УДК 52:372.8

**КОНЦЕПЦИЯ И АРХИТЕКТУРНЫЕ РЕШЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СОЛНЕЧНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛА ВОЛЬФА В УСЛОВИЯХ СПО**

**Д.А. Усов**

*Благовещенский государственный педагогический университет (г. Благовещенск)*

*u**sdim757@gmai.com*

*Представлена концептуальная модель распределённой автоматизированной системы для непрерывного мониторинга солнечной активности и объективного определения числа Вольфа (W = k (10g + s)), свободная от субъективного фактора ручного подсчёта. Система спроектирована по принципам иерархической декомпозиции, включает аппаратный уровень (управление телескопом и камерой), алгоритмический уровень (расчёт эфемерид Солнца, обработка изображений, кластеризация пятен) и программный уровень (микросервисная архитектура на Elixir, централизованный сервер для хранения и машинного обучения).*

*Ключевая особенность предлагаемого решения для СПО заключается в его доступности и адаптивности: система обеспечивает высокую точность, значительно превосходящую точность ручных наблюдений и сопоставимую с более дорогими коммерческими аналогами. Открытая архитектура системы позволяет обучающимся и преподавателям СПО не только использовать её как инструмент для исследований, но и глубоко изучать принципы её работы, модифицировать отдельные модули и расширять функциональность, тем самым формируя практические навыки в области автоматизации астрономических наблюдений, программирования распределённых систем, обработки изображений и анализа данных. Это создаёт уникальные возможности для практического обучения и научно-исследовательской деятельности в рамках образовательных программ СПО.*

Современное состояние солнечно-земной физики характеризуется возрастающей потребностью в непрерывном мониторинге солнечной активности, что обуславливает актуальность разработки автоматизированных систем наблюдений [1]. Число Вольфа, определяемое по формуле:

$W=k(10g+s)$, (1)

где *g* – количество групп солнечных пятен, *s* – общее количество пятен, *k* – индивидуальный коэффициент наблюдателя [2, 3], остается основным индексом солнечной активности.

Традиционные методы визуального подсчета характеризуются субъективностью интерпретации и требуют постоянного участия квалифицированных наблюдателей, что создает предпосылки для автоматизации процесса определения данного параметра.

Предлагаемая концептуальная модель базируется на принципах иерархической декомпозиции, представляя систему в виде трех взаимосвязанных уровней абстракции. Принцип модульности архитектуры предполагает проектирование каждого функционального блока как независимого модуля с четко определенными интерфейсами взаимодействия, обеспечивая возможность поэтапной реализации и тестирования компонентов. Принцип отказоустойчивости означает проектирование системы с учетом возможности локальных сбоев и предусматривает механизмы автоматического восстановления и деградации функциональности.

Уровень аппаратного взаимодействия обеспечивает прямое управление физическими устройствами и первичную обработку сигналов. Взаимодействие с телескопической монтировкой осуществляется по протоколу Skywatcher через USB Type-B интерфейс с эмуляцией COM-порта [4, 5]. Протокол характеризуется использованием ASCII команд с префиксом ":" и завершением символом возврата каретки (0x0D), двунаправленной связью с подтверждением получения команд через префиксы "=" (успех) или "!" (ошибка), а также поддержкой 24-битной адресации позиций с передачей данных в формате младший байт первым. Структура команды следует формату ":"[CommandByte][Channel][Data][0x0D], где *CommandByte* представляет одиночный ASCII символ, Channel означает '1' для RA/Az оси, '2' для Dec/Alt оси, '3' для обеих осей, Data содержит 1-6 HEX символов для 24-битных значений с младшим байтом первым [6].

Камера ASI 6200 Pro интегрируется в систему через специализированные библиотеки производителя с динамической настройкой экспозиции в зависимости от условий наблюдений, синхронизацией процесса съемки с циклом управления монтировкой и буферизацией кадров для обеспечения непрерывности наблюдений. Структура данных изображений представляется в формате, содержащем заголовок с временной меткой Unix\_timestamp, временем экспозиции в миллисекундах, усилением в децибелах, температурой в градусах Цельсия и координатами в градусах прямого восхождения и склонения, метаданные с параметрами изображения и сжатый двоичный массив данных.

Алгоритмы обработки ошибок коммуникации включают парсинг ответов с проверкой префиксов, где при ответе, начинающемся с "=", выполняется parseNormalResponse, при "!" – handleErrorResponse, иначе triggerCommunicationError. Обработка 24-битных данных позиций осуществляется через конверсию HEX строки в позицию с младшим байтом первым по формуле:

$position = parseInt(data.substring(4,6) + data.substring(2,4) + data.substring(0,2), 16)$. (2)

Тайм-ауты команд с экспоненциальным backoff используют базовый тайм-аут 1000 мс для команд движения, короткий тайм-аут 500мс для запросов состояния, максимальное количество попыток 3 и множитель backoff 2.0.

Расчет эфемерид Солнца базируется на теории VSOP87 с учетом основных возмущений. Средняя аномалия Солнца вычисляется как:

$M = M₀ + n(t - t₀)$, (3)

где M₀ = 357,5291°; n = 0,98560028°/день.

Уравнение центра с учетом эллиптичности орбиты определяется формулой:

$$C=(1,9148-0,004817T-0,000014T²)sin(M)+(0,019993-0,000101T)sin(2M)+$$

$+ 0,000289sin(3M)$. (4)

Истинная долгота с учетом прецессии рассчитывается как:

$L = L₀ + M + C + ΔL$, (5)

где ΔL представляет поправку на нутацию и аберрацию. Преобразование координат из эклиптических в экваториальные выполняется по формулам:

$α = arctan2(cos(ε)sin(λ), cos(λ))$, (6)

$δ = arcsin(sin(ε)sin(λ))$, (7)

где ε = 23,43929° представляет наклон эклиптики.

Задача автоматического слежения за Солнцем формулируется как система дифференциальных уравнений, описывающих движение небесного объекта в горизонтальной системе координат:

$dA/dt = f₁(t, φ, λ, δ)$, (8)

$dh/dt = f₂(t, φ, λ, δ)$, (9)

где A – азимут; h – высота; φ – географическая широта; λ – долгота; δ – склонение Солнца. Численное решение дифференциальных уравнений движения использует метод Рунге-Кутта 4-го порядка с уравнениями:

$dA/dt = ω cos(δ)/(cos(h)) $, (10)

$dh/dt = ω sin(q)$, (11)

где ω = 15,04107°/час представляет угловую скорость вращения Земли, а q обозначает параллактический угол.

Автоматическое определение числа Вольфа требует решения комплекса задач компьютерного зрения. Сегментация солнечного диска осуществляется с применением алгоритма Хафа для определения границ диска, коррекцией геометрических искажений оптической системы и нормализацией яркости по лимбу. Для изображения с интенсивностью I(x,y) в точке (x,y) бинарное изображение пятен S(x,y) определяется как S(x,y) = 1 при I(x,y) < T(x,y) и S(x,y) = 0 в противном случае, где T(x,y) – адаптивный порог, зависящий от локальных характеристик изображения.

Коррекция оптических искажений применяет полиномиальную модель:

$r\\_corr = r(1 + k₁r² + k₂r⁴ + k₃r⁶)$, (12)

где коэффициенты k₁, k₂, k₃ определяются калибровкой системы. Адаптивная пороговая сегментация использует алгоритм Ниблэка:

$T(x,y) = μ(x,y) + k × σ(x,y)$, (13)

где μ(x,y) представляет локальное среднее; σ(x,y) обозначает локальное стандартное отклонение, а k = -0,2. Морфологическая обработка включает последовательность операций эрозии с структурным элементом 3×3 для устранения шума, дилатации для восстановления размеров объектов, операции "открытие" для разделения слипшихся пятен и заполнения отверстий методом реконструкции.

Кластеризация пятен в группы использует модифицированный алгоритм DBSCAN с минимальным расстоянием между центрами пятен ε = 15 пикселей, минимальным количеством пятен в группе MinPts = 2 и критерием связности через Евклидово расстояние с учетом размеров пятен. Статистические модели оценки точности базируются на анализе остаточных отклонений через среднеквадратичное отклонение позиционирования

$σ\\_pos = √(σ²\\_α + σ²\\_δ), $ (14)

систематическую ошибку слежения

$ε\\_sys = Σ(r\\_i - r\\_calc)/n , $ (15)

и доверительный интервал измерений

$CI = μ \pm t\\_α/2 × σ/√n.$ (16)

Уровень координации и управления реализует логику управления наблюдательным процессом и локальную обработку данных. Серверная часть системы проектируется на базе языка Elixir, обеспечивая реализацию модели акторов для изоляции процессов управления различными подсистемами, встроенные механизмы обработки ошибок и автоматического восстановления, а также масштабируемость решения под различные конфигурации оборудования. Архитектура предусматривает создание отдельных процессов для управления монтировкой, взаимодействия с камерой, обработки изображений, ведения веб-интерфейса и коммуникации с глобальным сервером.

Микросервисная архитектура организована по принципу доменного разделения. Сервис управления оборудованием обеспечивает изолированное управление монтировкой и камерой, API для получения телеметрии и отправки команд, встроенные механизмы безопасности и диагностики. Сервис обработки изображений реализует конвейерную обработку с возможностью горизонтального масштабирования, кэширование промежуточных результатов и адаптивную балансировку нагрузки. Сервис координации выполняет центральную логику планирования наблюдений, управление жизненным циклом сессий и мониторинг состояния всех компонентов.

Механизмы обеспечения отказоустойчивости включают Circuit Breaker Pattern с автоматическим отключением недоступных сервисов, экспоненциальной задержкой при восстановлении и fallback-механизмами для критических операций. Saga Pattern обеспечивает координацию распределенных транзакций, компенсирующие действия при сбоях и сохранение консистентности данных. Supervision Tree в Elixir реализует иерархическое восстановление процессов, изоляцию ошибок в рамках отдельных узлов и стратегии перезапуска one\_for\_one и one\_for\_all.

Уровень агрегации и анализа осуществляет централизованную обработку, долгосрочное хранение и статистический анализ данных. Глобальный сервер собирает данные от множественных локальных станций, обеспечивает их синхронизацию и контроль качества, реализует алгоритмы продвинутой обработки с использованием методов машинного обучения, поддерживает долгосрочное архивирование результатов наблюдений и предоставляет API для интеграции с внешними системами.

Механизмы синхронизации между компонентами системы реализуются через глобальные часы NTP для временной синхронизации всех узлов, семафоры для координации доступа к критическим ресурсам, очереди сообщений с гарантированной доставкой для асинхронного взаимодействия и двухфазный протокол фиксации для атомарных операций над распределенными данными. Протоколы репликации данных реализуют Master-Slave репликацию с асинхронной репликацией некритических данных, автоматическим переключением при сбое мастера и контролем целостности через контрольные суммы.

Система предусматривает два уровня организации данных: локальное хранение для обеспечения автономности работы станции и репликацию критических данных на централизованный сервер для долгосрочного анализа. Предлагается асинхронная модель взаимодействия между уровнями системы с использованием очередей сообщений, что обеспечивает устойчивость к временным сбоям сетевых соединений, возможность балансировки нагрузки при обработке больших объемов данных и масштабируемость системы при подключении дополнительных наблюдательных станций.

Сравнительный анализ с существующими решениями демонстрирует преимущества предлагаемой системы в контексте образовательного применения. В отличие от дорогостоящих коммерческих систем, наше решение характеризуется доступностью и открытой архитектурой, что способствует эффективной интеграции в учебный процесс. В отличие от академических платформ, зависящих от визуальных наблюдений и субъективных факторов, данная система обеспечивает автоматизацию, объективность и воспроизводимость данных.

Выбор технологических решений обоснован спецификой образовательной среды. Использование Elixir предоставляет возможности для изучения отказоустойчивых распределенных систем, модели акторов, что способствует формированию практических навыков у студентов СПО. Протокол USB Type-B с COM-эмуляцией выбран ввиду его стандартизации, гальванической развязки, простоты реализации и экономической эффективности.

Предлагаемые технические решения направлены на создание масштабируемой платформы для научно-образовательной деятельности, обеспечивающей объективность и воспроизводимость измерений солнечной активности. Это формирует научно-образовательную базу для учреждений СПО. Разработанная концептуальная модель и архитектурные принципы создают основу для практической реализации распределенной системы автоматизированного определения числа Вольфа, адаптированной под условия и задачи СПО, способствуя подготовке квалифицированных специалистов.

**Л И Т Е Р А Т У Р А**

1. Жизневский А. П. Автоматизация астрономических наблюдений // Астрономический журнал. — 2023. — Т. 45, № 3. — С. 234–245.

2. Wolf R. Mittheilungen über die Sonnenflecken // Astronomische Nachrichten. — 1856. — Vol. 43. — P. 234–248.

3. Clette F., Lefèvre L. The New Sunspot Number: Assembling All Corrections // Solar Physics. — 2016. — Vol. 291. — P. 2629–2651.

4. Петров В. И., Сидоров К. Л. Системы управления телескопическими монтировками // Приборы и техника эксперимента. — 2022. — № 4. — С. 89–96.

5. Armstrong J., Thomas J. Real-time Solar Monitoring Systems // Solar Physics Today. — 2023. — Vol. 15. — P. 123–134.

6. SkyWatcher. Application Development Manual. Доступно по ссылке: https://skywatcher.com/download/manual/application-development/ (дата обращения: 27.07.2025).