого умножителя тщательно подобрана в цифровом исполнении таким образом, что уровень ошибок ограничен и разрешение фиксировано [11].

Преобразование фазы в амплитуду – неотъемлемая часть метода прямого цифрового синтеза частот. Китайскими исследователями Х. Лю, Ю. Чи и Я. Денгом предложена новая теория преобразования фазы в амплитуду, которая называется аппроксимация кривой. Она предназначена для решения существующих проблем в современных цифровых синтезаторах частот. Этот метод имеет ряд преимуществ перед традиционными методами преобразования фазы в амплитуду, такие как простая жестко смонтированная схема, высокая скорость преобразования, низкие потери и высокая прецизионность преобразования. В статье представлена математическая функция, аппроксимирующая нормированные колебания. Экспериментальные данные показывают, что этот метод позволяет добиться лучших характеристик [12].

В [13] представлен проект прямого цифрового синтезатора без ПЗУ. Свободный от гармоник динамический диапазон представленной DDS системы составляет -91,51 дБ. 32-битное управляющее слово частоты дает разрешение 0,023 Гц на частоте дискретизации 100 МГц. DDS потребляет 60 мВт с питанием 3,3 В на 100 МГц.

Наибольших успехов в интегральном исполнении и тиражировании синтезаторов чисто прямого цифрового синтеза добились инженеры ряда фирм: Intersil, Qualcomm, Gigabit Logic, лидером среди которых является Analog Devices. Синтезаторы частот с большими функциональными возможностями также строятся на основе известных схемотехнических структур. Однако целью данных фирм является достижение максимально улучшенных технических характеристик устройств, улучшение массогабаритных показателей при высокой степени интеграции и достижение наилучшей повторяемости характеристик при тиражировании. В частности, фирма Analog Devices идет по пути интеграции все большего количества дополнительных цифровых блоков, которые позволяют существенно повысить функциональные возможности прямых цифровых синтезаторов как законченных устройств.

Ниже представлена таблица характеристик наиболее распространенных интегральных ЦВС.

Характеристики наиболее распространенных интегральных ЦВС

Тип	f_m мах, МГц	Разр. кода частоты, бит	Встроенный ЦАП	Модуляция	Особенности
Intersil					
HSP45102	40	32	-	QPSK,BFSK	NCO
HSP45106	33	32	-	FM,PM,PSK,FSK	NCO
HSP45116	52	32	-	AM,FM,PM,PSK,FSK,QAM	NCO+Mixer
ISL5314	125	48	+	QPSK,FSK	DDS
Qualcomm					
Q2240I-1	50	24	-		NCO
Q2240I-2	100	32	-		NCO
Q2240I-3	100	32	-		NCO
Q2368	130	32	-	BFSK,BPSK,QPSK,PSK	NCO
Q2334	50	32	-	PSK,FSK,BFSK	NCO
Gigabit Logic					
10G102	1000	32	-		Сумматор
10G103	1000	32	-		Сумматор
Analog Devices					
AD7008	50	32	+	AM,QAM,PSK,FSK	DDS
AD9831	25	32	+	PSK,FSK	DDS

AD9830	50	32	+	PSK,FSK	DDS
AD9850	125	32	+		DDS

Продолжение табл.

Тип	$f_{\text{г}}$ max, МГц	Разр. кода частоты, бит	Встроенный ЦАП	Модуляция	Особенности
Analog Devices					
AD9851	180	32	+	PM,FM	DDS
AD9832	25	32	+	PSK,FSK	DDS
AD9835	50	32	+	PSK,FSK	DDS
AD9852	300	48	+	AM,FM,PSK,FSK	DDS
AD9854	300	48	+	AM,FM,PSK,FSK	DDS
AD9856	160	32	+	AM,QAM	Upconverter
AD9858	1000	32	+	PSK,FSK	DDS
AD9859	400	32	+	PSK,FSK	DDS
AD9951	400	32	+	PSK,FSK	DDS
AD9952	400	32	+	PSK,FSK	DDS
AD9953	400	32	+	PSK,FSK	DDS
AD9954	400	32	+	PSK,FSK	DDS
Элвис					
Синтетик 1	1000	48	+	AM,FM,PSK,FSK	DDS

3. Цифровой синтезатор частотно- и фазомодулированных сигналов

Цифровой синтезатор частотно- и фазомодулированных сигналов (рис. 6) содержит эталонный генератор 1, блок задержки 2, первый регистр памяти 3, первый цифровой накопитель 4, второй регистр памяти 5, второй цифровой накопитель 6, сумматор 7, преобразователь кодов 8, цифроаналоговый преобразователь 9, фильтр нижних частот 10, третий регистр памяти 11, делитель частоты с переменным коэффициентом деления 12, четвертый регистр памяти 13, третий цифровой накопитель 14 [14].



Рис. 6. Цифровой синтезатор частотно- и фазомодулированных сигналов

Цифровой синтезатор частотно- и фазомодулированных сигналов работает следующим образом. На вход первого регистра памяти 3 поступает код начальной частоты C_i , а на вход третьего регистра памяти 11 – код D_k , определяющий коэффициент де-

ления делителя 12 и скорость изменения частоты цифрового вычислительного синтезатора.

С первым тактовым импульсом в момент t_1 код начальной частоты C_i из первого регистра памяти 3 записывается в первый цифровой накопитель 4, код коэффициента деления D_k из третьего регистра памяти 11 записывается в делитель с переменным коэффициентом деления 12, а код начальной фазы H_i из четвертого регистра памяти 13 записывается в третий цифровой накопитель 14. Затем с каждым тактовым импульсом код A на выходе первого цифрового накопителя 4 будет изменяться по формуле:

$$A = Q + T / D_k. \quad (5)$$

Код A поступает на вход второго цифрового накопителя 6, результат суммирования в котором будет изменяться по формуле:

$$B = A \cdot T = C_i \cdot T + T^2 / D_k. \quad (6)$$

Код B поступает на второй вход сумматора 7, а на первый его вход поступает код H_i с выхода третьего цифрового накопителя 14. Код S на выходе сумматора 7 изменяется по формуле:

$$S = H_i + (C_i + 1) \cdot T + T^2 / D_k. \quad (7)$$

Результат суммирования с выхода сумматора 7 поступает на вход преобразователя кодов 8, причем старший разряд кода суммы S_{SGN} является знаковым и поступает на вход управления инверсией преобразователя кодов 8. Остальные N старших разрядов через преобразователь кодов поступают на информационные ЦАП 9. Если $S_{SGN} = 0$, то на ЦАП поступает прямой двоичный код суммы, если $S_{SGN} = 1$, то на ЦАП поступает обратный код суммы. На выходе ЦАП 9 формируется ступенчатый сигнал «треугольной» формы, который подается на ФНЧ 10. Фильтр нижних частот 10 имеет частоту среза $f_{cp} < f_m / 2$, где f_m – тактовая частота при этом пропускает на выход синтезатора только первую гармонику сформированного сигнала.

Если принять, что $\varphi_i = H_i$ – начальная фаза, $f_0 = C_i + 1$ – начальная частота; $0,5f' = 1/D_k$ – скорость изменения частоты синтезируемого сигнала, $\Delta t = T$ – период следования тактовых импульсов, то тогда на выходе ФНЧ 10 формируется сигнал, амплитуда которого изменяется по формуле:

$$u(t) = U_m \sin(f_0 t + 0,5 f' t^2 + \varphi_i), \quad (8)$$

где f_0 – начальная частота синтезируемого сигнала,

f' – скорость изменения частоты синтезируемого сигнала.

Таким образом, в ЦВС появилась возможность управлять фазой и частотой синтезируемого сигнала.

Предложенная авторами структура ЦВС позволяет расширить диапазон частот синтезируемых сигналов и повысить быстродействие синтезаторов.

Заключение. Сравнительный анализ методов синтеза частот и сигналов показал, что наиболее перспективным для современных радиоэлектронных средств является ме-

тод прямого цифрового синтеза, который обладает следующими преимуществами: высокой технологичностью и надежностью, малым шагом по частоте, высокой скоростью перестройки частоты при непрерывности фазы формируемых колебаний, способностью формирования сложных сигналов, хорошей повторяемостью параметров при тиражировании.

Функциональные возможности цифровых вычислительных синтезаторов могут быть существенно расширены путем небольшого усложнения их структуры посредством введения дополнительных функциональных узлов, таких как сумматоры, регистры и т.п., обладающих высоким быстродействием.

Предложенная схемотехническая структура цифрового синтезатора частотно- и фазомодулированных сигналов позволяет синтезировать сложные сигналы с частотной, фазовой и амплитудной модуляцией, причем управление цифровым вычислительным синтезатором осуществляется при помощи цифрового интерфейса.

Список литературы

1. Шапиро, Д. Н. Основы теории синтеза частот / Д. Н. Шапиро, А. А. Панин. – М.: Радио и связь, 1981. – 264 с.
2. Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд; пер. с англ.; под ред. Ю. Н. Александрова. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
3. Клеппер, Дж. Системы фазовой и частотной автоподстройки частоты / Дж. Клеппер, Дж. Френкл; пер. с англ.; под ред. А.Ф. Фомина. – М.: Энергия, 1977. – 439 с.
4. Шахгильдян, В.В. Проектирование радиопередатчиков: Учеб. пособие для вузов / В. В. Шахгильдян, М. С. Шумилин, В. Б. Козырев и др.; Под ред. В. В. Шахгильдяна. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 2000. – 656 с.
5. Кочемасов, В.Н. Формирование сигналов с линейной частотной модуляцией / В. Н. Кочемасов, Л. А. Белов, В. С. Оконешников. – М.: Радио и связь, 1983. – 123 с.
6. Ямпурин, Н. П. Формирование прецизионных частот и сигналов: Учеб. пособие / Н. П. Ямпурин, В. В. Болознев, Е. В. Сафронов, Е. Б. Жалнин. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет, 2003. – 187 с.
7. Рябов, И. В. Цифровой синтез прецизионных сигналов: Монография / И. В. Рябов. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2005. – 152 с.
8. Cushing, R. Single-sideband upconversion of quadrature DDS signals to the 800-to-2500-MHz band / R. Cushing // Analog Dialogue. – 2000. – V.34. – №1. – P.46–49.
9. Vankka, J. Direct digital synthesizer with tunable phase and amplitude error feedback structures / J. Vankka, J. Lindeberg, K. Halonen // Proc. Int. Symp. Circuits and Systems ISCAS'03. – 2003. – V.1. – P.785 – 788.
10. McEwan, A. Analogue interpolation based direct digital frequency synthesis / A. McEwan, S. Collins // Proc. Int. Symp. Circuits and Systems ISCAS '03. – 2003. – V.1. – P.621 – 624.
11. Wang, C.-C. Phase-Adjustable Pipelining ROM-Less Direct Digital Frequency Synthesizer With a 41.66-MHz Output Frequency / C.-C. Wang, J.-M. Huang, Y.-L. Tseng // Circuits and Systems II: Express Briefs, IEEE Transactions. – 2006. – V.53. – P.1143 – 1147.
12. Liu, X. Direct digital frequency synthesizer based on curve approximation / X. Liu, Y. Shi, M. Wang, J. Deng // Industrial Technology ICIT 2008, IEEE International Conference. – 2008. – P.1 – 4.
13. Jafari, H. A low power, high SFDR, ROM-less direct digital frequency synthesizer / H. Jafari, A. Ayatollahi, S. Mirzakuchaki // Microelectronics ICM 2005, 17th International Conference. – 2005. – P.5.
14. Пат. 2007120371 Российская Федерация, МПК 7 H03L 7/18. Цифровой синтезатор частотно- и фазомодулированных сигналов / И. В. Рябов, П. М. Юрьев; Марийский государственный технический университет; заявл. 31.05.07; опубл. 2008, БИПМ. – 2008 г. №34.

Статья поступила в редакцию 23.04.09.

I. V. Ryabov, P. M. Yuryev

**SYSTEMS OF FREQUENCIES AND SIGNALS SYNTHESIS
AS BASIC FUNCTIONAL UNITS OF
MODERN RADIO-ELECTRONIC MEANS**

Principles of construction and structural and circuit-related decisions for frequencies and signals synthesis systems created on the basis of the method of direct digital synthesis are submitted. The analysis of characteristics of various structures of digital computing synthesizers is carried out, their merits and drawbacks are revealed. A new circuit-related structure - a digital synthesizer of frequency- and phase-modulated signals with the improved characteristics is offered.

Key words: *direct digital synthesis, digital computing synthesizers, DAC, converter of codes, frequency multiplier, phase noise, phase accumulator.*

РЯБОВ Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и производства ЭВС МарГТУ. Область научных интересов – цифровые методы синтеза сложных широкополосных сигналов, радиолокация и телекоммуникации. Автор более 50 публикаций. E-mail: kppevs@marstu.net.

ЮРЬЕВ Павел Михайлович – аспирант МарГТУ. Область научных интересов – моделирование технических систем, радио- и телевизионные системы, цифровые методы синтеза сигналов. Автор 4 статей. E-mail: kppevs@marstu.net.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

УДК 621.391.266

Р. Г. Хафизов, Я. А. Фурман

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЯРКОСТНОЙ ИНФОРМАЦИИ ТОЧЕК ПРОСТРАНСТВЕННОГО ГРУППОВОГО ТОЧЕЧНОГО ОБЪЕКТА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЕГО ПРОВОЛОЧНОЙ МОДЕЛИ

Разработана аналитическая модель пространственного группового точечного объекта, учитывающая не только пространственные координаты его точек, но и их яркость. Исследовано влияние яркостной информации точек пространственного группового точечного объекта на устойчивость его проволочной модели и результаты распознавания.

Ключевые слова: *пространственный групповой точечный объект, проволочная модель, кватернионный сигнал, полный кватернион.*

Введение и постановка задачи. Широкий класс задач обработки пространственных изображений, формируемых современными информационными системами, связан с извлечением информации из изображений в виде множества пространственных точечных отметок – пространственных групповых точечных объектов (ПГТО). Успешное решение таких задач возможно при наличии адекватной аналитической модели ПГТО, позволяющей представить изображения ПГТО в виде сигнала и выработать набор мер схожести с другими ПГТО, в том числе и с эталонными.

В рассмотренных ранее подходах к упорядочению и распознаванию пространственных групповых точечных объектов (ПГТО) яркость составляющих объект точек предполагалась одинаковой, а отличие объектов друг от друга определялось лишь взаимным расположением этих точек [1–4]. Такое предположение стало основой для описания ПГТО векторными кватернионами. Реально яркости отдельных точек различны, причем их значения могут различаться в десятки и более раз. Поэтому игнорирование такой информации может существенно ухудшить результаты упорядочения точек и распознавания объекта.

Можно, по крайней мере, назвать две области, в которых возникают задачи, связанные с необходимостью использования яркостной информации точек ПГТО. Одна из них является задачей с идентификацией звезды по яркостному портрету окружающих ее звезд в пределах машинного кадра астродатчика, вторая – задачей обеспечения радиолокационного наблюдения групповых точечных целей. В этих задачах для принятия решения о классе объекта яркостная информация дополняет информацию о форме и размерах распознаваемого объекта. Следует отметить, что форма объекта слабо связана с его яркостным портретом, и данный фактор обуславливает одну из особенностей задачи распознавания ПГТО. При решении задачи нумерации граней ассоциированного с ПГТО многогранника неявно использовалось предположение об одинаковой ценности яркостной информации вершин грани и информации о ее форме.

Это позволило при нахождении квадрата расстояния между гранями складывать квадрат расстояния, достигаемого за счет разницы форм грани, с квадратом расстояния, получаемого за счет яркостных портретов различных граней. Такой подход является в определенной степени допустимым при решении задачи нумерации граней, относящихся к одному и тому же многограннику. Но при распознавании ПГТО по их проводочным моделям и яркостным портретам для принятия решения о классе ПГТО целесообразно учитывать различную важность данных двух видов информативных признаков.

Один из подходов к получению кватернионной модели ПГТО, учитывающей как взаимное пространственное расположение, так и яркости каждой из его точек, базируется на интерпретации действительной части полного кватерниона в качестве значения яркости задаваемой им точки.

Целью данной работы является исследование влияния яркостной информации точек ПГТО на устойчивость его проводочной модели и результаты распознавания в условиях воздействия координатных шумов.

1. Общие соотношения для полных кватернионов

Будем полагать, что чисто векторный кватернион $q(n) = i q_1(n) + j q_2(n) + k q_3(n)$ задает расположенную в пространстве точку $\xi(n)$. Преобразуем его в полный кватернион, введя вещественную часть $q_0(n)$, равную яркости J_n данной точки, т.е.

$$q_0(n) = J_n, \quad n = 0, 1, \dots, s-1.$$

Тогда кватернионный сигнал $Q^f = \{q^f(n)\}_{0,s-1}$, где

$$q^f(n) = q_0(n) + i q_1(n) + j q_2(n) + k q_3(n)$$

полный кватернион, будет содержать информацию о пространственном положении и яркости всех s точек ПГТО. Очевидно, что

$$Q^f = Q_0 + Q,$$

где $Q_0 = \{q_0(n)\}_{0,s-1} = \{J_n\}_{0,s-1}$ – это КТС, состоящий только из вещественных чисел, а $Q = \{q(n)\}_{0,s-1}$ – КТС, состоящий из векторных кватернионов. КТС Q^f далее будем называть полным, а $Q = \{q(n)\}_{0,s-1}$ – векторным КТС.

Два полных КТС равны друг другу при условии равенства между собой их кватернионов с одинаковыми значениями n :

$$\mathbf{Q}^f = \mathbf{P}^f \quad \text{при} \quad q(n) = p(n), \quad n = 0, 1, \dots, s-1.$$

Полный КТС $\mathbf{P}^f$, задающий ПГТО, полученный масштабированием исходного ПГТО в $|\mu|$ раз, поворотом на угол 2ψ вокруг оси с направляющим вектором $\mathbf{r}$ и увеличением яркости всех точек в a раз, имеет вид:

$$\mathbf{P}^{(f)} = a\mathbf{Q}_0 + |\mu|b\mathbf{Q}b^{-1},$$

где $b = \cos\psi + \mathbf{r}\sin\psi$ – вращающий кватернион.

Для скалярного произведения двух полных кватернионов q^f и p^f можно записать

$$(q^f, p^f) = \text{Re}(q^f, p^f) - \begin{vmatrix} i & j & k \\ q_1 & q_2 & q_3 \\ p_1 & p_2 & p_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} q_1 & q_0 \\ p_1 & p_0 \end{vmatrix} i + \begin{vmatrix} q_2 & q_0 \\ p_2 & p_0 \end{vmatrix} j + \begin{vmatrix} q_3 & q_0 \\ p_3 & p_0 \end{vmatrix} k, \quad (1)$$

где

$$\text{Re}(q^f, p^f) = q_0 p_0 + \text{Re}(q, p). \quad (2)$$

Из выражения (2) можно получить:

$$(q^f, p^f) = q_0 p_0 - q^f p + p_0 q. \quad (3)$$

В отличие от выражений (1) и (2) последнее выражение более удобно для вычисления скалярного произведения полных кватернионов, но не позволяет в явном виде получить представление для реальной части этого произведения. Следующее выражение задает скалярное произведение полных кватернионов через скалярное произведение векторных кватернионов:

$$(q^f, p^f) = (q, p) + q_0 p_0 - q_0 p + p_0 q, \quad (4)$$

причем

$$\text{hypc}(q^f, p^f) = \text{hypc}(q, p) - q_0 p + p_0 q. \quad (5)$$

2. Расстояние между полными кватернионами или между полными кватернионными сигналами

Для оценки влияния яркостей точек на устойчивость его проволочной модели и на эффективность распознавания ПГТО необходимо исследовать влияние этих яркостей на меру схожести формы двух граней ассоциированного с ПГТО выпуклого многогранника и на меру схожести двух полных многогранников. При этом уровень координатных шумов не должен меняться. Ранее в качестве меры схожести двух кватернионов или двух КТС выбиралось значение их скалярного произведения. Такое решение будет корректным лишь в том случае, когда операции выполняются над нормированными векторами. В условиях принятой модели сигналов в виде полных кватернионов, операция их нормирования из-за учета значений яркости точек приводит к уменьшению его гиперкомплексной части и, как следствие, к искажению положения точки в пространстве. Чтобы избежать таких искажений, в качестве меры схожести сигналов необходимо выбрать значение расстояния:

$$R_{q^f, p^f}^{2,f} = \|q^f\| + \|p^f\| - 2\operatorname{Re}(q^f, p^f) = \|q^f - p^f\|^2.$$

В более подробной записи это выражение принимает вид

$$\begin{aligned} R^{2,f} &= q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + p_0^2 + p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 - \\ &- 2(p_0q_0 + p_1q_1 + p_2q_2 + p_3q_3) = \\ &= (p_0 - q_0)^2 + (p_1 + q_1)^2 + (p_2 + q_2)^2 + (p_3 + q_3)^2. \end{aligned}$$

Для квадрата расстояния между соответствующими векторными кватернионами можно записать

$$R^2 = (q_1 + p_2)^2 + (q_2 + p_2)^2 + (q_3 + p_3)^2.$$

Из последних двух выражений следует, что при условии $p_0 \neq q_0$ учет яркостей точек, задаваемых кватернионами q и p , приводит к росту расстояния между ними на величину

$$\Delta R^2 = R^{2,f} - R^2 = |q_0 - p_0|^2.$$

Такая же тенденция сохраняется и при учете яркостей всех точек КТС $\mathbf{Q}^f = \{q^f(n)\}_{0,s-1}$ и $\mathbf{P}^f = \{p^f(n)\}_{0,s-1}$. При этом

$$\Delta R^2 = R^{2,f} - R^2 = \sum_{n=0}^{s-1} (q_0(n) - p_0(n))^2. \quad (6)$$

Отсюда видно, что учет яркостей точек двух ПГТО при условии различия яркостей хотя бы одной пары их точек всегда приводит к росту расстояния между объектами. Таким образом, на базе аппарата полных кватернионов создается возможность принятия решения о принадлежности пространственно расположенных объектов к разным классам не только по различию форм их изображений, но и по различию их яркостных портретов. В этом плане следует ожидать, что учет значений яркостей точек ПГТО снизит вероятность ложных решений при их распознавании и повысит помехоустойчивость получаемой проволочной модели объекта.

3. Увеличение помехоустойчивости проволочной модели

Проволочная модель ПГТО представляет собой заданный векторными кватернионами замкнутый пространственный контур, проходящий единственным образом через вершины ассоциированного с ПГТО выпуклого многогранника [1]. Построение проволочной модели содержит этап упорядочения (нумерации) граней многогранника и этап упорядочения (нумерации) его вершин. Наиболее критичным к действию координатных помех, случайным образом смещающих вершины многогранника, является первый этап. Если G_{n-1} последняя пронумерованная грань, то последующая, G_n -ая грань назначается из других граней, смежных с G_n . В качестве грани G_n выбирается грань, максимально удаленная по расстоянию от грани G_{n-1} , т.е. грани G_n и G_{n-1} имеют наибольшую несхожесть форм и энергий. В целом ряде случаев наблюдается ситуация, когда все смежные с гранью G_n грани очень похожи между собой по этим признакам. В

этом случае получение проволочной модели ПГТО, задаваемого правильным многогранником, невозможно. Ситуация позитивно меняется, когда точки ПГТО характеризуются различными значениями своих яркостей.

Рассмотрим с этих позиций алгоритм выбора очередной грани G_1 , правильного тетраэдра при известной грани G_0 .

Заданы: 1) кватернионный код Γ_0 контура грани G_0 и кватернионные коды Γ_1 , Γ_2 и Γ_3 граней тетраэдра, смежных с гранью G_0 ; 2) значения яркостей J_0 , J_1 , J_2 и J_3 точек ПГТО, причем $J_1 \neq J_2 \neq J_3 \neq J_4$. **Необходимо** из смежных с G_0 граней одну по критерию максимума расстояния до контура Γ_0 назначить грань G_1 .

Шаг 1. Фильтрация контуров Γ_1 , Γ_2 и Γ_3 кватернионным фильтром, согласованным с контуром Γ_0 . По результатам фильтрации выбирается такой порядок следования ребер в гранях, задаваемых контурами Γ_1 , Γ_2 и Γ_3 , при которых максимизируются реальные части выходных сигналов фильтра. Новые контуры граней обозначим через Γ'_1 , Γ'_2 и Γ'_3 . Переход от контуров Γ_1 , Γ_2 и Γ_3 к контурам Γ'_1 , Γ'_2 и Γ'_3 устраняет различие в расстояниях смежных с G_0 граней, вызванное несовпадающим с G_0 порядком следования ребер. В результате минимизируется расстояние каждого из контуров Γ'_1 , Γ'_2 и Γ'_3 и с контуром Γ_0 грани G_0 .

Шаг 2. Определяем расстояния между гранью G_0 и каждой из трех смежных с ней граней. Поскольку многогранник является правильным тетраэдром, то расстояния $R_{0,1}$, $R_{0,2}$ и $R_{0,3}$ будут одинаковыми, т.е. $R_{0,1} = R_{0,2} = R_{0,3}$. Поэтому любая смежная с G_0 грань может быть выбрана в качестве очередной грани G_1 .

Шаг 3. Для достижения однозначного выбора грани G_1 правильного тетраэдра переходим к описанию граней его контуров полными кватернионами. Новые контуры обозначим как Γ^f_0 , Γ^f_1 , Γ^f_2 и Γ^f_3 .

В соответствии с выражением (6) определяем приращения квадрата расстояния ΔR^2_{01} , ΔR^2_{02} и ΔR^2_{03} между каждым из контуров Γ^f_1 , Γ^f_2 и Γ^f_3 с контуром Γ^f_0 грани G_1 . В результате получаем меры различия

$$R_{01}^2 + \Delta R_{01}^2; \quad R_{02}^2 + \Delta R_{02}^2; \quad R_{03}^2 + \Delta R_{03}^2$$

каждой смежной грани тетраэдра с гранью G_0 . Поскольку $R_{01}^2 = R_{02}^2 = R_{03}^2$, а яркости точек ПГТО отличаются друг от друга, то полученные меры различия смежных граней по отношению к грани G_0 также будут разными. В результате в качестве грани G_1 можно обоснованно выбрать смежную с ней грань с максимальным значением расстояния.

Пример. На рис. 1 представлен правильный тетраэдр с вершинами $a=(0; 0; 0)$, $b=(5; 2.89; 8.16)$, $c=(10; 0; 0)$ и $d=(5; 8.66; 0)$. Грань abd обозначена как G_0 и ее контур в кватернионном представлении имеет вид:

$$\Gamma_0 = \{b-a; d-b; a-d\} = \{5i+2,9j+8,16k; 5,76j-8,16k; -5i+8,66j\}.$$

В качестве грани G_1 необходимо выбрать одну из трех граней abc , acd и abd , имеющих с гранью G_0 общее ребро.

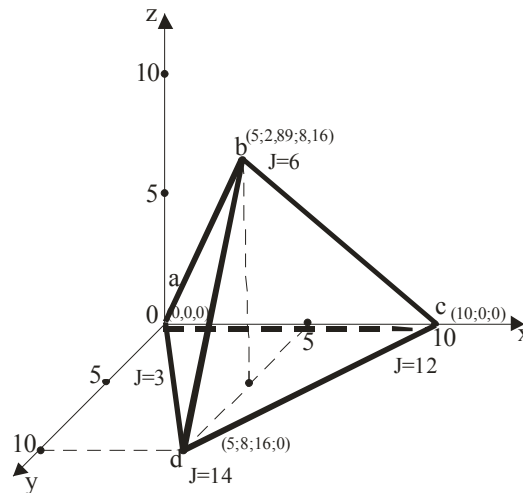


Рис. 1. К упорядочению граней правильного тетраэдра

Шаг 1. Выбор грани G_1 из трех смежных с G_0 граней по критерию максимума расстояния до грани G_0 . Чтобы порядок следования ребер в контурах $\Gamma_1 = \{a, b, c\}$, $\Gamma_2 = \{b, c, d\}$ и $\Gamma_3 = \{a, d, c\}$ не влиял на величину расстояния до грани G_0 , нужно выбрать такую последовательность ребер в контурах Γ_1 , Γ_2 и Γ_3 , при которых расстояние от каждого из них до контура Γ_0 было минимальным. В этом случае полученное значение расстояния будет мерой несхожести контуров, связанной лишь различием задаваемых ими форм и размеров.

Такая задача решается путем фильтрации каждого из контуров Γ_1 , Γ_2 и Γ_3 фильтром, согласованным с контуром Γ_0 . В данном случае такой фильтр в ответ на поданный на его вход контур, например Γ_1 , будет вырабатывать три значения скалярного произведения контуров Γ_1 и Γ_0 , причем первое значение будет соответствовать контуру Γ_1 в виде bca , второе значение – в виде cad , третье – в виде abc . Минимальное расстояние между контурами Γ_1 и Γ_0 будет соответствовать такой последовательности ребер a, b , и c , при которой достигается максимум реальной части полученного скалярного произведения. Определим эти последовательности ребер в контурах Γ_1 , Γ_2 и Γ_3 .

Аналитические представления этих контуров имеют вид:

$$\begin{aligned}\Gamma_1 = \{a, b, c\} &= \{b-a, c-b, a-c\} = \{5i+2,9j+8,16k; 5i-2,9j-8,16k; -10i\}; \\ \Gamma_2 = \{b, c, d\} &= \{c-b, d-c, b-d\} = \{5i-2,89j-8,16k; -5i+8,66k; -5,77j+8,16k\}; \\ \Gamma_3 = \{a, d, c\} &= \{d-a, c-b, a-c\} = \{5i+8,66j; 5i-8,66j; -10i\}.\end{aligned}$$

По результатам согласованной с контуром Γ_0 фильтрации этих контуров максимум реальной части выходного сигнала достигается соответственно в следующих отсчетах:

для контура Γ_1 : $199,9 + 70,67i + 40,8j - 57,8k$;

для контура Γ_2 : $199,9 - 0,16i + 81,16j - 115,5k$;

для контура Γ_3 : $199,9 - 70,7i - 122j + 0,2k$.

При этом следование ребер в этих контурах происходило в следующем порядке:

$$\begin{aligned}\Gamma_1' &= \Gamma_1 = \{a, b, c\} = \{b - a, c - b, a - c\} = \\ &= \{5i + 2,9j + 8,16k; 5i - 2,9j - 8,16k; -10i\}; \\ \Gamma_2' &= \{c, d, b\} = \{c - b, b - c, d - b\} = \\ &= \{5i - 8,66j; -5i + 2,89j + 8,16k; 5,77j - 8,16k\}; \\ \Gamma_3' &= \Gamma_3 = \{a, d, c\} = \{d - a, c - b, a - c\} = \\ &= \{5i + 8,66j; 5i - 8,66j; -10i\}.\end{aligned}$$

Из полученных значений выходных сигналов согласованного фильтра видно, что все они имеют одинаковые значения своих реальных частей, равное 199,9. Так как многогранник является правильным, то нормы контуров всех граней будут тоже одинаковыми. С учетом длин ребер, равных 10, получим, что расстояния всех граней до грани G_0 будут иметь одно и то же значение

$$R^2 = 300 + 300 - 2 \cdot 199,9 = 200,2. \quad (7)$$

Из данного результата следует, что в правильном тетраэдре на основании критерия максимума расстояния смежных граней, заданных векторными кватернионами, до грани G_0 , отсутствует возможность нумерации грани.

Шаг 2. Для нумерации граней правильного тетраэдра воспользуемся информацией о различной яркости его вершин. Примем следующие значения этих яркостей: $J_a = 3$; $J_b = 6$; $J_c = 12$; $J_d = 24$. Тогда полные кватернионные сигналы, задающие грани тетраэдра, будут иметь вид:

$$\begin{aligned}\Gamma_0^f &= \{3 + 5i + 2,9j + 8,16k; 18 + 5,76j - 8,16k; -21 - 5i - 8,66j\}; \\ \Gamma_1^f &= \{3 + 5i + 2,9j + 8,16k; 6 + 5i - 2,9j - 8,16k; -9 - 5i\}; \\ \Gamma_2^f &= \{-6 - 5i + 2,89j + 8,16k; 18 + 5,77j - 8,16k; -12 + 5i - 8,66j\}; \\ \Gamma_3^f &= \{3 + 10i; 12 - 5i + 8,66j; 24 - 5i - 8,66j\}.\end{aligned}$$

В соответствии с выражением (6) учет яркости точек ПГТО приводит к росту квадрата расстояния между контуром Γ_0^f грани G_0 и контурами Γ_1^f , Γ_2^f и Γ_3^f соответственно на величину 288, 362 и 2261. Принимая во внимание (7) расстояния станут соответственно равны 22,09; 19,2 и 47,5. Таким образом, максимальное расстояние будет между контурами Γ_0^f и Γ_3^f и поэтому грань, задаваемая контуром Γ_3^f , будет гранью G_1 .

В рассмотренном примере учет яркостей точек ПГТО позволил осуществить нумерацию граней ассоциированного с ПГТО правильного тетраэдра. В такой ситуации решить подобную задачу, учитывая лишь разницу форм и размеров граней правильного тетраэдра, невозможно. Но и в других ситуациях, когда ассоциированные с ПГТО многогранники являются неправильными телами, часто расстояния между гранями, измеренные без учета яркостей точек, незначительно отличаются друг от друга. В результате сформированная проволочная модель ПГТО обладает низкой помехоустойчивостью.

Поэтому различная яркость точек ПГТО служит полезным информативным признаком, дающим возможность увеличить помехоустойчивость проволочной модели объекта при слабом различии граней многогранника.

Заключение. В данной работе исследовано влияние яркостной информации точек ПГТО на устойчивость его проволочной модели и результаты распознавания в условиях воздействия координатных шумов. Разработана аналитическая модель ПГТО, учитывающая не только пространственные координаты его точек, но и их яркость. Основой модели является полный кватернион, векторная часть которого задает положение точки в пространстве, а вещественная – уровень излучаемой ею энергии – яркость, цвет и др. Показано, что использование яркостного портрета ПГТО повышает устойчивость проволочной модели ПГТО для случаев, когда грани ассоциированного многогранника слабо отличаются друг от друга по форме. Кроме того, яркостный портрет ПГТО дает дополнительную информацию о сходстве/различии распознаваемого и эталонных ПГТО, что увеличивает эффективность распознавания

Список литературы

1. Фурман, Я. А. Распознавание групповых точечных объектов в трехмерном пространстве / Я. А. Фурман, Д. Г. Хафизов // Автометрия. – 2003. – №1. – С. 3-18.
2. Фурман, Я. А. Проволочная модель пространственного группового точечного объекта / Я. А. Фурман, К. Б. Рябинин, М. И. Красильников // Автометрия. – 2008. – №3.
3. Фурман, Я. А. Сегментация и описание трехмерных структур на базе кватернионных моделей // Наукоемкие технологии. – 2007. – №9. – С.8.
4. Комплекснозначные и гиперкомплексные системы в задачах обработки многомерных сигналов / Под ред. Я. А. Фурмана. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – С.456.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 07-01-00058а, 08-01-12000офи, 08-01-00854а).

Статья поступила в редакцию 30.03.09.

R. G. Khafizov, Ya. A. Furman

RESEARCH OF POINTS BRIGHTNESS INFORMATION INFLUENCE OF A SPATIAL GROUP DOT OBJECT ON THE STABILITY OF ITS WIRE MODEL

The analytical model of spatial group dot object, taking into account not only spatial coordinates of its dots, but their brightness as well, is developed. Influence of brightness information of dots of a spatial group dot object on the stability of its wire model and the results of recognition is investigated.

Key words: *spatial group dot object, wire model, quaternion signal, full quaternion.*

ХАФИЗОВ Ринат Гафиятуллович – кандидат технических наук, профессор кафедры радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов. Автор 52 публикаций. E-mail: krtmbs@marstu.net.

ФУРМАН Яков Абрамович – доктор технических наук, профессор кафедры радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов. Автор 141 работы, в том числе пяти монографий. E-mail: krtmbs@marstu.net.

УДК 621.391.266

А. А. Роженцов, А. А. Баев, А. С. Наумов

РАСПОЗНАВАНИЕ И ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МНОГОГРАДАЦИОННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С НЕУПОРЯДОЧЕННЫМИ ОТСЧЕТАМИ

Предложен подход к распознаванию и оценке параметров многоградационных пространственных изображений, базирующийся на формировании их вторичного описания в виде полиномиальных функций, осуществляющих проецирование отметок объекта на единичную сферу. Показана инвариантность формируемых описаний к нумерации отметок в сцене, возможность оценки параметров линейных преобразований объектов и их распознавания на базе получаемых вторичных описаний. Получены характеристики правильного распознавания групповых точечных объектов.

Ключевые слова: *трехмерные объекты, оценка параметров, кватернионный анализ, распознавание, многоградационные изображения, неупорядоченные отметки, проецирование.*

Введение. При использовании для обработки изображений групповых точечных объектов методов контурного анализа предполагается, что каждая отметка представляет собой одну точку в исходной сцене. При этом информация о яркости самой отметки и окружающих ее пикселей не учитывается [1, 2]. На практике в большинстве случаев изображение точечной отметки занимает более одного элемента разрешения изображения. В ряде случаев для повышения точности локализации отметки в сцене производится даже преднамеренная расфокусировка изображения. При этом точке, соответствующей истинному положению отметки, соответствует фрагмент изображения с максимальной яркостью, убывающей по мере удаления от отметки по какому-либо закону, например по экспоненциальному или гауссовому. Исключение из рассмотрения данных о яркости отметок и окружающих их пикселей приводит к потере существенного количества информации и снижению помехоустойчивости, поэтому интерес представляют алгоритмы, сочетающие эффективность контурного анализа и полноту учета яркостной информации.

Целью работы является разработка подходов к обработке изображений пространственных объектов, поверхность которых задана неупорядоченными отсчетами с учетом яркости отдельных отметок.

Методика формирования аналитического описания пространственного объекта с учетом яркости его отметок. Решение данной проблемы возможно на базе подходов, основанных на проецировании отметок групповых точечных объектов (ГТО) на фигуры правильной геометрической формы [3]. В указанных работах для получения проецирующих функций используется метод наименьших квадратов. Он позволяет задавать веса для каждой отметки при вычислении значений ошибок проецирования, в ка-

честве которых могут использоваться яркости соответствующих отметок. Если отказаться от процедуры бинаризации изображения, то при расчете параметров проецирующей функции будут учитываться значения яркости не только самой отметки, но и ряда окружающих ее пикселей, благодаря чему увеличится количество информации, используемой при формировании вторичного описания. Это должно привести к повышению качества принимаемых решений.

Рассмотрим методику формирования проецирующей функции для многоградиционных сцен. Пусть каждый пиксель изображения, учитываемый при формировании вторичного описания, имеет яркость J_n , $n = 0, 1, \dots, N-1$, N – количество пикселей, а его координаты задаются векторным кватернионом $q_n = iq_1 + jq_2 + kq_3 = ix_n + jy_n + kz_n$, $n = 0, 1, \dots, N-1$, где x_n , y_n , z_n – координаты точки в трехмерном пространстве [2, 4] (рис.1).

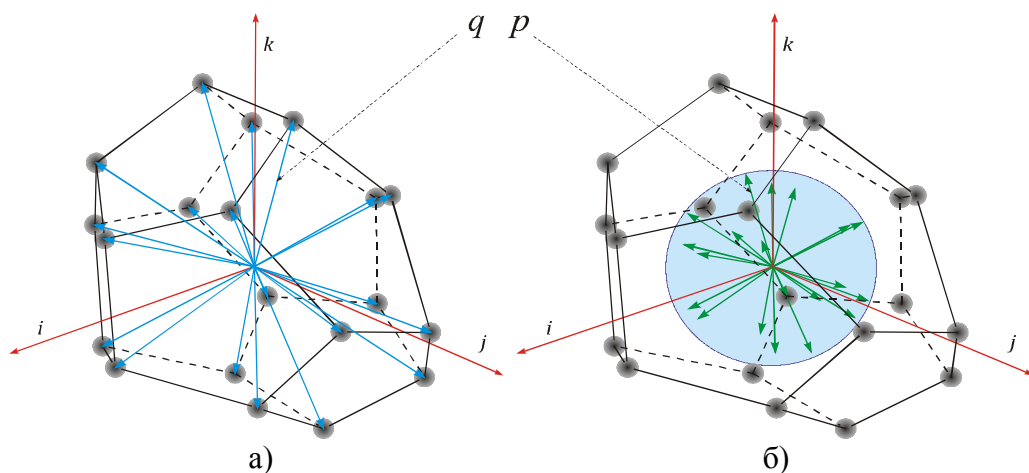


Рис.1. Пространственный объект (а) и результаты проецирования его отсчетов на единичную сферу (б)

Наиболее простыми и, в то же время, достаточно универсальными являются полиномиальные отображающие функции гиперкомплексного переменного вида:

$$\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m = p_n, \quad (1)$$

где a_m – коэффициенты полинома, также являющиеся кватернионами, задающие отображение пространственной фигуры на сферу, p_n – кватернионы, соединяющие точки поверхности объекта с началом координат, q_n – кватернионы с единичными модулями, проведенные к поверхности сферы из начала координат в направлении точек поверхности объекта.

Коэффициенты полинома a_m могут быть найдены с помощью метода наименьших квадратов. В этом случае погрешность аппроксимации значения функции в каждой точке с учетом весового коэффициента, определяемого яркостью, вычисляется по формуле:

$$\varepsilon_n = J_n \left(\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m - p_n \right) \left(\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m - p_n \right), \quad n = 0, 1, \dots, N-1,$$

где N – количество точек. Общая погрешность аппроксимации определяется из соотношения:

$$\varepsilon = \sum_{n=0}^{N-1} \varepsilon_n = \sum_{n=0}^{N-1} J_n \left[\overline{\left(\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m - p_n \right)} \left(\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m - p_n \right) \right]. \quad (2)$$

Для определения значений коэффициентов a необходимо найти частные производные функции (2) по этим параметрам, приравнять их к нулю и решить полученные уравнения относительно коэффициентов a . Указанные преобразования должны выполняться с учетом не коммутативности операции умножения кватернионов и с учетом того, что производная от функции сопряженного гиперкомплексного переменного равна сопряженной функции гиперкомплексного переменного. В результате имеем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial a_r} &= \left(\sum_{n=0}^{N-1} J_n \left[\overline{\left(\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m - p_n \right)} \left(\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m - p_n \right) \right] \right)' = \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} J_n \left[\overline{\left(\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m - p_n \right)}' \left(\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m - p_n \right) + \overline{\left(\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m - p_n \right)} \left(\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m - p_n \right)' \right] = \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} J_n \left[\overline{q_n^r} \left(\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m - p_n \right) + \overline{\left(\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m - p_n \right)} q_n^r \right] = \\ &= \sum_{n=0}^{N-1} J_n \left[\overline{\left(\sum_{m=0}^{M-1} q_n^r q_n^m a_m \right)} - \overline{q_n^r} p_n + \left(\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m q_n^r \right) - p_n q_n^r \right] = \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} \left(\sum_{n=0}^{N-1} J_n \left[\overline{q_n^r q_n^m a_m} - \overline{q_n^r} p_n \right] \right) + \sum_{n=0}^{N-1} J_n \left[\overline{q_n^m a_m q_n^r} - \overline{p_n q_n^r} \right] = \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} \left(\sum_{n=0}^{N-1} J_n \left[\overline{q_n^r q_n^m a_m} - \overline{q_n^r} p_n \right] \right) + \sum_{n=0}^{N-1} J_n \left[\overline{q_n^r q_n^m a_m} - \overline{q_n^r} p_n \right]. \end{aligned}$$

В последнем выражении суммы $\sum_{n=0}^{N-1} J_n \left[\overline{q_n^r q_n^m a_m} - \overline{q_n^r} p_n \right]$ и $\sum_{n=0}^{N-1} J_n \left[\overline{q_n^r q_n^m a_m} - \overline{q_n^r} p_n \right]$ совпадают с точностью до комплексного сопряжения, поэтому коэффициенты a_m могут быть найдены с учетом любого из этих выражений. В результате окончательно можно записать:

$$\sum_{m=0}^{M-1} \left(\sum_{n=0}^{N-1} J_n \left[\overline{q_n^r q_n^m a_m} - \overline{q_n^r} p_n \right] \right) = 0, \quad r = 0, 1, \dots, M-1.$$

Данное выражение задает систему из M линейных кватернионных уравнений и может быть преобразовано к виду:

$$\sum_{m=0}^{M-1} \left(\sum_{n=0}^{N-1} J_n \overline{q_n^r q_n^m} \right) a_m = \sum_{n=0}^{N-1} J_n \overline{q_n^r} p_n, \quad r = 0, 1, \dots, M-1.$$

В матричном виде система линейных кватернионных уравнений запишется в виде:

$$\mathbf{q}\mathbf{a} = \mathbf{p},$$

где

$$\mathbf{q}_{r,m} = \sum_{n=0}^{N-1} J_n \overline{\mathbf{q}_n^r} \mathbf{q}_n^m, \mathbf{p}_r = \sum_{n=0}^{N-1} J_n \overline{q_n^r} p_n, r = 0, 1, \dots, M-1.$$

В результате решения системы уравнений будут определены значения коэффициентов a_m полиномиальной функции, $m = 0, 1, \dots, M-1$, выполняющей отображение пространственной фигуры на сферу.

Обработка изображений с неизвестными параметрами масштабирования и вращения. При изменении масштаба изображения каждый отсчет q_n умножается на некоторый масштабный множитель μ , т.е.

$$q_n^{(\mu)} = \mu q_n. \quad (3)$$

Можно показать, что оценка масштаба в этом случае может быть получена из выражения

$$\mu = \sqrt[m]{\frac{a_m}{a_m^{(\mu)}}}. \quad (4)$$

При вращении объекта каждый его вектор поворачивается на некоторый угол вокруг общей для всех векторов оси вращения. Аналитически вращения векторов с использованием алгебры кватернионов описываются в виде [2]:

$$q_n^{(b)} = b q_n b^{-1}.$$

Коэффициенты эталонной проецирующей функции a_m будут связаны с коэффициентами проецирующей функции $a_m^{(b)}$ для повернутого объекта соотношением:

$$b^{-1} a_m^{(b)} b = a_m.$$

Эта взаимосвязь позволяет выполнять оценку параметров вращений на основе анализа коэффициентов проецирующих функций [5].

Распознавание пространственных объектов. При распознавании пространственных объектов на вход распознающего устройства поступают отсчеты, задающие координаты точек поверхности объекта в пространстве. Устройство должно принять обоснованное решение о принадлежности распознаваемого объекта к одному из эталонных классов. В качестве величины, характеризующей меру схожести объектов, может выступать величина скалярного произведения между коэффициентами проецирующего полинома эталонного и обрабатываемого объектов:

$$\eta = \sum_{m=0}^{M-1} a_m a_m^{*(\varepsilon)}. \quad (9)$$

Если параметры линейных преобразований неизвестны, то необходимо предварительно выполнить их оценку, произвести обратную коррекцию аналитического описания распознаваемого объекта и вычислить меру схожести в соответствии с (9).

На рис.2,а приведен тестовый объект, результат его проецирования на сферу и (рис.2,б) характеристики его распознавания для случаев расчета коэффициентов без учета и с учетом яркости отдельных отметок (рис.2, в). Во втором случае предполагалось, что вокруг каждой из отметок существует «облако» точек, яркость которых уменьшается по мере удаления от центра по гауссовому закону:

$$J(r) = J \exp\{-\alpha r^2\}, \quad (10)$$

где J – яркость отметки в центре «облака», r – расстояние от центра «облака», α – декремент затухания. Величина отношения сигнал/шум определялась из соотношения

$$q = \frac{\|Q\|^2}{\sigma_{\text{кш}}^2 N}, \quad (11)$$

где $\sigma_{\text{кш}}$ – величина среднеквадратического отношения координатного шума.

Для имитации влияния яркостного шума выполнялось зашумление значений яркости отметок. Предполагалось, что все отметки в центрах «облаков» имеют одинаковые яркости $J = 1$, а отношение сигнал/яркостный шум определялось по формуле:

$$q = \frac{J}{\sigma_{\text{яш}}}.$$

Как видно из полученных результатов, использование дополнительной яркостной информации позволяет существенно улучшить характеристики распознавания изображений пространственных объектов. Особенно заметен этот эффект будет при появлении ложных отметок. Поскольку ложная отметка, как правило, занимает один пиксель, а не группу, то ее вклад в формирование вторичного описания будет пренебрежимо мал, поэтому учет яркостной информации позволяет значительно улучшить характеристики правильного распознавания в условиях возникновения ошибок обнаружения.

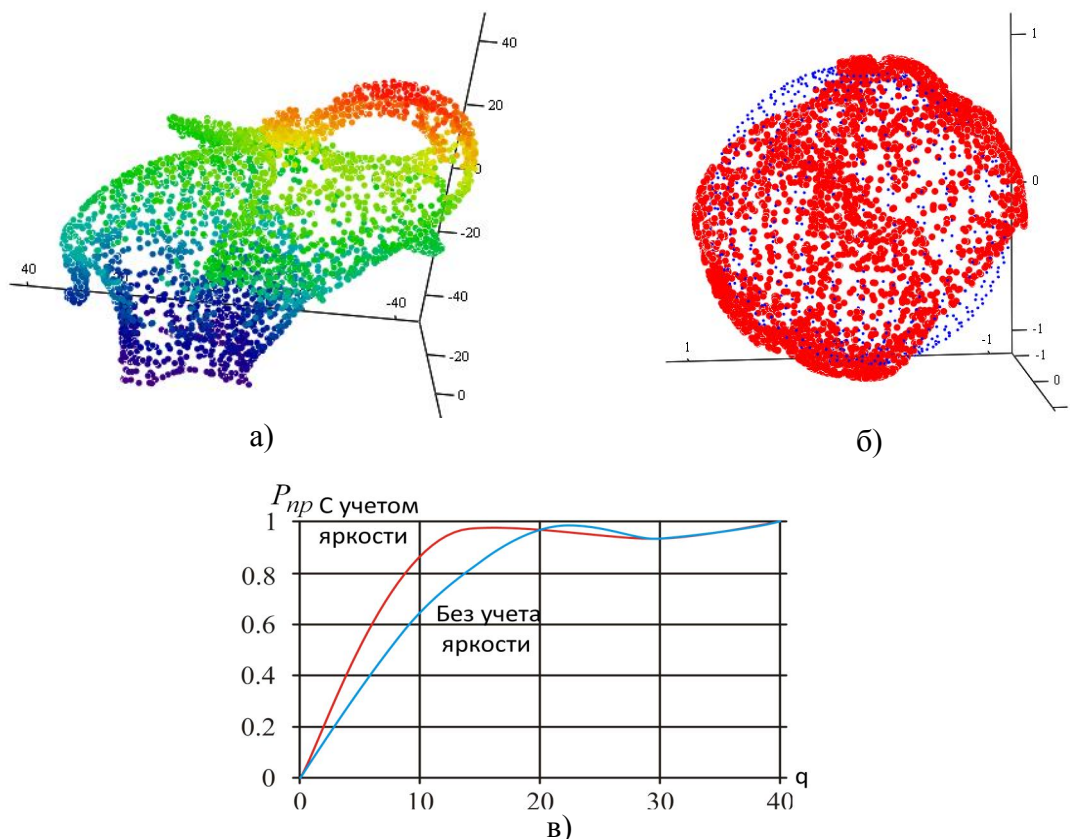


Рис.2. Изображение эталонного объекта (а), результат его проецирования на сферу (б) и характеристики распознавания (в)

Таким образом, учет яркости отдельных отметок при формировании проецирующей функции позволяет значительно улучшить характеристики правильного распознавания пространственных объектов

Заключение. В работе предложен подход к распознаванию изображений пространственных объектов с неупорядоченными отсчетами с учетом яркости отдельных отметок, задающих поверхность объекта. Методика базируется на формировании вторичного описания пространственного объекта в виде коэффициентов полиномиальной функции гиперкомплексного переменного, проецирующей его отсчеты на поверхность единичной сферы.

Показана возможность решения задач оценки параметров преобразований масштабирования и вращения пространственных объектов и задачи распознавания. Получено, что за счет учета яркостной информации для достижения необходимой надежности распознавания удастся снизить в 1,5–2 раза требуемое значение отношения сигнал/шум, а также повышается устойчивость системы распознавания к влиянию импульсных помех

Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют судить о достаточно высокой эффективности предлагаемых подходов к обработке пространственных изображений с неупорядоченными отсчетами.

Список литературы

1. Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов / Я. А. Фурман, А. К. Передреев, А. В. Кревецкий и др.; Под ред. Я. А. Фурмана. – М.: Наука, 2002. – 592 с.
2. Комплекснозначные и гиперкомплексные системы в задачах обработки многомерных сигналов / Я. А. Фурман, А. В. Кревецкий, А. А. Роженцов и др.; Под ред. Я. А. Фурмана. – М.: Наука, 2004. – 456 с.
3. *Роженцов, А. А.* Решение проблемы распознавания и оценки параметров 3D изображений при неизвестной нумерации отсчетов их контуров / А. А. Роженцов, Е. И. Мазанов, А. А. Баев // Доклады 10-й Международной конференции: Цифровая обработка сигналов и ее применение. – М., 2008. – X-2. – С. 432-434.
4. *Кантор, И. А.* Гиперкомплексные числа / И. А. Кантор, А. С. Солодовников – М.: Наука, 1973.
5. *Rozhentsov, A. A.* Estimation of 3D images parameters set by disordered readouts / A. A. Rozhentsov, A. A. Bayev // 9th Int. Conf. on "Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies". – N. Novgorod, 2008. – Conference Proceedings. – Vol. 2. – Pp.133-135.
6. *Гантмахер, Ф. Р.* Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. – М.: Наука, 1966. – 576.
7. *Корн, Г.* Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М: Наука, 1968.
8. Визуализация изображений в трехмерных сценах: учебное пособие / Я. А. Фурман. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2007. – 280 с.
9. *Роженцов А. А.* Распознавание плоских изображений групповых точечных объектов с неупорядоченными отметками / А. А. Роженцов, С. Н. Крылов, А. А. Баев // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы». – 2008. – №3. – С. 48 – 55.

Статья поступила в редакцию 30.03.09.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 08-01-00854-а, №07-01-00058, и по программе «Развитие научного потенциала высшей школы», проект 2.1.2/2204.

A. A. Rozhentsov, A. A. Bayev, A. S. Naumov

**RECOGNITION AND ESTIMATION OF PARAMETERS OF
MULTIGRADATIONAL SPATIAL
IMAGES WITH THE DISORDER READOUT**

The approach to recognition and estimation of parameters of the multigradational spatial images based on the formation of their secondary description as polynomial functions mapping object marks on an individual sphere is offered. Invariancy of the descriptions formed to numbering marks in a scene, an opportunity of estimating the parameters of linear transformations of objects and their recognition is shown on the basis of secondary descriptions obtained. Characteristics of correct recognition of group dot objects are received.

Key words: *three-dimensional objects, estimation of parameters, quaternion analysis, recognition, the multigradational images, disordered marks, mapping.*

РОЖЕНЦОВ Алексей Аркадьевич – доктор технических наук, зав. кафедрой радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов. Автор более 90 научных публикаций. E-mail: krtmbs@marstu.net.

БАЕВ Алексей Александрович – аспирант кафедры радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов. Автор 11 научных публикаций. E-mail: krtmbs@marstu.net.

НАУМОВ Александр Сергеевич – аспирант кафедры радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов. Автор 6 научных публикаций. E-mail: krtmbs@marstu.net.

УДК 621.391.266

Ю. Е. Гарипова

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА И ВЫДЕЛЕНИЕ КОНТУРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ В СЦЕНАХ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТОМОГРАФИИ

Рассмотрены подходы к улучшению изображений органов малого таза. Предложен алгоритм локализации области поиска изображения предстательной железы. Выполнен контурный анализ томограмм по результатам их предварительной обработки.

Ключевые слова: сцены рентгеновской томографии, контурный анализ, улучшение изображений, предварительная обработка, локализация области поиска, изображения органов малого таза, предстательная железа.

Введение. Современная медицинская практика владеет множеством средств, позволяющих производить эндоскопические исследования неинвазивно. Однако для того, чтобы применить результаты данных исследований в ходе операции, хирург должен самостоятельно их интерпретировать и выстроить модель внутренних органов, опираясь на личный опыт и мастерство. При выполнении трансуретральной резекции предстательной железы отсутствует видимость ее капсулы, что может стать причиной нежелательного внутриполостного кровотечения [1].

Возникает задача автоматического определения местоположения резектоскопа хирурга в теле железы. Для ее решения необходимо выстроить трехмерную модель предстательной железы и расположенной в ней уретры. При этом удобно использовать изображения рентгеновского компьютерного томографа. Процесс формирования трехмерной сцены, основанный на контурном анализе томограмм органов малого таза, описан в [2].

Целью данной работы является разработка подходов к улучшению томографических изображений органов малого таза с последующим выделением контуров предстательной железы в серии смежных срезов. Данная проблема вызвана тем, что в качестве сканирующего излучения используется рентген, поэтому мягкие ткани различной природы (мышцы, жировая ткань, эластичные ткани и др.) имеют практически одинаковую яркость, что значительно затрудняет процесс обработки томографических изображений.

1. Локализация области поиска изображения предстательной железы

Томографическое изображение органов малого таза размерности $X \times Y$ представляет собой матрицу пикселей $s(x, y)$, $x = 0..X-1$, $y = 0..Y-1$, яркость $I(x, y)$ которых варьируется в пределах 256 градаций серого.

На рис. 1 представлены томограммы органов малого таза для трех разных пациентов, полученные при помощи рентгеновского компьютерного томографа. Следует отметить, что наиболее контрастными объектами здесь являются костные образования. Мягкие ткани, независимо от своей структуры, имеют близкие по величине значения яркости.

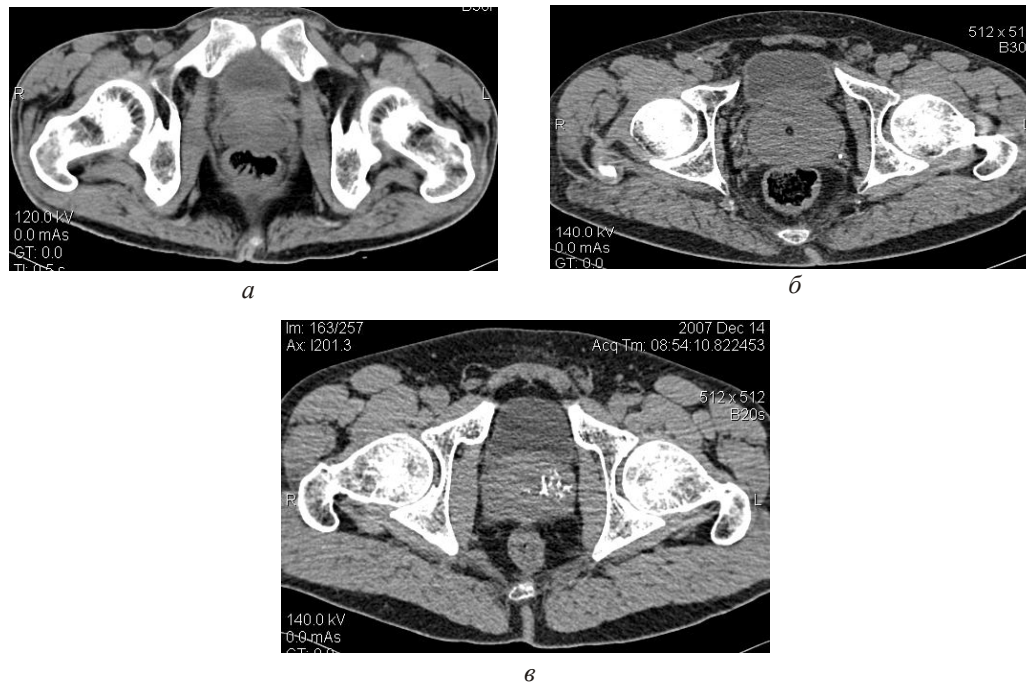


Рис. 1. Томографические изображения органов малого таза для трех пациентов

Для выделения контура предстательной железы на первом этапе следует ограничить область поиска как количеством томограмм, включающих в себя изображение железы, так и их размером. При этом необходимо учитывать анатомические особенности строения и расположения предстательной железы в теле. Железа расположена в центре таза, циркулярно охватывает шейку мочевого пузыря и прилегающий к нему отдел уретры. Верхней частью железа соприкасается с тазовой диафрагмой, а с другой стороны – граничит с ампулой прямой кишки. По своей форме и величине она напоминает каштан. Наибольший поперечный размер предстательной железы равен в среднем 3,5 см, переднезадний – 2 см, вертикальный – 3 см [3].

Ограничение количества томограмм основано на анализе динамики изменения размера контура предстательной железы в смежных срезах. Общее количество срезов определяется их толщиной, которая может варьироваться от 1 до 5 мм. При этом необходимо определить систему отсчета или, другими словами, номер среза r , от которого начнется послойный контурный анализ томограмм. Изображение среза должно быть таким, чтобы предстательная железа на нем была минимально окружена мягкими тканями и наилучшим образом выделялась в ходе контурного анализа.

Для определения системы отсчета удобно использовать изображения костных образований. Это связано с тем, что при использовании рентгеновского излучения для формирования томограмм костные образования максимально препятствуют прохождению лучей к приемнику излучения. Поэтому на томограммах органов малого таза наиболее отчетливо можно выделить объекты, принадлежащие костям тазового пояса и бедренным костям. На рис. 1 приведены томограммы, включающие изображения головок бедренных костей, лонные (рис. 1, а) и седалищные кости, копчик.

Следует отметить, что предстательная железа наилучшим образом наблюдается на срезах, регистрируемых ниже мочевого пузыря на уровне седалищных и головок бедренных костей. Томографический срез, содержащий изображение предстательной железы и являющийся началом системы отсчета для построения ее трехмерной модели, будем называть «нулевым». Для определения «нулевого» среза необходимо использовать такие объекты, форма которых является уникальной и слабо изменяется в зависимости от веса и роста человека. Изображение головки бедренной кости полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям.

На вход схемы локализации области поиска предстательной железы (рис. 2, а) подается набор изображений органов малого таза. В формирователе осуществляется их пороговая обработка. Сформированные контуры $\Gamma^r = \{\gamma^r(n)\}_{0,s^r-1}$, принадлежащие контурной сцене J^r , подаются на входы согласованных фильтров. На вторые входы согласованных фильтров подаются эталонные контуры левой и правой головок бедренных костей (рис. 2, б).

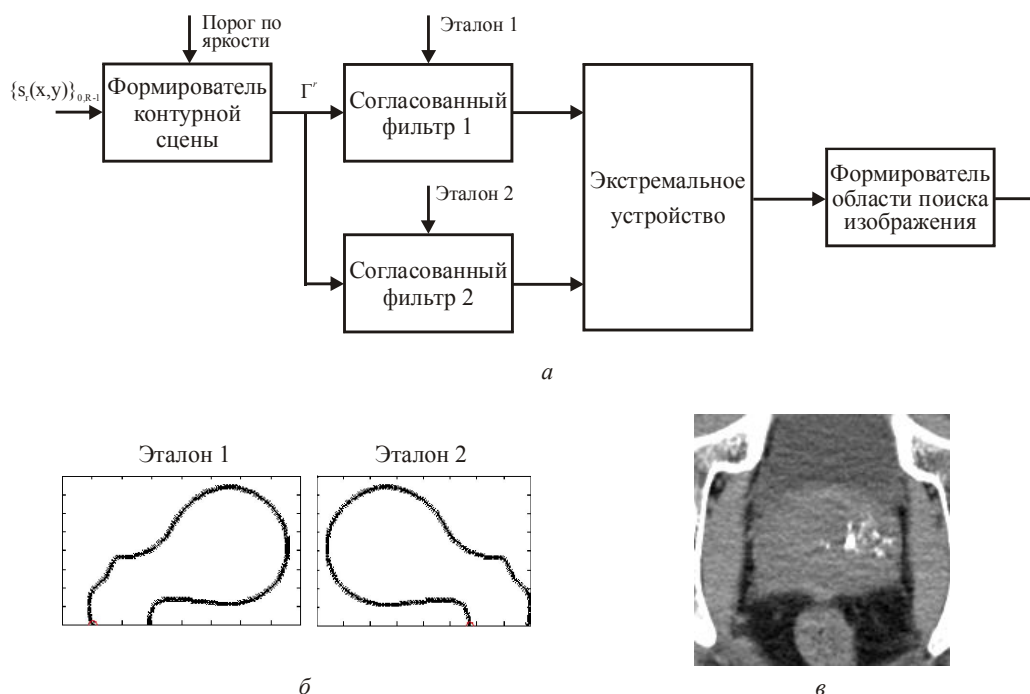


Рис. 2. Схема локализации области поиска изображения предстательной железы (а), изображения эталонных контуров (б), результат работы схемы (в)

Ограничение размера изображений возможно благодаря тому, что усредненные размеры предстательной железы известны априорно и при возникновении опухоли изменяются не значительно. Таким образом, можно задать значения координат, соответствующие левой верхней и правой нижней границам нового локализованного изображения. Результат работы схемы представлен на рис. 2, в.

2. Улучшение томограмм органов малого таза

Разработка подходов к улучшению томографических изображений базируется на анализе их особенностей, статистических характеристик наблюдаемых на изображениях объектов, законов распределения пикселей, образующих изображения предстательной железы и фона.

Функция яркости томографических изображений органов малого таза, представленная на рис. 3, является усредненной и построена на основе серий томограмм, соответствующих разным пациентам. При ее анализе выяснилось, что пиксели, образующие изображения мышечных тканей, мочевого пузыря и предстательной железы, имеют схожие по яркости значения. Данное обстоятельство объясняет трудности, возникающие в ходе контурного анализа исследуемых томограмм.

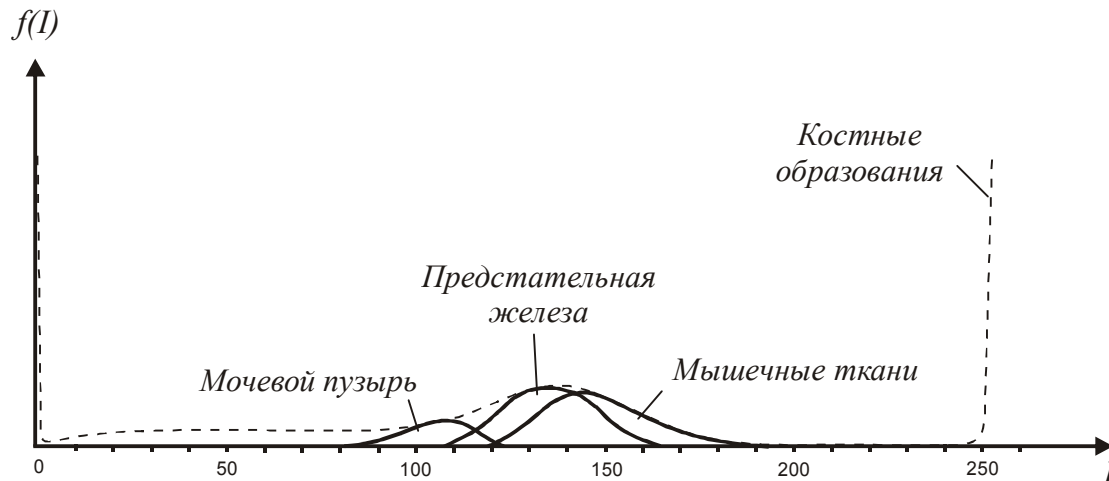


Рис. 3. Функция распределения яркости пикселей на томограммах органов малого таза

Исследование статистических характеристик изображений показало, что средняя яркость изображения железы варьируется в пределах от 115 до 150, средняя яркость изображения мочевого пузыря – от 95 до 118, а средняя яркость изображения мышечных тканей – от 137 до 149. Величина дисперсии, характеризующая тот или иной объект, изменяется в большом диапазоне значений и не имеет какой-либо закономерности. Например, значения дисперсии пикселей, образующих изображения предстательной железы на разных сериях томограмм, изменяются от 100 до 320, а для изображений мочевого пузыря эта величина составляет от 80 до 350. Такой разброс значений можно объяснить влиянием индивидуальных особенностей строения тела пациента, а также различиями в протекании заболевания и развитии опухолевых образований. При этом нельзя однозначно сказать, по какому закону распределена яркость пикселей вышеперечисленных объектов.

Существует множество методов предварительной обработки изображений. Выбор каждого из них зависит от характера обрабатываемых изображений, особенностей формы искомых объектов и характера фона. При улучшении томографических изображений органов малого таза необходимо решить несколько проблем:

- устранить неоднородность изображения предстательной железы, вызванную особенностями ее гистологического строения и спецификой метода регистрации;
- повысить контраст изображения железы по отношению к окружающим его объектам.

Для решения первой проблемы необходимо применение сглаживающих фильтров. В рамках данной работы использовались низкочастотные сглаживающие и медианный фильтры с различными величинами апертур.

Следует отметить, что медианная фильтрация при сглаживании изображений является более предпочтительной. Анализ дисперсии яркости пикселей изображений до фильтрации и после показал, что эта величина уменьшается. Однако при использова-

нии медианного фильтра с заданным размером апертуры дисперсия несколько меньше, чем при использовании низкочастотного фильтра с апертурой того же размера. Кроме того, медианный фильтр оказывает меньшее влияние на величину средней яркости. Например, для изображения предстательной железы величины средней яркости и дисперсии до фильтрации составили $I_{0,1} = 125,7$, $D_{0,1} = 96$, на выходе медианного фильтра – $I_{0,2} = 125,8$, $D_{0,2} = 63,2$, на выходе низкочастотного фильтра – $I_{0,3} = 125,4$ и $D_{0,3} = 71$.

Вторая проблема обусловлена изменением динамического диапазона изображений, содержащих искомый объект. Для ее решения было рассмотрено несколько подходов. Первый метод связан с применением кусочно-линейных функций преобразования [4]. Выбор данного метода основан на том, что яркости пикселей изображений железы, мочевого пузыря и мышечных тканей расположены в достаточно узком интервале значений (в среднем от 90 до 200). Таким образом, возможно повышение контраста объектов, лежащих в данном яркостном диапазоне. При этом значения яркости будут определяться согласно передаточной функции (рис. 4, а) по следующей формуле:

$$I_{\text{КЛФ}}(x, y) = (I(x, y) - a) \frac{256}{\Delta},$$

где $I_{\text{КЛФ}}(x, y)$ – яркость пикселей изображения после преобразования, $\Delta = (b - a)$ – интервал яркостей, содержащий информативные объекты, $a = 90$, $b = 200$.

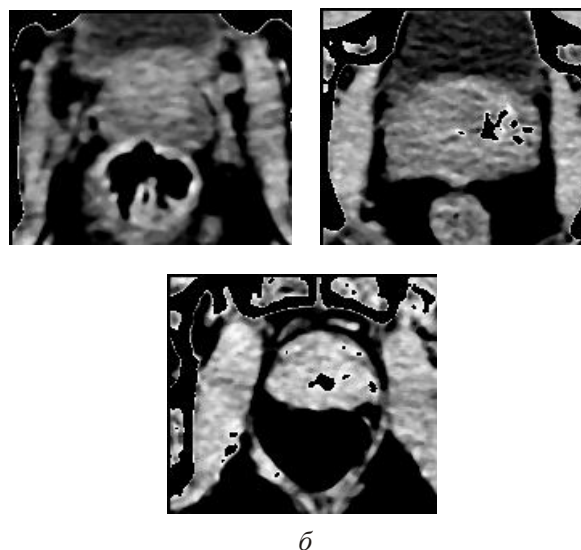
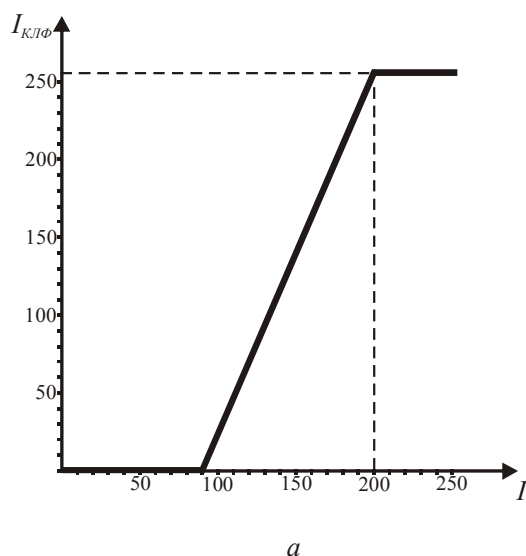


Рис. 4. Кусочно-линейная функция преобразования яркости пикселей изображений предстательной железы (а), результат преобразования (б)

На рис. 4, б представлен результат преобразования локализованных изображений для трех пациентов. В целом изображение предстательной железы становится более контрастным. Однако для тех пациентов, у которых наблюдались уплотнения ткани железы (пациент 2 и 3), наблюдается неоднородность и на изображении. Это вызвано тем, что пиксели уплотненных тканей имеют яркость выше верхнего порога b . При этом дальнейшее увеличение этого значения приведет к увеличению дисперсии яркости пикселей, и, следовательно, к ухудшению контурных сцен для данных изображений.

Другой метод, позволяющий изменить функцию яркости изображений, основан на эквализации гистограммы яркости пикселей. В основе данного метода лежат следующие принципы. Уровни яркости могут рассматриваться как значения случайной величины в интервале от 0 до 1.

Пусть r – распределение случайной величины в интервале от 0 до 1, соответствующее распределению яркости пикселей на изображениях органов малого таза в диапазоне от 0 до 255, а s – распределение случайных переменных для преобразованного сигнала. Тогда плотность распределения вероятностей $p_s(s)$ значений преобразованного сигнала s может быть получена с помощью формулы

$$p_s(s) = p_r(r) \left| \frac{dr}{ds} \right|.$$

Таким образом, плотность распределения вероятностей значений преобразованного сигнала s задается плотностью распределения вероятностей значений яркостей входного изображения и выбранной функцией распределения. Функция распределения задается выражением

$$T(r) = \sum_{j=0}^{k-1} p_r(r_j) = \sum_{j=0}^{k-1} \frac{n_j}{n},$$

где $j=0, 1, \dots, k-1$, k – максимально допустимое число уровней яркости на изображении, n_j – число точек яркости r_j , n – общее число пикселей на изображении.

Выстроенные таким образом функции преобразования яркости пикселей изображений представлены на рис. 5. Данный метод позволяет в автоматическом режиме выстраивать индивидуальные передаточные функции для каждого конкретного изображения. Улучшенные изображения представлены на рис. 5. Достоинством данного метода является инвариантность к возникающим на изображениях железы «уплотнениям». Однако следует отметить, что изображения, полученные в результате улучшения с использованием кусочно-линейной функции преобразования, являются более контрастными.

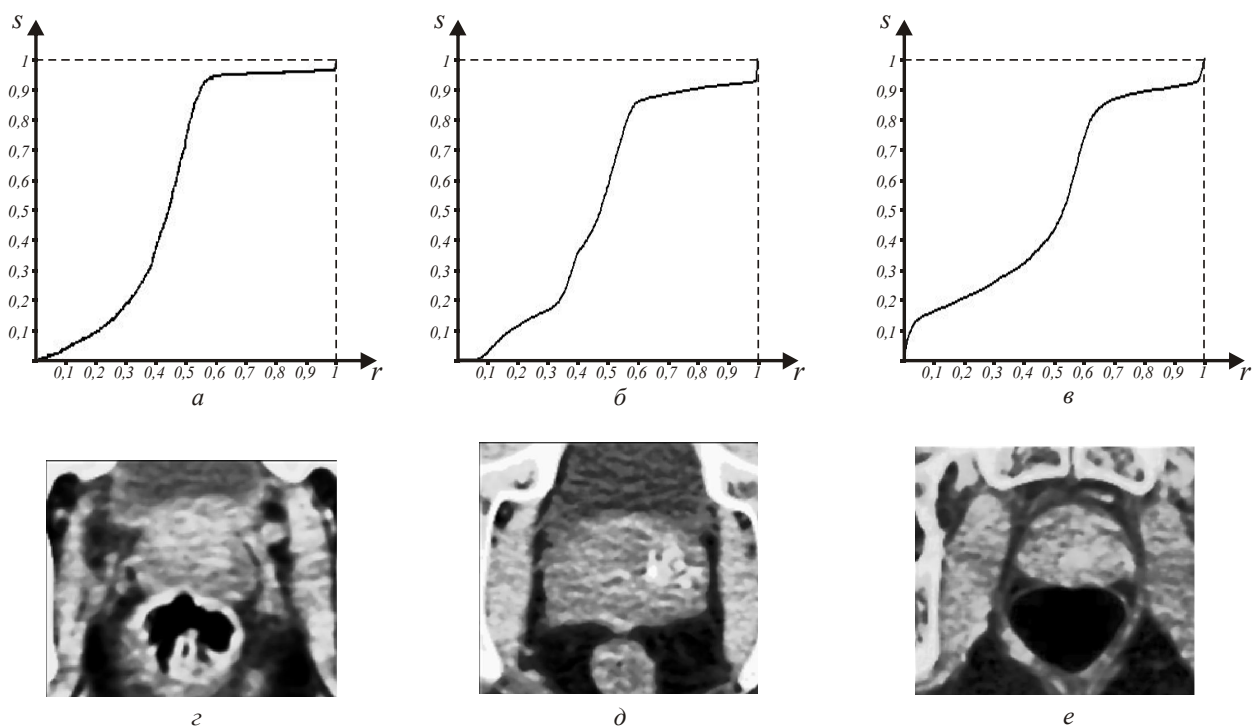


Рис. 5. Передаточные функции (а, б, в) для трех изображений предстательной железы разных пациентов и результаты эквализации гистограммы яркостей пикселей (г, д, е) соответственно

3. Выделение контуров изображений предстательной железы

Этап контурного анализа изображений подразумевает формирование контуров предстательной железы на предварительно обработанных изображениях с учетом смежных срезов. При этом сложность вызывает процедура формирования порога, на основе которого будут получены контурные сцены. Так как томографические изображения предстательной железы характеризуются сложным фоном, необходимо использовать алгоритм локально-оптимального формирования порога, описанный в [5].

На рис. 6 представлен результат контурного анализа улучшенных изображений органов малого таза. В первом случае (рис. 6, а, б, в) улучшение производилось с применением эквализации гистограммы яркости пикселей, а во втором (рис. 6, г, д, е) – кусочно-линейной функции преобразования. Данные процедуры производились с изображениями, предварительно обработанными медианным фильтром.

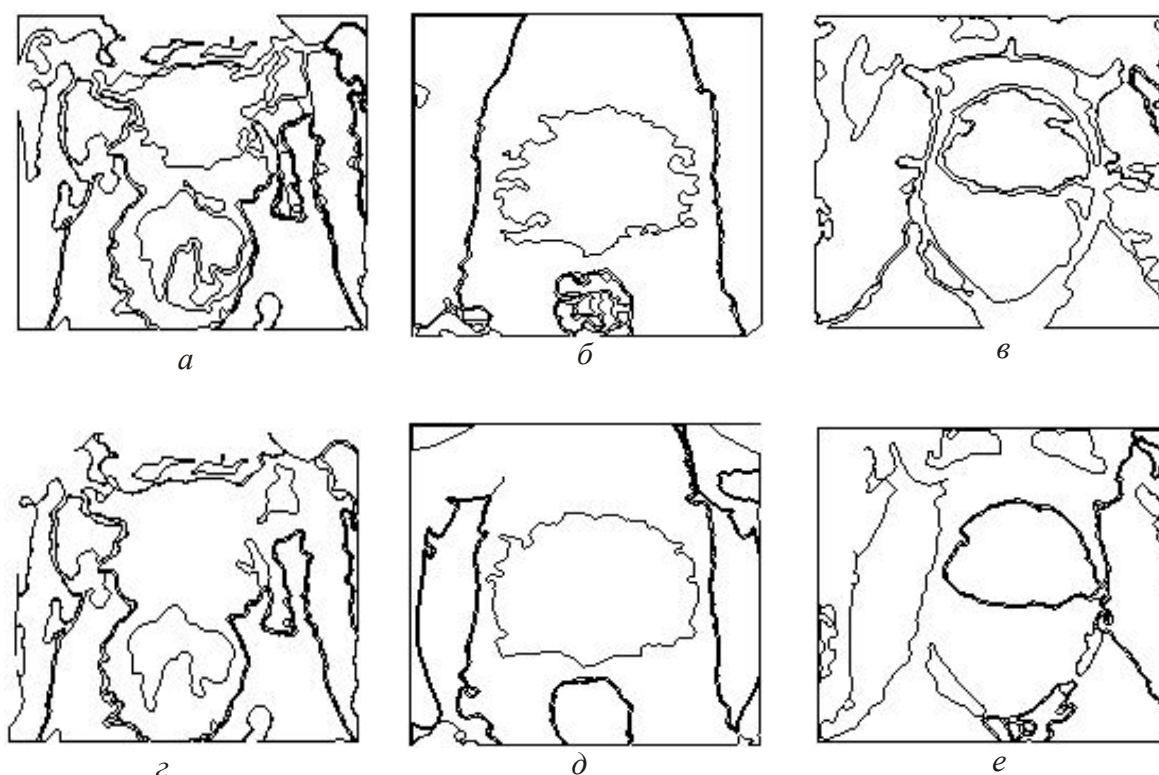


Рис. 6. Результаты контурного анализа улучшенных изображений:
а, б, в – после эквализации гистограммы яркости пикселей;
г, д, е – после применения кусочно-линейной функции преобразования

В ходе анализа контурных сцен выяснилось, что применение кусочно-линейной функции преобразования в сочетании с медианной фильтрацией является более предпочтительным методом для улучшения изображений предстательной железы, нежели эквализация гистограммы яркости пикселей. Полученные таким образом контуры точнее описывают форму предстательной железы.

Тем не менее, в некоторых случаях (рис. 6, а, г) обнаружение контура железы затруднено из-за того, что окружающие ткани плотно прилегают к капсуле предстательной железы. Поэтому данная процедура производится в полуавтоматическом режиме под контролем эксперта. Следует отметить, что построение модели железы проводится на этапе предварительного осмотра пациента и поэтому не требует разработки алго-

ритмов, способных работать в реальном масштабе времени. Это, в свою очередь, позволяет достичь высокого качества реконструируемой модели.

Заключение. Предложена методика предварительной обработки изображений органов малого таза с целью построения трехмерной модели предстательной железы на основе данных компьютерного томографа. Разработан алгоритм локализации области поиска изображения железы, а также методы улучшения локализованных изображений. Произведен контурный анализ томограмм для нескольких пациентов с применением локально-оптимальной процедуры формирования порогового уровня. Применение кусочно-линейной функции преобразования в сочетании с медианной фильтрацией на этапе улучшения изображений предстательной железы дает наилучший результат при получении ее контуров.

Список литературы

1. Дубровин, В. Н. Малоинвазивные операции с использованием лапароскопического и мини-доступа в урологии / В. Н. Дубровин, А. В. Табаков, Г. А. Мельник и др. // Материалы Уральской межрегиональной конференции хирургов «Хирургия мини-доступа». – Екатеринбург, 2005.
2. Хафизов, Р. Г. Информационная технология визуализации и многоцелевого анализа пространственных динамических изображений предстательной железы для подготовки и проведения трансуретральной операции / Р. Г. Хафизов, Ю. Е. Третьякова // Вестник МарГТУ. Серия «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы». – 2008. – №2. – С. 27-34.
3. Лопаткин, А. Н. Урология / А. Н. Лопаткин. – М.: Медицина, 1995. – 496 с.
4. Гонсалес, Р. Цифровая обработка сигналов / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
5. Фурман, Я. А. Введение в контурный анализ / Под ред. Я. А. Фурмана. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 592 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 08-01-12000офи, 07-01-00058а, 08-01-00854а).

Статья поступила в редакцию 20.03.09.

Yu. Ye. Garipova

PRELIMINARY PROCESSING AND ALLOCATION OF CONTOURS OF A PROSTATE GLAND IMAGES IN THE SCENES OF X-RAY TOMOGRAPHY

Approaches to improvement of images of lesser pelvis bodies are considered. The algorithm for localizing the area of a prostate gland image search is offered. The planimetric analysis of tomograms by the results of their preliminary processing is executed.

Key words: *scenes of an x-ray tomography, planimetric analysis, improvement of images, preliminary processing, localizing of the search area, the image of lesser pelvis bodies, prostate gland.*

ГАРИПОВА Юлия Евгеньевна – аспирант кафедры радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений. Автор четырех публикаций. E-mail: krtmbms@marstu.net.

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 004.31

В. Т. Изиков

ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОРОВ, УПРАВЛЯЕМЫХ ПОТОКОМ ДАННЫХ

Построено дерево основных архитектурных и структурных элементов функционально ориентированных процессоров потоков данных (ФОП ПД), являющееся компактным средством представления информации о множестве существующих и возможных технических решений ФОП ПД, позволяющее производить синтез новых архитектурно-структурных решений ФОП ПД.

Ключевые слова: процессоры потоков данных (data flow), функционально ориентированные процессоры, синтез новых технических решений.

Введение. Для решения задач аэрогидродинамики, гидроакустики и радиолокации, сейсморазведки, метеорологии, управления быстрыми динамическими объектами, моделирования сплошной среды, решения экономических задач и ряда других требуются вычислительные системы (ВС) с очень высокой производительностью [1, 2]. Причем, значительный объем вычислений составляют задачи вычислительного характера, имеющие большое количество арифметических операций и вычисления значений элементарных и специальных функций с высокой точностью над операндами, представленными в формате с плавающей запятой.

Одним из путей повышения производительности ВС является включение в состав многопроцессорных ВС функционально ориентированных процессов (ФОП), предназначенных для эффективной реализации достаточно сложных функций, имеющих большой удельный вес в алгоритмах решаемых задач. Эффективная реализация функций в ФОП достигается применением высокопроизводительных методов и алгоритмов вычисления функций и созданием ФОП с архитектурой и структурой, адекватным выбранным алгоритмам реализации функций. При этом одновременно необходимо решать задачи повышения производительности и увеличения функциональных возможностей ФОП, так как введение в состав ВС различных ФОП приводит к увеличению аппаратных затрат, увеличению сроков изготовления, и, в конечном итоге, стоимости включения ФОП в состав ВС.

Одним из путей решения этих задач является создание модульных ФОП, способных увеличивать производительность и функциональные возможности путем увеличения

числа используемых модулей при их небольшой номенклатуре. Можно выделить два направления для достижения этой цели.

Одним из них является создание модульных ФОП с традиционной архитектурой, использующих принципы микропрограммного управления, магистральности, регулярности и некоторые другие.

Другое направление связано с созданием многопроцессорных ФОП с нетрадиционной архитектурой и структурой, способных реализовать параллельные алгоритмы вычисления значений функций с максимальным естественным параллелизмом, достигая производительности специализированных процессоров при сохранении широких функциональных возможностей. Одним из перспективных в этом плане направлений является создание ФОП, управляемых потоком данных (ФОП ПД). Принцип управления потоком данных позволяет естественным способом реализовать имеющийся в алгоритмах вычислений параллелизм и производить одновременное выполнение нескольких программ или одной программы для нескольких наборов аргументов.

Исследования вопросов, связанных с реализацией принципа потокового управления, ведутся как в России, так и за рубежом.

Принципы потокового управления на различных уровнях в сочетании с последовательным управлением применяются в высокопроизводительных ВС ПС-2000, ПС-3000, МАРС, в рекурсивных машинах.

Из иностранных работ, посвященных разработке ППД, наиболее известны: ПВД поискового типа *Dennis J., Misunas D.*, работы, связанные с созданием высокопроизводительных ППД, состоящих из нескольких тысяч относительно медленных процессоров, проводимые под руководством *Arvind*, работы по исследованию комбинированных моделей с управлением потоком данных и последовательным управлением, потоком данных и потоком запросов, проводящиеся под руководством *Treleaven P.C.* Разрабатываются ВС с управлением потоком данных на уровне модулей программ, машины баз данных, управляемые потоком данных; ППД со страничной памятью для хранения программ и структур данных с организацией движения только указателей структур данных в виде меток [3–14].

Как показал анализ, вопросы организации и проектирования ФОП ПД, в зависимости от характеристик реализуемых функций, в настоящее время недостаточно исследованы.

Настоящая работа посвящена вопросам организации и проектирования модульных ФОП ПД, позволяющих значительно повысить производительность ВС, выполняющих задачи вычислительного характера.

Целью работы является исследование вопросов организации и проектирования функционально ориентированных процессоров, управляемых потоком данных.

Для достижения указанной цели решаются следующие **задачи**:

- провести анализ эффективности применения потокового принципа управления для ФОП;
- выделить основные архитектурно-структурные решения (АСР) ФОП ПД.

Анализ эффективности применения потокового принципа управления для ФОП.

ФОП – это процессоры, используемые в составе ВС и предназначенные для эффективной реализации достаточно сложных функций, имеющих большой удельный вес в алгоритмах решения задач. Под эффективностью будем понимать способность ФОП обеспечивать заданные быстродействие, производительность, точность вычислений при минимальных затратах на разработку, производство, эксплуатацию и модернизацию ВС, состоящей из базовой машины и ФОП. Быстродействие ФОП характеризует скорость вычислений функций и измеряется средним временем выполнения одной функции в ФОП. Производительность ФОП характеризует объем вычислений, производимых ФОП, и измеряется средним количеством функций, выполняемых в ФОП за определенный интервал времени.

Очевидно, что для повышения быстродействия и производительности ФОП необходимо выбирать для вычисления значений функций такие алгоритмы, которые позволяют распараллеливать вычисления и организовать процесс вычисления таким образом, чтобы обеспечить одновременное вычисление значений нескольких функций. Известно, что аппаратная реализация процесса вычисления значений функций позволяет получить максимальное быстродействие. Однако аппаратная реализация не обладает гибкостью при необходимости изменения или расширения реализуемого набора функций.

Микропрограммная реализация вычисления значений функций обладает большей гибкостью, позволяет производить широкое распараллеливание процесса вычисления значений функций и реализовать вычисление значений широкого набора функций. Однако при одновременном обращении нескольких процессоров команд к ФОП, содержащему одно микропрограммное устройство управления, реализуется последовательный процесс обслуживания процессоров команд. В ФОП, использующих алгоритмы вычисления значений функций с большим различием ширины распараллеливания для различных функций и большим различием ширины распараллеливания одной функции в процессе ее выполнения, организация ФОП с несколькими микропрограммными устройствами управления со своим набором операционных устройств приведет к низкому коэффициенту использования оборудования, а использование высокопроизводительных конвейерных устройств становится малоэффективным.

Программная реализация вычисления значений функций обладает максимальной гибкостью с точки зрения изменения или расширения набора реализуемых функций. Однако если ширина возможного распараллеливания алгоритмов вычисления функций резко меняется внутри одной функции, длины параллельных ветвей коротки, вплоть до одной операции, то применение операторов *fork* (параллельное ветвление) и *join* (соединение параллельных ветвей) и операций над семафорами не оправдано из-за большого количества операций управления распараллеливанием.

Для вычисления значений подобных функций наиболее подходит управление потоком данных, при котором ход вычислений определяется не последовательностью команд, а готовностью операндов. Как только операнды для какой-то команды станут доступны, эта команда может быть отправлена на выполнение вне зависимости от места расположения в программе. После выполнения команды результат рассылается всем командам, которые используют его в качестве одного из своих операндов. При этом способе управления вычислениями одновременно могут быть готовыми сколько угодно большое число команд и выполняться такое их количество, которое ФОП способен выполнить одновременно. Таким образом, использование управления потоком данных обеспечивает вычисление значений функции с максимальным естественным параллелизмом, присущим выбранным алгоритмам, и позволяет производить одновременное выполнение нескольких программ вычисления значений функций или одной программы для различных значений аргументов, инициируемых различными процессорами команд базовой машины.

Из проведенного анализа следует, что применение управления потоком данных в программах вычисления значений функций даст наибольший выигрыш при следующих требованиях к ФОП:

- необходимо обеспечить одновременное вычисление значений нескольких функций или значений одной функции для нескольких наборов аргументов;
- необходимо производить вычисления с повышенной точностью над данными, представленными в формате с плавающей запятой для функций, обладающих следующими особенностями:
 - алгоритмы вычисления значений функций имеют не циклический, а преимущественно линейный характер;

- для вычисления значения функции используются алгоритмы, допускающие параллельную обработку;
- ширина распараллеливания алгоритмов вычисления значений функций резко меняется на различных этапах вычисления функций, причем длины параллельных ветвей короткие, вплоть до одной операции;
- операции не могут быть сведены к вычислению векторов;
- возможны различные типы параллелизма (смежных операций, независимых ветвей) на различных этапах вычислений.

Дерево основных архитектурных и структурных элементов ФОП ПД. Известен способ описания технических решений (ТР) графом типа «дерево», в вершинах которого помещаются элементы ТР и их признаки, а дуги графа выражают функциональную соподчиненность между элементами или элементами и их признаками [15, 16]. По информационному содержанию дерево имеет многоуровневую иерархическую структуру от общего к частному в направлении от корня к вершинам. Несколько ТР могут содержать общие для всех элементы и признаки, следовательно, деревья таких ТР будут содержать одинаковые вершины и дуги. Можно объединить деревья указанных ТР и получить одно общее, содержащее кроме узлов «И» еще узлы «ИЛИ» для объединения альтернативных признаков, характеризующих индивидуальные особенности ТР. Производя объединение частных деревьев ТР от корня к вершинам в одно общее, можно получить дерево множества ТР, которое не содержит повторяющейся информации об элементах и их признаках и является компактным способом представления и хранения информации о множестве ТР [15,16]. Эта информация может быть расширена путем добавления альтернативных вариантов элементов и их признаков из ТР аналогичного функционального назначения. Для уменьшения размеров дерева ТР используем кроме узлов «И» и «ИЛИ» узлы типа «И–ИЛИ» со смешанными свойствами [17].

Построим И–ИЛИ дерево множества архитектурных и структурных элементов ФОП ПД. В соответствии с функциями, выполняемыми различными устройствами ФОП ПД, выделим элементы первого уровня И–ИЛИ дерева: устройства управления процессом выполнения вычислений, устройства хранения информации, устройства выполнения команд, устройства передачи информации, как показано на рис. 1.

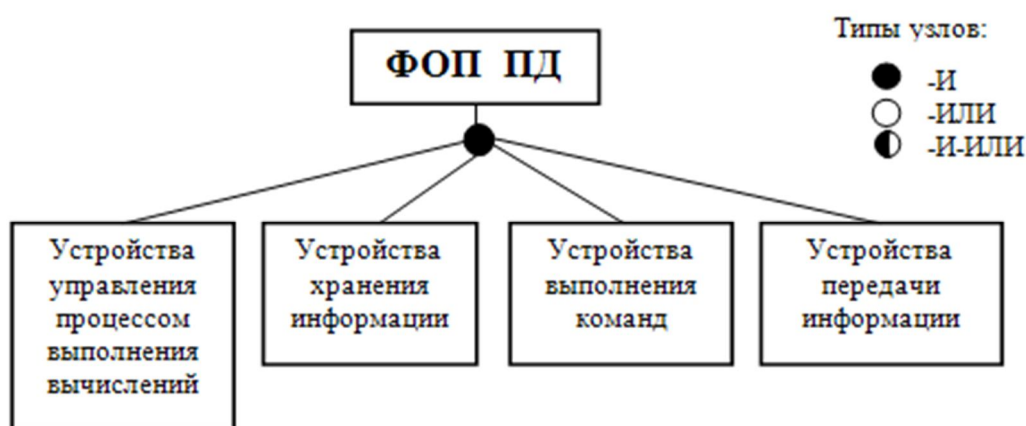


Рис. 1. Структурные элементы первого уровня И–ИЛИ дерева основных архитектурных и структурных элементов ФОП ПД

В каждом из элементов первого уровня выделим архитектурные и структурные элементы второго уровня, которые, в свою очередь, разделяются на элементы более

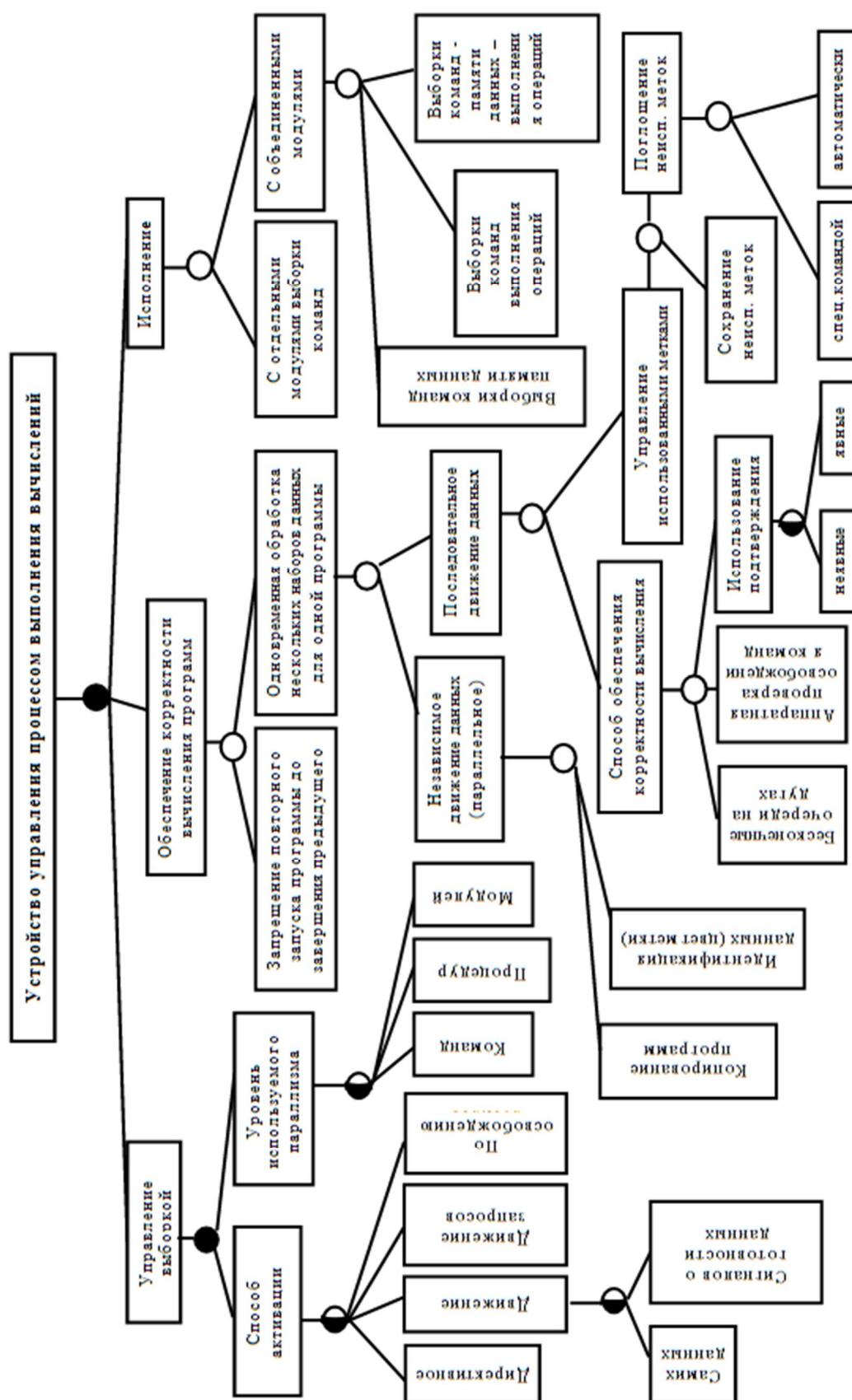


Рис. 2. Субдеревцо устройства управления процессом выполнения

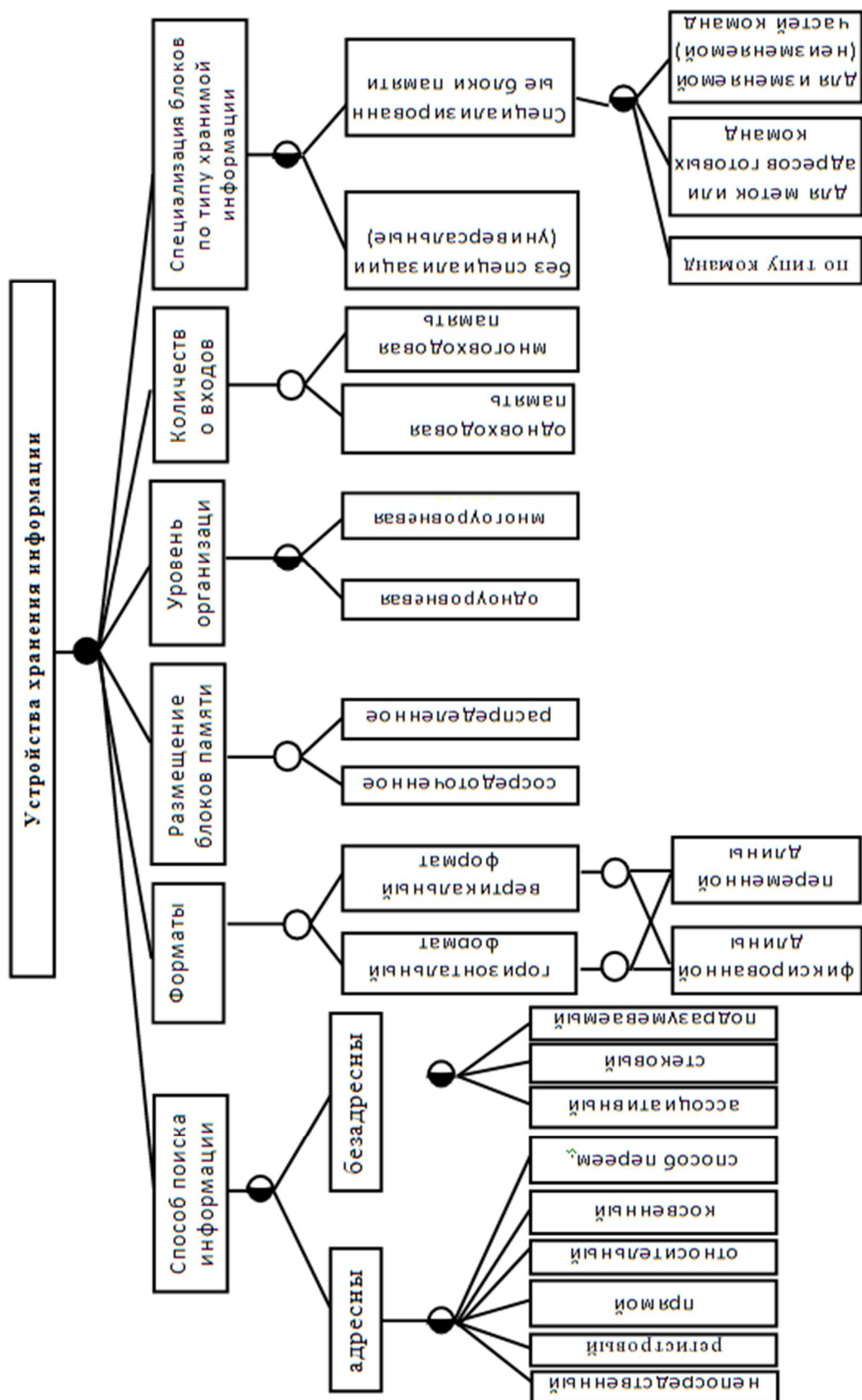


Рис. 3. Субдеревое устройств хранения информации

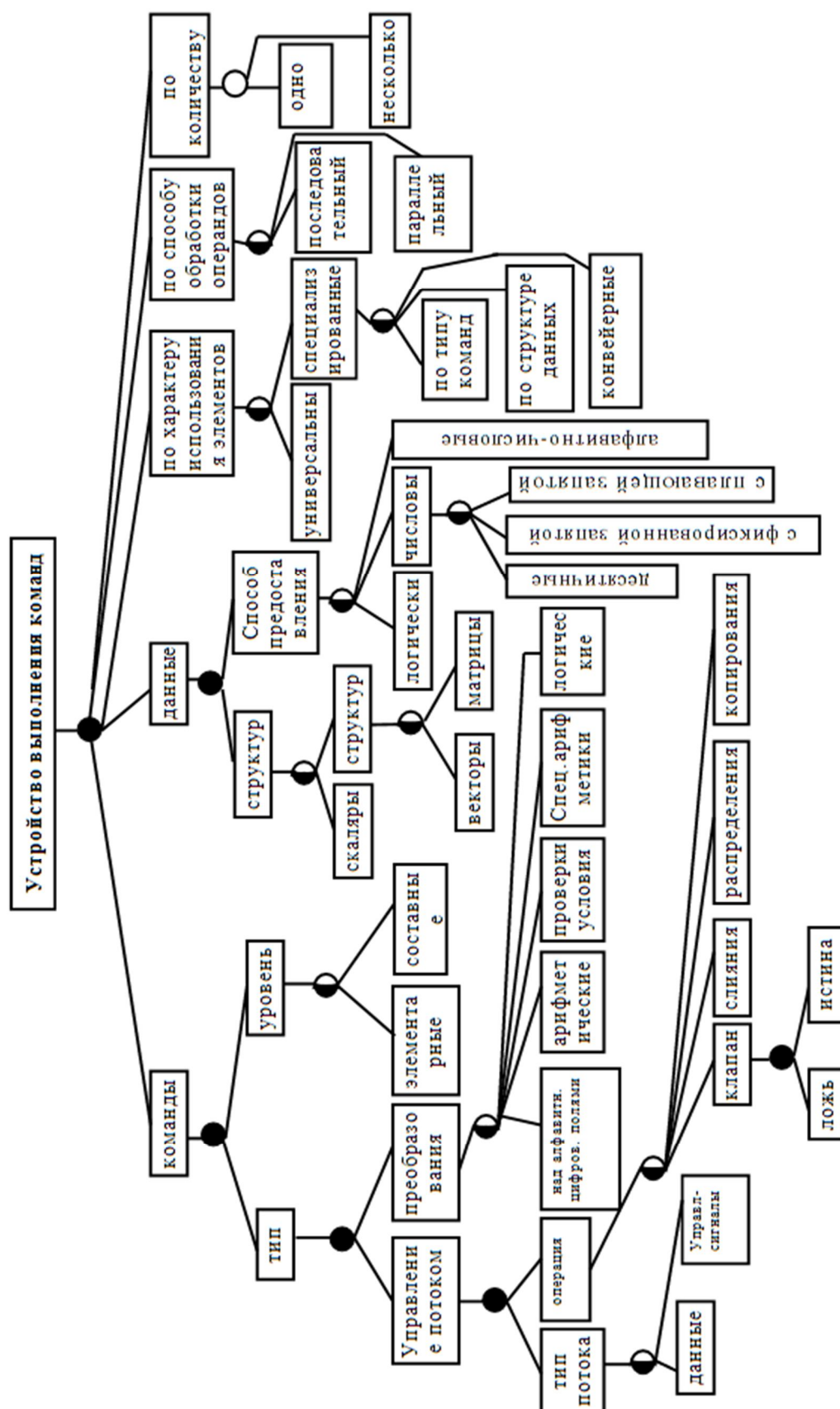


Рис. 4. Субдереве устройств выполнения команд

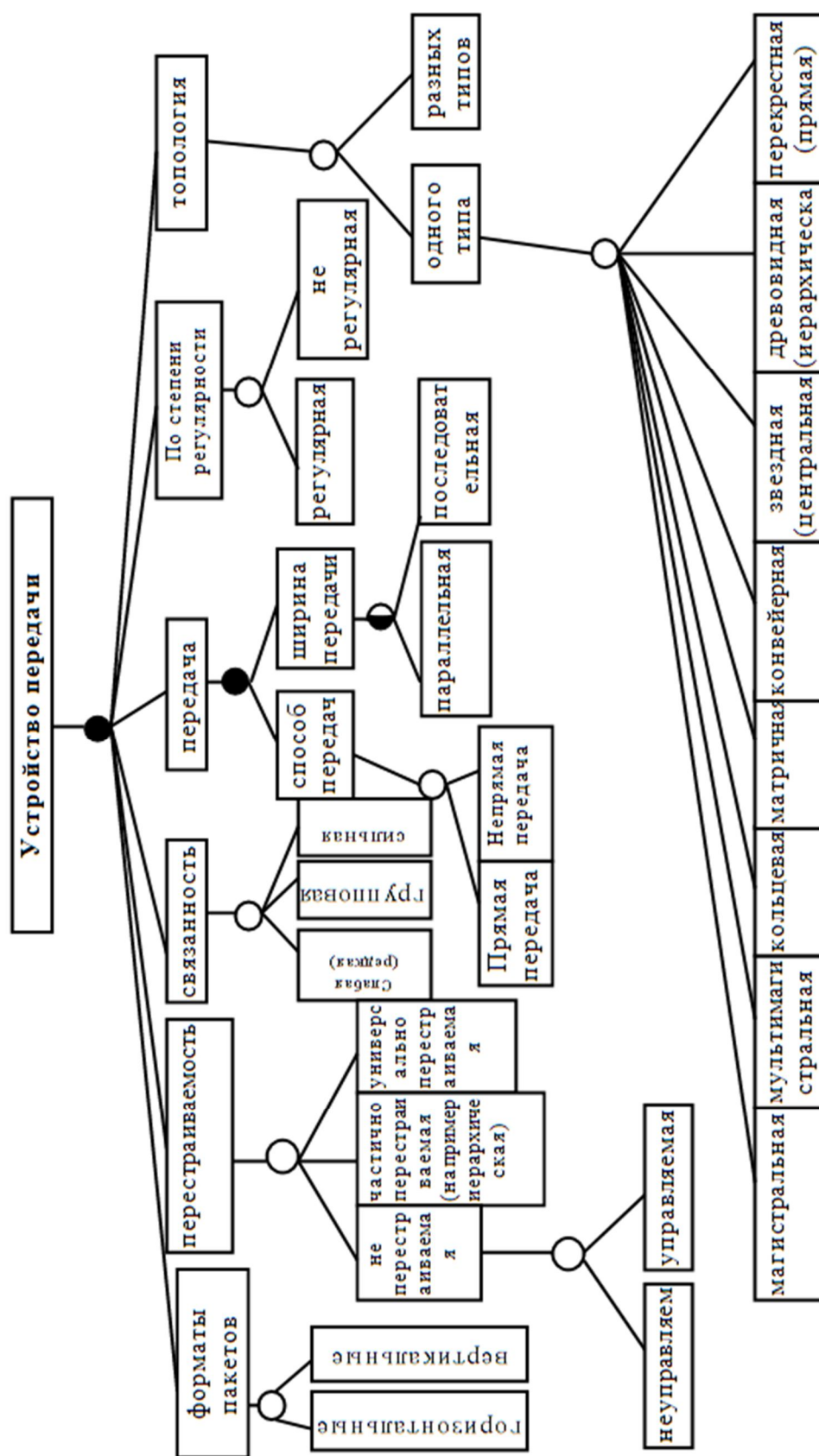


Рис. 5. Субдеревое устройств передачи информации

низкого уровня. Таким образом, построим дерево основных архитектурных и структурных элементов ФОП ПД.

На рис. 2–5 приведены субдеревья основных элементов первого уровня, построенные на основе анализа литературы, посвященной процессорам потоков данных с точки зрения их применения в ФОП ПД, и расширенные архитектурными и структурными элементами, необходимыми для ФОП ПД. Построенное расширенное И–ИЛИ дерево основных архитектурно-структурных элементов ФОП ПД является компактным средством представления информации о множестве существующих и возможных технических решениях ФОП ПД. Оно предоставляет богатую информацию для разработчика при проектировании ФОП ПД с необходимыми характеристиками. Методами простого перебора выделенных архитектурных и структурных элементов можно получить несколько тысяч различных архитектурно-структурных решений ФОП ПД. Сложной задачей является анализ выделенных архитектурно-структурных решений с целью выбора необходимого решения. Методы имитационного и аналитического моделирования оказываются слишком трудоемкими при анализе такого количества вариантов.

Известны различные методы поиска решений на И–ИЛИ дереве: метод экспертных оценок, по заданному ограничению, по нескольким ограничениям, многокритериально-го выбора, удалением вершин, используя аддитивные критерии и др. [15, 16].

Выводы

1. Проведен анализ эффективности применения принципа потокового управления в ФОП. Определены основные требования к ФОП, при которых наиболее эффективно управление потоком данных.

2. На основании анализа работ в области машин потоков данных построено расширенное И–ИЛИ дерево основных архитектурных элементов ФОП ПД, являющееся компактным средством представления информации о множестве существующих и возможных технических решений ФОП ПД, позволяющее производить синтез новых технических решений ФОП ПД.

Список литературы

1. Высокопроизводительные вычислительные системы и микропроцессоры // Сб. научно-техн. трудов ИМВС РАН. – М.: Институт микропроцессорных вычислительных систем РАН. – 2003. – №4. – 128 с.
2. Фролов, А. Программа создания эффективных суперкомпьютеров / А. Фролов, А. Семенов, А. Корж, Л. Эйсымонт. – Открытые системы. – 2007. – №9.
3. Arvind, Kathail V. A multiple processor data flow machine that supports generalized procedures / Kathail V. Arvind // 8th Ann. Symp. Comput. Archit., Minneapolis, Minn., May 12-14, 1981. – New York, 1981. P. 291–302.
4. Dennis, J. B. Maximum pipe lining of Array Operations on Static Data Flow Machine / J. B. Dennis, G.G. Rong // Proc. Int. Conf. Parallel Process., 1983. (Silver Spring, Md). – 1983. – P. 331-334.
5. Gurd, J. R. The Manchester data-flow computing / J. R. Gurd, C. Kirkham, W. Bohm // Experimental parallel computing architectures / Ed. J. J. Donjarra. B. V. North Holland Elsevier Sci. Publ. – 1987. – P.177–219.
6. Jurij Silk, Borut Robic, Theo Ungerer. Asynchrony in parallel computing: From dataflow to multithreading. Institut Jozef Stefan, Technical Report CDS-97-4, September 1997.
7. Misunas, D. P. A computer architecture for data-flow computation / D. P. Misunas // MIT. Lab. Comput. Sci. Techn. Memo. – 1978. – No 100. – 107 pp.
8. Streltsov, N. A Novel MIMD Processor Targeting High Performance Low Power DSP Application / N. Streltsov, J. Sparso, S. Bokov, S. Kleberg. // International Signal Processing Conference (GSPx-2003). – Dallas, April, 2003.
9. Treleaven, P. C. Fifth generation computer architecture analysis/ 5 Generat. Comput. Syst. Proc. Int. Conf. – Tokyo, Oct. 19-22, 1981, Amsterdam e.a., 1982, P. 265–275.
10. Treleaven, P. C. The new generation of computer architecture / P.C. Treleaven // Conf. Proc. 10th Annu Int. Symp. Comput. Archit. – Stockholm, 1983. (Silver Spring, Md), 1983. – P.402-409.

11. Treleaven, P. C. Fifth generation computers / P. C. Treleaven, L. I. Gouveia // Comput. Phys. Commun., 1982, 26. – No. 3-4. – P. 277-283.
12. Treleaven, P. C. VLSI Processor Architectures / P.C. Treleaven // Computer. – 1982. – V.15, No. 6. – P. 33-45.
13. Treleaven, P. O. A recursive computer architecture for VLSI / P. O. Treleaven, R. P. Hopkins // 9th Annu. Symp. Comput. Archit., Austin, Tex., Apr. 26-29, 1982, Conf. Proc. – New York, 1982. – P. 229-238.
14. Treleaven, P. C. Combining data flow and control flow computing / P. C. Treleaven, R. P. Hopkins, P. W. Rautenbach // Comput. J. – 1982, 25. – No. 2. – P. 207-217.
15. Автоматизация поискового конструирования (искусственный интеллект в машинном проектировании) /А. И. Половинкин, Н. К. Бобков, Г. Я. Буш и др.; под ред. А. И. Половинкина. – М.: Радио и связь, 1981. – 344 с.
16. Дворянкин, А. М. Методы синтеза технических решений / А. М. Дворянкин, А. И. Половинкин, А. Н. Соболев. – М.: Наука, 1977. – 104 с.
17. Уинстон, П. Искусственный интеллект / П. Уинстон; Перевод с англ. В. Л. Стефанюка; Под ред. Д. А. Поспелова. – М.: Мир, 1980. – 520 с.
18. www.vladimir-izikov.mari-el.ru/liter.html

Статья поступила в редакцию 30.04.09.

V. T. Izikov

THE ORGANIZATION AND DESIGNING OF FUNCTIONALLY FOCUSED PROCESSORS CONTROLLED BY THE STREAM OF DATA

The tree of the basic architectural and structural elements of functionally- focused processors of data flows is constructed (FFP DF), being compact means of information representation on the set of existing and possible technical decisions on FFP DF, allowing to make synthesis of new architectural and structural decisions on FFP DF.

Key words: *processors of data flows, functionally focused processors, synthesis of new technical decisions.*

ИЗИКОВ Владимир Тихонович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры МарГТУ. Область научных интересов – ЭВМ, комплексы, системы и сети; автоматизация управления; автоматизация финансовой деятельности; вопросы повышения качества. Автор 17 публикаций. E-mail: izikov@mail.ru.

УДК 621.382.049.77-181.2

М. А. Ляпина

СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОРПУСОВ И ПЛАТ

Рассматриваются вопросы обеспечения качества металлокерамических корпусов и плат, правила формирования и состав контролируемых параметров для проведения статистического контроля технологического процесса. Даются рекомендации относительно возможности и условий применения методов статистического контроля и регулирования для управления качеством технологического процесса на различных стадиях производства.

Ключевые слова: статистические методы, статистический контроль качества, контролируемые параметры, металлокерамические корпуса для интегральных микросхем.

Введение. В настоящее время прерывистое производство и выпуск продукции малыми партиями являются характерными для широкой номенклатуры радиоэлектронной аппаратуры. При этом требования к качеству и надежности продолжают повышаться. В первую очередь это относится к изделиям микроэлектроники, в том числе и к металлокерамическим корпусам (МКК) интегральных микросхем.

Обеспечение, управление и постоянное повышение качества МКК на всех этапах жизненного цикла – актуальная проблема, наиболее эффективный путь решения которой на стадиях разработки и производства – разработка и широкое применение статистических методов.

При возникновении перерывов в производстве или изменении номенклатуры выпускаемых изделий предприятию-изготовителю МКК необходимо проводить корректировку технологического процесса для обеспечения нормального функционирования производства. При этом ввиду длительности технологического цикла частые переналадки техпроцесса являются крайне нежелательными.

Система менеджмента качества предприятия-изготовителя МКК не может быть достаточно полной и эффективной, если в ее составе отсутствуют методы, позволяющие осуществлять статистический анализ и регулирование техпроцесса.

Задача статистического регулирования технологического процесса состоит в том, чтобы на основании результатов периодического (т.е. в динамике) контроля выборок относительно малого объема оценивать его стабильность и корректировать наладку процесса на требуемое качество.

Целью работы является разработка научно-методических основ управления качеством МКК и применения методов статистического контроля и регулирования техпроцесса при изготовлении МКК.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ существующих методов статистического управления качеством техпроцесса;
- провести анализ техпроцесса производства МКК и определить состав критичных технологических операций и контролируемых параметров для проведения статистического контроля и регулирования;
- определить порядок внедрения методов статистического контроля и регулирования техпроцесса при изготовлении МКК;
- провести обработку экспериментальных данных контроля критичных параметров техпроцесса изготовления МКК для подтверждения эффективности на конкретных примерах.

Технологическое обеспечение качества производства МКК. Для обеспечения качества техпроцесса на предприятиях-изготовителях МКК должен быть разработан комплекс стандартов предприятия, регламентирующих порядок выполнения следующих основных требований:

- техпроцесс производства корпусов должен включать в себя перечень последовательно выполняемых технологических операций, проектных норм и технологических характеристик;
- техпроцесс оценивается по показателям и количественным значениям, разработанным на основе технических требований к техпроцессу изготовления МКК и требований нормативной документации на поставку;
- в основу типового маршрута предприятия-изготовителя МКК должен быть положен типовый перечень технологических и контрольных операций, подлежащих оценке при аттестации (рис. 1) [1]. Требования к составу технологических и контрольных операций, к режимам, параметрам материалов, а также требования к точности их обеспечения, могут дополняться применительно к конкретному этапу техпроцесса;

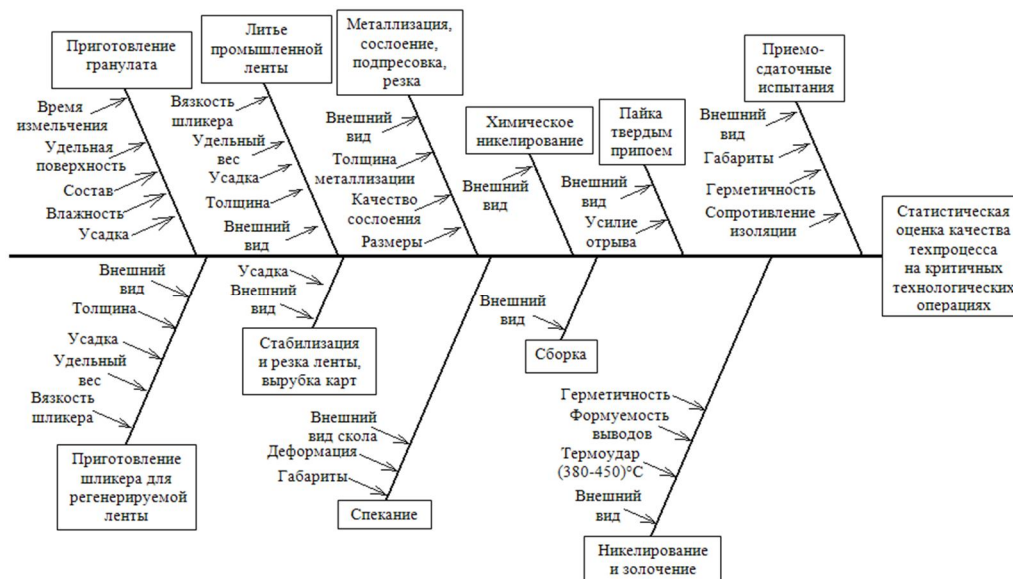


Рис. 1. Перечень базовых (критичных) технологических операций, подлежащих оценке.

- для непрерывного контроля ключевых технологических операций, обеспечивающих надежность и выход годных микросхем, необходимо внедрение статистического контроля и регулирования техпроцесса;

- операционный (процессный) контроль осуществляют при проведении технологической операции или, если это необходимо, межоперационного контроля. При этом осуществляется контроль режимов проведения технологической операции;
- межоперационный контроль осуществляют после проведения операции или блока операций, завершающих формирование нового свойства изделия. Межоперационный контроль используется при отсутствии возможности установить жесткую корреляционную связь между характеристиками изделия и условиями, параметрами и режимами предшествующих операций, поддающихся проверке при операционном контроле. Контроль осуществляется по межоперационным параметрам;
- приемочный контроль осуществляют перед операциями, проведение которых включает возможность прямой проверки одной или нескольких характеристик полуфабриката или готового изделия;
- в процессе оценки техпроцесса аттестующая организация в числе прочих критичных аспектов технологии обращает внимание на программу внедрения статистического контроля техпроцесса для всех этапов и операций.

Наиболее эффективные подходы к решению проблемы борьбы с браком в условиях массового производства в обязательном порядке используют статистические данные. При этом должны учитываться как сущность физических явлений, так и их статистическая значимость.

Анализ методов, применяемых при статистическом управлении процессами производства МКК. Программа обеспечения качества изделий микроэлектроники на этапе производства включает комплекс мероприятий [2]. В современных условиях, при преобладании выборочного контроля качества, решающее значение для обеспечения надежности МКК имеет применение статистических методов для контроля и анализа состояния техпроцесса, анализа видов и причин технологических потерь, а также анализа стабильности техпроцесса. Очевидно, что статистические методы целесообразно применять с этапа разработки, так как чем раньше они применяются, тем более эффективно их использование.

Имеется две разновидности регулирования технологических процессов: по количественному и альтернативному (качественному) признакам. Для каждой из разновидностей разработаны свои статистические методы регулирования.

Регулирование (или контроль) по количественному признаку заключается в определении с требуемой точностью фактических значений контролируемого параметра у отдельных представителей (выборки) продукции. Затем по фактическим значениям параметра определяются статистические характеристики и по ним принимаются решения о состоянии технологического процесса. Такими характеристиками являются выборочное среднее, медиана, размах и выборочное среднее квадратическое отклонение. Первые две характеристики — характеристики положения, а последние две — характеристики рассеяния случайной величины.

Регулирование (или контроль) по альтернативному признаку заключается в определении соответствия контролируемого параметра или единицы продукции установленным требованиям. При этом каждое отдельное несоответствие установленным требованиям считается дефектом, а единица продукции, имеющая хотя бы один дефект, также считается дефектной. При контроле по альтернативному признаку не требуется знать фактическое значение контролируемого параметра, достаточно установить факт соответствия или несоответствия его установленным требованиям. Решение о состоянии технологического процесса принимается в зависимости от числа дефектов или числа дефектных единиц продукции, выявленных в выборке.

Для более эффективного контроля и управления качеством МКК необходимо комплексное внедрение методов статистического контроля и регулирования техпроцесса с учетом возможности и особенностей их применения на различных стадиях производства [3].

Рассмотрим методы оценки показателей точности, настроенности и стабильности техпроцесса.

1. Метод оценки налаженности техпроцесса на основе применения коэффициентов C_p и C_{pk}

Метод включает проведение оценки коэффициентов C_p и C_{pk} .

Коэффициент C_p характеризует потенциальную воспроизводимость (потенциальный запас точности) техпроцесса, запас по контролируемому параметру, определяющий вероятность появления брака в процессе проведения технологической операции, то есть потенциал системы отвечать требованиям.

Коэффициент C_{pk} характеризует реальную воспроизводимость (реальный запас точности) техпроцесса, который учитывает степень смещения среднего значения контролируемого параметра от его номинального значения.

Метод применяется для количественной оценки качества техпроцесса. Метод может применяться на стадии формирования состава технологических операций и параметров, подлежащих статистическому контролю, а в дальнейшем, как дополняющий метод, при осуществлении статистического контроля техпроцесса в начальной стадии производства и при серийном производстве

При проведении оценки коэффициентов необходимо устанавливать различные критериальные значения коэффициентов C_p и C_{pk} на различных стадиях производства. Оценку уровней C_p и C_{pk} рекомендуется проводить периодически или по результатам изготовления установленного объема продукции с учетом имевших место изменений условий проведения технологических операций.

Для достаточно достоверной оценки коэффициентов C_p и C_{pk} объемы данных по результатам контроля параметров целесообразно иметь не менее 30 – 70 значений параметра.

2. Методы оценки показателей точности, настроенности и стабильности техпроцесса

Оценка показателей точности, настроенности и стабильности проводится по результатам операционного контроля на важнейших технологических операциях, существенно влияющих на выход годных, качество и надежность изделий.

Метод включает проведение оценки показателей точности (коэффициент точности K_T), настроенности (коэффициент смещения K_C), стабильности (коэффициенты стабильности настроенности K_{CH} и разброса – K_{CP}).

Показатель точности характеризует степень отличия фактической области разброса значений от области допустимых значений (поля допуска). Невыполнение условий точности свидетельствует о существенном превышении установленного поля допуска фактическим разбросом значений контролируемого параметра в изготавливаемой партии изделий, что может привести к браку на последующих операциях, снижению качества и надежности изделий.

Показатель настроенности характеризует степень смещения фактического центра группирования контролируемого параметра от номинального уровня, установленного в технической документации. Невыполнение условий настроенности свидетельствует о

несоответствии фактического центра группирования контролируемого параметра в изготавливаемой партии изделий номинальному уровню, что может привести к браку на последующих операциях.

Показатели стабильности характеризуют степень однородности распределения значений контролируемого параметра в различных партиях изделий и вероятность сохранения настроенности и точности во времени.

Невыполнение условий стабильности свидетельствует о существенном отличии параметров статистического распределения (среднего значения, дисперсии) в различных партиях изделий, что приводит к нестабильности выхода годных, уровня качества и надежности изделий.

Методы оценки показателей настроенности, точности и стабильности по количественным признакам могут применяться в начальной стадии производства до применения контрольных карт и как дополняющие методы для оценки показателей настроенности, точности и стабильности техпроцесса в период контроля серийного производства МКК.

Методы удобно использовать в начальной стадии производства при его недостаточной ритмичности, ограниченности объема информации по контролируемым параметрам для оценки состояния техпроцесса. Показатели настроенности, точности, стабильности могут применяться для параметрических случаев контроля, при недостаточной точности измерений (погрешность более 10%).

При сертификации техпроцесса для всесторонней и объективной оценки точности, настроенности и стабильности объем выборки должен быть не менее 10, количество выборок – не менее 20 (последовательно изготовленных). При текущей оценке показателей точности, настроенности и стабильности, проводимой для осуществления регулирования техпроцесса, минимальный объем выборки – не менее 3, количество выборок – не менее 3 (определяется периодом регулирования в зависимости от длительности производственного цикла и количества партий изделий, изготовленных за время этого цикла).

3. Контрольные карты средних арифметических и средних квадратических отклонений

Контрольные карты используются для контроля значений выборочных характеристик: среднего значения и стандартного отклонения (при контроле по количественному признаку) [4]. На контрольные карты наносятся границы, указывающие момент разладки процесса. Границы устанавливаются таким образом, что если процесс налажен, то вероятность выхода точки за пределы границ очень мала.

Контрольная карта среднего арифметического отражает состояние показателя настроенности техпроцесса (смещение центра группирования контролируемого параметра от номинального уровня). Контрольная карта средних квадратических отклонений отражает состояние показателя точности техпроцесса, разладка которого характеризуется рассеиванием значений контролируемого параметра.

Применение контрольных карт обеспечивает наглядную картину состояния изменчивости исследуемых характеристик и возможность с достаточно высокой обоснованностью осуществлять, при необходимости, корректировку условий проведения технологических операций.

Основными назначениями контрольных карт Шухарта являются определение требуемого (номинального) уровня техпроцесса, достижение этого уровня, а также определение соответствия параметров номинальному значению и допускам. Метод может

использоваться при различных ограничениях контролируемых индивидуальных параметров, построении карт с предупреждающими границами и границами регулирования. Метод удобен при необходимости расслоения информации для облегчения выявления факторов, приводящих к разлаженности техпроцесса, определяющих распределение значений контролируемых параметров в партии и группе партий.

Контрольные карты могут быть построены только с контрольными границами или с границами регулирования и предупреждающими границами. На практике целесообразно использовать два вида границ. Предупреждающие границы устанавливаются там, где только одна из 40 случайно выбранных точек (0,025) попадает за пределы границ, если процесс налажен. Границы регулирования устанавливаются там, где только одна из 1000 случайно выбранных точек (0,001) при налаженном процессе попадает за пределы границ.

Контрольные карты с предупреждающими границами и границами регулирования более удобны для оценки результатов контроля, чем карты только с границами регулирования, из-за наличия дополнительной информации.

Для контрольных карт с предупреждающими границами облегчается оценка состояния техпроцесса при повторяющихся колебаниях статистической характеристики, выходе ряда ее значений за предупреждающую границу и приближении их к границе регулирования. Для таких случаев уменьшается субъективность оценки, ускоряется и упрощается принятие решений о необходимости или нецелесообразности регулировки процесса.

При построении планов статистического контроля на основе контрольных карт необходимо устанавливать периодичность формирования и испытаний выборок и их объемы для каждого критичного параметра. Периодичность, с которой формируются выборки, должна быть достаточной для своевременного выявления неслучайных отклонений параметров и проведения корректировочных мероприятий.

Применение контрольных карт становится целесообразным и наиболее эффективным в случае, если контролируемые показатели и коэффициенты удовлетворяют установленным границам, когда определены (априори известны) дисперсия и средние значения контролируемых параметров, соответствующие генеральной совокупности продукции, то есть для достаточно точных и стабильных техпроцессов. Для принятия достаточно обоснованного решения по установлению границ регулирования контрольных карт желательно иметь накопленные данные по результатам испытаний не менее 20 выборок от партий, для которых наблюдалась достаточная стабильность характеристик.

Порядок внедрения статистических методов при управлении техпроцессами. Рассмотрим порядок внедрения методов контроля в систему статистического контроля и регулирования техпроцесса производства МКК (рис. 2) [4].

1. На первом этапе при контроле по количественному признаку делаются статистические оценки математического ожидания и среднего квадратического отклонения для контролируемых параметров. Значения рассчитанных статистических характеристик необходимы для расчетов показателей настроенности, точности, стабильности и построения контрольных карт.

При этом с целью получения реальной оценки показателей и коэффициентов, характеризующих уровень качества техпроцесса, и построения границ контрольных карт, позволяющих с достаточной эффективностью регулировать условия проведения технологических операций, из общего массива статистических данных должны быть исключены результаты по выборкам от партий, изготовленных при нарушениях условий, разлаженности оборудования, использования материалов недостаточного качества и т.д.

Кроме того, при оценке параметров распределений контролируемых параметров целесообразно также исключать из общей совокупности аномальные значения, то есть резко выделяющиеся наблюдения (выбросы), которые, как правило, обусловлены весьма редкими не контролируруемыми изменениями условий при выполнении технологических операций или случайными сбоями в метрологическом обеспечении. Впоследствии исключение выбросов обусловит некоторое ужесточение границ контрольных карт, что позволит повысить эффективность регулирования техпроцесса практически без увеличения экономических потерь.

2. Далее для предварительной оценки состояния техпроцесса и на начальной стадии производства до использования контрольных карт должен применяться метод оценки коэффициентов C_p и C_{pk} или проводиться анализ точности, настроенности и стабильности техпроцесса.

Поскольку метод оценки коэффициентов C_p и C_{pk} является наименее трудоемким методом, его удобно использовать на стадии формирования состава контролируемых технологических операций и параметров. Применение анализа точности, настроенности и стабильности техпроцесса эффективно также при ограниченности объема информации по контролируемым параметрам. Оба вышеупомянутых метода могут использоваться в дополнение к другим методам в период контроля серийного производства.

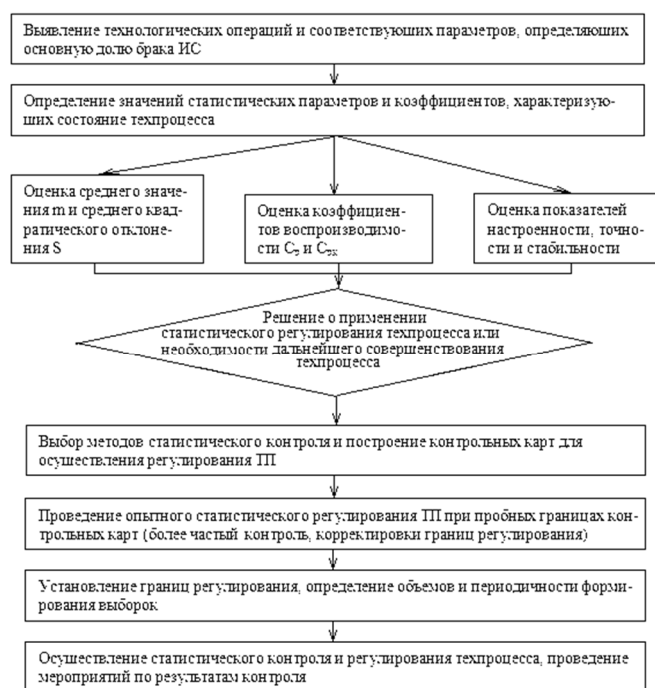


Рис. 2. Порядок внедрения методов статистического контроля и регулирования техпроцесса при изготовлении МКК

Оценку коэффициентов C_p и C_{pk} , а также показателей точности и настроенности техпроцесса рекомендуется делать при группировании данных по партиям и пластинам (если вариация между пластинами является значимой и такая оценка целесообразна).

3. Применение контрольных карт целесообразно только для достаточно точных и стабильных техпроцессов, поэтому решение о применении статистического управления с помощью контрольных карт принимается на основе оценки статистических характеристик техпроцесса и значений коэффициентов C_p и C_{pk} (или коэффициентов точности, настроенности и стабильности техпроцесса).

При освоении производства МКК, при наличии удовлетворительных данных по уровням показателей техпроцесса (настроенности, точности и стабильности) и значениям коэффициентов C_p и C_{pk} , с целью ускорения перехода к применению контрольных карт для управления техпроцессом, целесообразно предварительно проводить статистический ускоренный, более частый контроль на основе контрольных карт при пробных границах с небольшими объемами выборок ($n < 12$).

При недостаточной налаженности техпроцесса выборки целесообразно брать меньшего объема, а оценку параметров производить более часто. Объемы выборок (число точек на пластине, умноженное на число контролируемых пластин в партиях) должны устанавливаться с учетом способа обработки пластин (групповая, поштучная), конструкций держателя пластин, диаметра пластины, стабильности выполнения технологических операций. При увеличении количества партий, находящихся в производстве, объемы выборок от каждой партии можно уменьшать.

4. Конечным этапом – этапом внедрения – является установление границ контрольных карт и осуществление статистического регулирования с проведением корректирующих мероприятий по результатам контроля.

Выводы. Анализ производственных процессов показал, что для осуществления эффективного управления техпроцессом изготовления МКК необходимо проводить статистический контроль по критичным технологическим операциям.

Оценка особенностей существующих статистических методов применительно к производству МКК показывает, что для реализации управления качеством на стадии производства наиболее эффективным является комплексное применение методов оценки налаженности техпроцесса с применением карт средних арифметических и средних квадратических отклонений на различных стадиях производства.

Благодаря проведенной оценке были разработаны рекомендации по условиям и порядку применения статистических методов. Данные рекомендации могут послужить для оптимизации применения статистических методов при обеспечении качества МКК на этапе производства.

Список литературы

1. *Передреева, М. А.* Факторы дефектности металлокерамических корпусов микросхем и плат, обусловленные металлизацией / М. А. Передреева, Н. М. Скулкин // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество 2006». – Пенза, 2007. – С. 89 – 90.
2. *Версан, В. Г.* Интеграция производства и управление качеством продукции / В. Г. Версан, В. И. Сиськов, Л. Г. Дубицкий – М.: Издательство стандартов, 1995. – 143 с.
3. Статистические методы повышения качества/ Пер. с англ.; Под ред. Х. Кумэ – М.: Финансы и статистика, 1990. – 304 с.
4. *Шиндовский, Э.* Статистические методы управления качеством. Контрольные карты и планы контроля / Э. Шиндовский, О. Шюрц; Пер. с нем. В. М. Ивановой, О. И. Решетниковой, – М.: Мир, 1976. – 597 с.
5. *Карминский, А. М.* Контроллинг в бизнесе. Методологические и практические основы построения контроллинга в организациях / А. М. Карминский, Н. И. Оленев, А. Г. Примаков, С. Г. Фалько, – М.: Финансы и статистика, 1998. – 256 с.

Статья поступила в редакцию 18.08.09.

М. А. Lyapina

STATISTICAL METHODS FOR ASSESSMENT OF THE MANUFACTURING
QUALITY OF CERAMIC-METAL CASES AND BOARDS TECHNOLOGICAL PRO-
CESSES

Problems of quality maintenance of ceramic-metal cases and boards, rules of formation and structure of controllable parameters for carrying out of technological process statistical control are considered. Recommendations concerning the opportunity and conditions of application of statistical control and regulation methods for quality management of a technological process at various stages of manufacture are given.

Key words: *statistical methods, statistical quality assurance, controllable parameters, ceramic-metal cases for integrated microcircuits*

ЛЯПИНА Мария Анатольевна – аспирант МарГТУ. Область научных интересов – исследование и разработка экспериментальной и теоретической основы технико-экономических показателей серийного производства металлокерамических корпусов и коммутационных плат. Автор 8 научных работ. E-mail: voochek@rambler.ru

УДК 681.322

Н. В. Белова, Л. А. Стешина, И. О. Танрывердиев

СПОСОБ И АЛГОРИТМ ПОВЫШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ

Предложен подход к решению проблемы повышения динамической точности элементов систем управления. Рассмотрен интеллектуальный модуль, реализующий алгоритм обработки измерений параметров газовой среды.

Ключевые слова: измерения, параметры газового потока, обработка измерений, алгоритм, интеллектуальный модуль.

Введение. Стремительное развитие промышленности предъявляет всё более жёсткие требования к системам управления технологическими процессами как по быстродействию, так и по безопасности и надёжности, что невозможно без использования современных средств измерения, технологичных быстродействующих модулей сбора и обработки измерительной информации.

Цель работы – разработка устройства, реализующего интеллектуальную обработку измерительных сигналов параметров, определяющих качество выходной продукции на основе применения современной концепции построения систем автоматизации и управления технологическими процессами.

Решаемые задачи: построение структуры устройства, разработка алгоритма обработки измерений для повышения динамической точности и быстродействия элементов систем управления.

Техника исследований. Проектирование систем управления сложными технологическими процессами требует концептуально нового подхода уже на этапе разработки и проектирования. При разработке систем управления важным этапом является выбор средств технической реализации как первичной, так и вторичной обработки измерительной информации.

В настоящее время достигнуты значительные результаты в проектировании первичных измерительных приборов. В отечественной научно-технической литературе отмечены достижения исследований и разработок интегральных датчиков, в разработку которых значительный вклад внесли Н. П. Удавов («Полупроводниковые датчики»), В. И. Ваганов («Интегральные тензопреобразователи») и др. Интегральные датчики, несмотря на кажущуюся простоту, в научно-техническом плане представляют собой сложные приборы, так как их разработка и исследования осуществляются на стыке многих наук [1].

Одним из последних достижений в области измерительной техники является разработка интеллектуальных датчиков. Возможности интеллектуальных датчиков позволяют значительно повысить динамическую точность и быстродействие измерения с целью оптимального управления системой. Особенностью датчиков является применение ввода компенсирующих элементов для снижения возможных погрешностей измерений [2].

Однако, несмотря на результаты, достигнутые при разработке контрольно-измерительных приборов, значительной областью, требующей исследования, являются погрешности при измерении, вызванные внутрисистемными процессами, принципом действия и конструктивными особенностями первичных измерительных приборов. Ввиду того, что областью применения интеллектуальных датчиков являются технологические процессы таких отраслей промышленности, как газовая, нефтяная, химическая и другие, учесть вышепредставленные трудности весьма сложно.

Одним из подходов решения проблемы учета конструктивных особенностей и принципов действия первичных измерительных приборов является внедрение в системы управления модифицированных модулей, алгоритмы работы которых основаны на математическом описании процесса. Кроме того, применение математического описания позволит в режиме реального времени предоставлять информацию для оптимального управления системой.

Методика исследования. С целью проверки адекватности сделанного предложения для повышения точности и быстродействия рассмотрен технологический процесс гранулирования суспензий, в ходе которого необходим непрерывный контроль таких параметров, как температура, давление, расход, влажность газового потока. Контроль параметров необходим для обеспечения энерго- и ресурсосбережения [3]. Для измерения параметров использовалась лабораторная установка измерения параметров газового потока, которая является макетом установки гранулирования суспензий методом распылительной сушки [4]. Используемая лабораторная установка оснащена промышленными измерительными приборами (датчик температуры, два датчика давления, датчик влажности). Обработка измерительной информации осуществлялась с использованием стандартного блока сбора и обработки измерительной информации.

В соответствии с предложенной концепцией, разработана общая нелинейная математическая модель процесса измерения параметров газового потока. Математическая модель функционально описывает взаимодействие потока и первичных измерительных приборов, при этом учтены принцип действия прибора, его конструктивные особенности [5]. Кроме того, так как математическая модель образует систему взаимосвязанных нелинейных уравнений, можно сказать, что взаимное влияние в математическом описании учтено.

На основании предложенной математической модели разработан алгоритм обработки информации, использование которого позволяет достичь инвариантности измерений, а следовательно, и решить обозначенные проблемы при измерении и обработке информации и обеспечить получение действительных значений измеряемых параметров.

Для вычисления действительных значений параметров газового потока по предложенному математическому алгоритму обработки информации синхронно с опросом датчиков, без промежуточного хранения значений показаний датчиков в базах данных, наиболее целесообразно применять ЭВМ. Именно такой подход позволяет разрабатывать системы управления, элементы которых (интеллектуальный модуль) в режиме реального времени одновременно отображают и обрабатывают информацию, характеризующую ход технологического процесса.

При реализации предложенного алгоритма не требуется особое устройство ввода данных в ЭВМ, вполне достаточно модулей сбора данных, отвечающих следующим требованиям: надёжность при длительной эксплуатации, программная поддержка (поддержка Windows и Unix – подобных программных платформ).

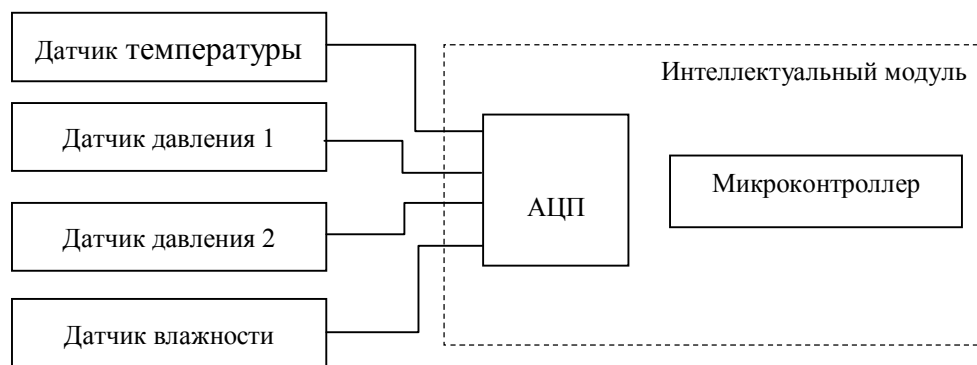


Рис. 1. Структурная схема интеллектуального устройства измерения параметров газового потока

Также необходимо обеспечить достаточно каналов для подключения датчиков измеряемых величин.

Представленным требованиям полностью соответствует высококласный модуль общего назначения Е14-440 производства компании Л-Кард, внесённый в Госреестр средств измерения, который используется в лабораторной установке [6].

Для борьбы с помехами общего вида при подключении допустимо использовать стандартные методы: тройное (защитное) экранирование в сочетании с симметричным входом, скручивание проводников и линий связи, магнитное, электростатическое экранирование и т.д.

Алгоритм работы прикладного ПО и взаимодействия его с модулем сбора данных представлен на рисунке 2.

Программа содержит стандартные подпрограммы инициализации АЦП (1) и записи истинных значений параметров потока в базу данных (5). Важнейшей подпрограммой является математическая обработка значений.

Для реализации непрерывного сбора данных приложение выполненной в виде двух основных потоков – сбора данных (процессы 2, 3) и обработки данных (процессы 4), необходимо синхронизировать потоки между собой стандартными методами с помощью установки событий.

Подпрограмма подготовки АЦП к сбору данных (1) является стандартной процедурой и выполнена по схеме, рекомендуемой разработчиком модуля сбора данных с применением сторонних библиотек.

После успешной инициализации интеллектуального модуля производится запуск сбора данных с АЦП, результатом которого станет запись значений с датчиков в данный момент в переменные и установка события готовности данных (окончания сбора). После успешного сбора данных и установления события готовности данных будет запущен поток обработки данных, поток сбора данных в этот момент находится в ожидании. При успешном окончании обработки данных будет установлено событие окончания обработки данных, что послужит сигналом для повторного запуска потока сбора данных. Далее цикл повторится по такому же алгоритму. Сигналом прерывания цикла служит лишь реакция пользователя, то есть завершение работы системы.

Действительные значения о параметрах процесса измерения после обработки предложенным ранее математическим алгоритмом могут быть представлены пользователю в удобной для понимания форме (в виде графика или другой визуализации), записаны в базу данных для хронологии работы комплекса или использоваться для управления ходом технологического процесса.

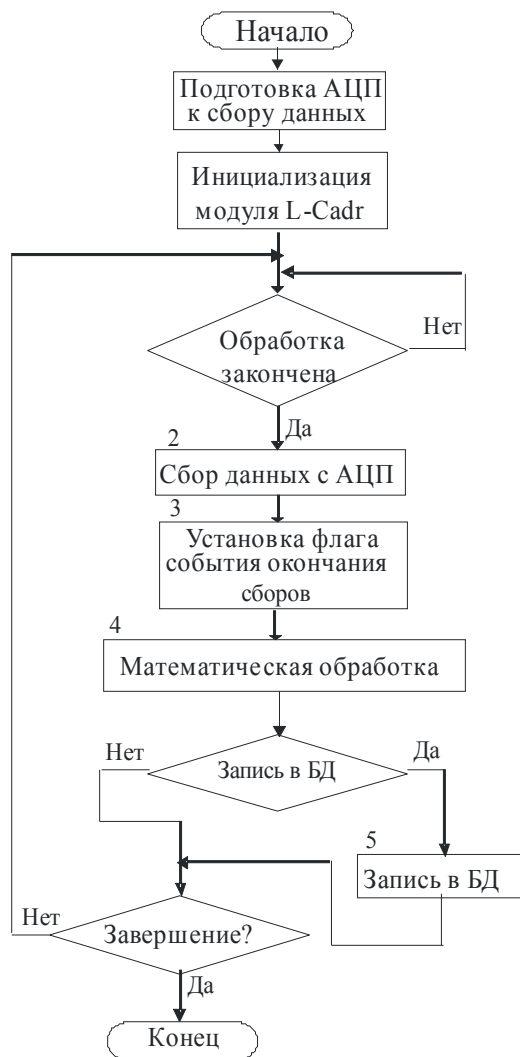


Рис. 2. Блок-схема алгоритма работы прикладного ПО и взаимодействия его с модулем сбора данных

Выводы. Использование интеллектуальных модулей, работа которых основана на принципах современной концепции теории управления, позволяет повысить быстродействие и точность измерения в системах управления технологическим процессом, что позволяет контролировать режимы работы ТП, качество выпускаемой продукции и рациональность использования энергетических и материальных ресурсов.

Предложенный интеллектуальный модуль системы автоматизированного управления газовым потоком значительно повышает уровень использования перспективных инновационных технологий с обеспечением должного уровня промышленной автоматизации. Разработано экспериментальное алгоритмическое и математическое программное обеспечение.

Работа выполнена при поддержке АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (2009–2010), проект № 2.1.2/6206, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009–2013), проект П 1005 и «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» («У.М.Н.И.К.»), проект № 6041р/8519.

Список литературы

1. Вавилов, В. Д. Интегральные датчики: Учебник / В. Д. Вавилов; Нижегородский гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2003. – 503 с.
2. Федоров, А. Г. Учебно-методическое пособие «Исследование способов обработки измерительной информации в интеллектуальных датчиках» / А. Г. Федоров. – Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, 2007. – 47 с.
3. Стешина, Л. А. Проблемы контроля параметров газовой несущей среды / Л. А. Стешина, Н. В. Белова // Материалы 8-й Международной научно-технической конференции ПТСПИ'2009. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-т, 2009. – С. 204-207.
4. Белова, Н. В. Разработка структуры измерительной системы параметров газовых потоков / Н. В. Белова, Л. А. Стешина // XI Вавиловские чтения. Национальные проекты России как фактор ее безопасности и устойчивого развития в глобальном мире: материалы конференции с международным участием. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2007. – С. 311 - 312.
5. Белова, Н. В. Программно-аппаратная система измерения параметров газового потока / Н. В. Белова, Л. А. Стешина // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2009. – №2. – С. 18-20.
6. <http://lcard.ru/products/external/e-440>

Статья поступила в редакцию 04.09.09.

N. V. Belova, L. A. Steshina, I. O. Tanryverdiyev

WAY AND ALGORITHM OF INCREASING DYNAMIC ACCURACY OF GAS ENVIRONMENT PARAMETERS MEASUREMENT

The approach to the solution of a problem of increasing the control systems elements dynamic accuracy is offered. The intellectual module realizing the algorithm of processing the parameters measurements of gas environment is considered.

Key words: *measurements, gas stream parameters, measurements processing, algorithm, intellectual module*

БЕЛОВА Надежда Вячеславовна – аспирант МарГТУ. Область научных интересов – разработка САУ, информационно-измерительные системы. Автор 15 публикаций. E-mail: kprevs@marstu.net.

СТЕШИНА Людмила Александровна – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования и производства ЭВС МарГТУ. Область научных интересов – распределенные системы управления энерго- и материалоемкими технологическими процессами. Автор 72 публикаций. E-mail: kprevs@marstu.net.

ТАНРЫВЕРДИЕВ Илья Оруджевич – студент МарГТУ. Область научных интересов – информационные технологии в распределенных системах управления. Автор четырех публикаций. E-mail: kprevs@marstu.net.

НОВИНКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОРЫ. КОНФЕРЕНЦИИ. ВАЖНЫЕ ДАТЫ

УДК 378.001.76

УЧАСТИЕ МОЛОДЫХ ИННОВАТОРОВ МарГТУ ВО ВСЕРОССИЙСКОМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ФОРУМЕ «СЕЛИГЕР – 2009»

«Селигер-2009» – это образовательный форум, ставший главным событием Года молодежи в России. Сегодня реальный вклад в поддержку молодежной активности в области инновационного развития нашей страны дают программы государственных фондов. К ним относятся программы фондов поддержки молодых ученых в фундаментальных и прикладных исследованиях, ряд программ государственной поддержки малого бизнеса.



В 2009 году получила развитие программа «Зворыкинский проект», цель которой – дать возможность тысячам молодых людей реализовать свой научный потенциал в России, стать успешными и богатыми через коммерциализацию своих проектов. «Зворыкинский проект» включает в себя множество мероприятий: обучение на различных тренингах, встречи с представителями деловой элиты страны, общение со специалистами из различных областей, заграничные стажировки.

Для задач вовлечения научной молодежи в среду инновационного бизнеса, содействия развитию сообщества молодых менеджеров и руководителей малых наукоемких предприятий в 2009 году при проректоре по научной работе и инновационной деятельности Марийского государственного технического университета создан клуб молодых инноваторов МарГТУ «ЛИМАР», целью которого является поддержка инициативных молодых людей, обладающих желанием реализовать свои профессиональные знания и идеи в виде коммерческих результатов.



Первоначально клуб состоял из молодых людей, выигравших конкурс «У.М.Н.И.К.», организованный Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере. Все победители данного конкурса были студентами и аспирантами технических специальностей МарГТУ, но позже, в процессе обучения в сфере инновационного бизнеса, пришло понимание того, что для успешной реализации проекта недостаточно одного «технаря», а обязательно наличие профессиональной команды, состоящей из менеджера, экономиста, технического специалиста, юриста, бухгалтера, маркетолога и др. Поэтому в последнее время клубом ведется активная работа по привлечению молодых амбициозных людей, обладающих профильными знаниями, в уже существующие инновационные проекты нашего университета. Члены клуба активно участвуют в программе «Зворыкинского проекта». В его рамках три человека из нашего университета, из 15 возможных по России, прошли стажировку в Израиле.

Одним из этапов «Зворыкинского проекта» было участие молодых инноваторов МарГТУ во Всероссийском образовательном форуме «Селигер – 2009». Участниками данной смены являлись носители проектных идей и инновационные менеджеры, эксперты и преподаватели, бизнесмены и консультанты, представители венчурных фондов. Инновационная смена лагеря насчитывала 5000 участников.

От нашей республики было представлено 18 проектов, 15 из них – проекты МарГТУ, все они являются победителями конкурса «У.М.Н.И.К.». В рамках программы участники проходили обучение по бизнесразвитию инновационных проектов.

Кроме программы обучения, проводились встречи с центральными фигурами государства в области инновационного развития. Общение проходило как на основе телемостов, так и в режиме семинаров. Смена молодых инноваторов дала участникам не только теоретическую, но и практическую подготовку для реализации инновационных проектов.

Следующим мероприятием, в котором мы планируем принять участие, является ежегодный инновационный конвент, где разработчики проектов встречаются с инвесторами и заказчиками. Его участники – молодые российские изобретатели, предприниматели, ученые, инновационные менеджеры, а также представители российских и зарубежных компаний, использующих инновационные разработки. Кульминация конвента – ежегодная церемония вручения Национальной премии в области инновационной молодежи. Это этап большой национальной программы по мотивации молодых людей на инновационные поиски и разработки.

Статья поступила в редакцию 18.09.09.

И. Е. Царев

I. Ye. Tzaryov

**PARTICIPATION OF YOUNG INNOVATORS OF THE MSTU IN THE
ALL-RUSSIA EDUCATIONAL
FORUM «SELIGER – 2009»**

Nowadays all sources of information say that there is no national innovative system in Russia yet. A share of innovative production in national economy is extremely low (3 %). Business does not feel a necessity to invest in risky innovative developments, preferring to earn money by reselling raw materials, real estate and consumer goods. In this country there are no big customers of innovative technologies, no big national corporations, making wide-scale innovative production.

ЦАРЕВ Иван Евгеньевич – председатель клуба молодых инноваторов МарГТУ «ЛИ-МАР», старший преподаватель кафедры радиотехники и связи МарГТУ. Область научных интересов – моделирование, диагностика ионосферы, информационно-телекоммуникационные системы. Автор 16 публикаций. E-mail: krts@marstu.net.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала «Вестник Марийского государственного технического университета» принимает к публикации статьи, соответствующие профилю издания, объемом не более 15 страниц, включая рисунки.

Статья должна содержать только оригинальный материал, отражающий результаты завершенных исследований автора, ранее не публиковавшихся.

К печати принимаются материалы, которые не опубликованы и не переданы в другие редакции. Рукописи проходят обязательное рецензирование. В «Вестнике ...» печатаются только статьи, получившие положительные рецензии.

Отклоненные в результате рецензирования материалы возвращаются в одном экземпляре (с приложением копии рецензии).

Автор передает журналу в лице его учредителя сроком на пять лет следующие исключительные имущественные права на материал: право воспроизводить произведение (право на воспроизведение); право распространять экземпляры произведения любым способом, в том числе продавать, сдавать в прокат (право на распространение); право импортировать экземпляры произведения в целях распространения (право на импорт); право сообщать произведение для всеобщего сведения по кабелю, проводам или с помощью иных аналогичных средств (право на сообщение для всеобщего сведения по кабелю); право переводить произведение (право на перевод).

Заявка об опубликовании материала, поступившая в адрес журнала, является конклюдентным действием, направленным на возникновение указанных прав и обязанностей.

Требования к оригиналам представляемых работ

Структура научной статьи

1. Аннотация (3-4 предложения), ключевые слова.
2. Введение (оценка состояния вопроса, основанная на обзоре литературы с мотивацией актуальности; выявленное противоречие, позволяющее сформулировать проблемную ситуацию).
3. Цель работы, направленная на преодоление проблемной ситуации (1-2 предложения).
4. Решаемые задачи, направленные на достижение цели.
5. Математическое, аналитическое или иное моделирование.
6. Техника эксперимента и методика обработки или изложение иных полученных результатов.
7. Интерпретация результатов или их анализ.
8. Выводы, отражающие новизну полученных результатов, показывающих, что цель, поставленная в работе, достигнута.

Требования к оформлению статьи

Статья должна быть представлена в электронном виде и компьютерной распечатке (2 экз.) на бумаге формата А4. Размер шрифта 12 пт, межстрочный интервал одинарный. Поля: справа – 2 см, слева, сверху и снизу – 3 см., отступ первой строки на 0,75 см.

На первой странице статьи слева печатается УДК (размер шрифта 12 пт, прямой, светлый). Ниже, справа – инициалы, фамилия автора (размер шрифта 14 пт, курсив, жирный). Ниже, по центру – название статьи (размер шрифта 14 пт, прямой, полужирный, прописью).

Далее размещается аннотация. Аннотация статьи представляется на **русском и английском языках**.

Рисунки, графики, таблицы должны иметь нумерационный и тематический заголовки (размер шрифта 10 пт, заголовки полужирный).

Таблицы и рисунки должны быть вставлены в текст после абзацев, содержащих ссылку на них.

Размеры иллюстраций не должны превышать размеров текстового поля (не более 15 см).

Список литературы оформляется согласно порядку ссылок в тексте (где они указываются в квадратных скобках) и обязательно в соответствии с ГОСТ 7.1-2003.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Статья должна быть подписана автором. После подписи автора и даты указываются его фамилия, имя, отчество (полностью), место работы, должность, область научных интересов, количество опубликованных работ, телефон, e-mail, домашний адрес.

К статье прилагаются следующие **документы**:

- рекомендация кафедры;
- экспертное заключение о возможности опубликования.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Подписка на журнал осуществляется по каталогу «Газеты. Журналы» Агентства «Роспечать» (подписной индекс **42916**, тематический указатель: Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов).

Следующий номер журнала выйдет в декабре 2009 года.