

ИССЛЕДОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛА ПОВЫШЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ НА ОСНОВЕ ПСКШ И АЛГОРИТМОВ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Алексеева В.В. (АО «НИТИ «Авангард», ИТМО)

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Ожиганов А.А.
(АО «НИТИ «Авангард», ИТМО)

Введение. Цифровые преобразователи угла (ЦПУ) являются ключевыми компонентами в системах точного позиционирования и управления. Одной из центральных задач при проектировании является обеспечение высокой информационной надежности при одновременной минимизации конструктивной сложности и габаритов [1]. Традиционные многодорожечные шкалы с кодами Хэмминга увеличивают габариты устройства за счет выделения дорожек под проверочные биты и неэффективны при множественных ошибках, вызванных обширными загрязнениями или дестабилизирующими факторами [2].

Для решения этой задачи предложен комплексный подход, основанный на применении односторожечной псевдослучайной кодовой шкалы (ПСКШ) и нескольких взаимодополняющих алгоритмов, обеспечивающих как детерминированное декодирование, так и устойчивость к различным типам ошибок считывания. Предложенные модели распределены по двум уровням системы измерения: грубый (абсолютный) отсчет реализуется методами на основе M -последовательностей и корректирующих кодов, а точный (инкрементальный) отсчет – цифровой обработкой аналоговых сигналов (фазовая оценка и адаптивная фильтрация).

Основная часть. Ядром системы является ПСКШ – кольцевая структура с единственной кодовой дорожкой, информация на которую нанесена в виде бинарной последовательности максимальной длины (M -последовательности). Эта последовательность, генерируемая регистром сдвига с линейной обратной связью (РСЛОС), обладает уникальным свойством „окна“: любой ее фрагмент длиной n бит однозначно определяет абсолютное угловое положение шкалы. На этой основе разработаны четыре ключевые модели:

1) Аналитическая модель декодирования в поле Галуа [3]. Данная модель использует изоморфизм между пространством циклических сдвигов M -последовательности и элементами расширенного поля Галуа. Алгоритм включает умножение считанного вектора на предвычисленную матрицу перехода, представление результата полиномом и его деление на примитивный полином до получения монома x^k , где степень k – номер позиции на кодовой шкале.

В отличие от переборных (brute force) методов поиска сдвига, предложенный подход эффективен для аппаратной реализации на ПЛИС, микроконтроллерах и ASIC.

2) Модель самокорректирующегося ЦПУ с нечетным числом „окон“ считывания [4]. Для борьбы с локальными дефектами маски (например, загрязнениями или царапинами) предлагается использовать три (или другое нечетное число) разнесенных по окружности считывающих „окна“. Ключевым элементом является матрица перехода, позволяющая выполнить детерминированный сдвиг считанного кода на фиксированное угловое расстояние, соответствующее смещению между „окнами“. Алгоритм восстановления информации основан на мажоритарном принципе согласования данных: система сравнивает коды, считанные с разных „окон“, путем их взаимного преобразования с помощью матриц. Если два „окна“ дают согласованный результат, а третье – нет, система признает данные третьего „окна“ недостоверными и восстанавливает их на основе согласованных данных. В случае полной потери данных система использует последние достоверные значения или ожидает следующий отсчет.

3) Модель ЦПУ на основе циклических кодов БЧХ [5]. Для защиты от произвольных множественных ошибок, которые могут возникать одновременно в нескольких несмежных битах, предложена модель, интегрирующая корректирующие возможности непосредственно в структуру ПСКШ. На основе M-последовательности строится циклический код Боуза–Чоудхури–Хоквингема (БЧХ) в поле Галуа. Порождающий полином БЧХ-кода выбирается для коррекции произвольного числа t ошибок. Считывающие элементы размещаются в позициях, соответствующих информационным и проверочным битам кодового слова. Процесс декодирования и коррекции ошибок осуществляется с помощью алгоритма Берлекампа–Мэсси, который по вычисленным синдромам находит полином локаторов ошибок и определяет их точные позиции для последующего исправления.

4) Уровень точного отсчета и цифровая обработка сигналов. Для повышения разрешающей способности системы наряду с абсолютным декодированием применяется цифровая обработка периодических аналоговых сигналов, формируемых при считывании шкалы. Эти сигналы содержат информацию о субпиксельном смещении и позволяют существенно повысить точность позиционирования без конструктивных изменений кодовой шкалы.

Анализ на синтетических данных (шкала 800×4 пикселя, размер пикселя 7 мкм, период 560 мкм) показал, что наилучшее разрешение достигается при комбинированном подходе, включающем многочастотную фазовую оценку, адаптивную фильтрацию Калмана, агрессивное сглаживание (медианная и гауссова фильтрация) и калибровку по среднему значению для компенсации систематической составляющей погрешности [6]. При тестировании на семи типах искажений достигнуто стандартное отклонение менее 20 нм.

Выводы. Предложенная двухуровневая архитектура позволяет реализовать цифровой преобразователь угла с единственной информационной дорожкой, обеспечивая уровень отказоустойчивости, традиционно достигаемый многодорожечными системами. Модели на основе БЧХ-кодов и алгоритмы самокоррекции гарантируют корректное определение абсолютного положения даже при серьёзных повреждениях маски. Применение методов цифровой обработки периодических сигналов обеспечивает субсекундный (нанометровый) уровень точности без усложнения конструкции шкалы. В совокупности эти методы позволяют рассматривать представленную систему как синергетическую интеграцию теории помехоустойчивого кодирования и методов цифровой обработки сигналов в рамках единой архитектуры цифрового преобразователя угла.

Список использованных источников:

1. Zhao M, Yuan Y, Luo L, Li X. A Review: Absolute Linear Encoder Measurement Technology. *Sensors*. 2025. 25(19): 5997. <https://doi.org/10.3390/s25195997>
2. Ozhiganov, A. A. (2015). The Use of Hamming Codes in Digital Angle Converters Based on Pseudo-Random Code Scales. *Measurement Techniques*. 58. 10.1007/s11018-015-0746-7.
3. Алексеева В. В., Ожиганов А. А. Аналитическая модель системы считывания информации с псевдослучайной кодовой шкалы методом „окна“. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2025. 68(11): 977–982. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2025-68-11-977-982>
4. Алексеева В. В., Ожиганов А. А. Модель самокорректирующегося цифрового преобразователя угла на основе псевдослучайной кодовой шкалы. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2026. 69(2) – Принято к публикации
5. Алексеева В. В. Цифровой преобразователь угла повышенной информационной надежности. *Труды МАИ*. 2026 – Принято к публикации
6. Oleg U. Lashmanov, Aleksandr S. Vasilev, Anna V. Vasileva, Andrei G. Anisimov, Valery V. Korotaev. High-precision absolute linear encoder based on a standard calibrated scale. *Measurement*. 2018. 123: 226–234. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.071>