# Углубленная дорожная карта разработки аппаратно-программного комплекса CAM модуля

## 1. Анализ нового технического задания

На основе предоставленного Технического задания на доработку и поставку оборудования для обеспечения выдачи сигнала синхронизации 1PPS с использованием приема потока T2-MI с КА (далее – ТЗ) были выявлены ключевые требования и условия, которые легли в основу данной углубленной дорожной карты. Особое внимание уделено специфике реализации на базе TV CAM модулей и требованиям к точности синхронизации.

## 2. Детализация требований к аппаратной части CAM модуля

Разработка аппаратной части CAM модуля является критически важным этапом, определяющим базовые возможности и производительность всего комплекса. Данный раздел детализирует шаги и требования к аппаратной реализации, учитывая форм-фактор CAM модуля и специфические интерфейсы.

### 2.1. Выбор и обоснование элементной базы

Выбор элементной базы должен основываться на требованиях к производительности, энергопотреблению, форм-фактору CAM модуля, доступности компонентов и стоимости. Ключевые компоненты включают:

* **Основной процессор/микроконтроллер:** Для управления общими функциями модуля, взаимодействия с CI-слотом, обработки данных и управления периферией. Требования: высокая производительность, низкое энергопотребление, наличие необходимых интерфейсов (например, для взаимодействия с ПЛИС, возможно, для отладки).
* **ПЛИС (FPGA/CPLD):** Центральный элемент для реализации высокоскоростной обработки T2-MI потока, выделения синхросмеси, формирования 1PPS сигнала и генерации выходного сигнала 1 ГГц. Выбор ПЛИС должен учитывать:
  + **Объем логики:** Достаточный для реализации всех алгоритмов обработки T2-MI, синхронизации и формирования выходного сигнала.
  + **Рабочая частота:** Способность работать на частотах, необходимых для обработки T2-MI и генерации 1 ГГц.
  + **Наличие высокоскоростных интерфейсов:** Для приема T2-MI (например, через интерфейс CI) и вывода 1 ГГц.
  + **Энергопотребление:** Соответствие ограничениям по питанию для CAM модуля.
  + **Наличие встроенных PLL/DLL:** Для точной синхронизации и формирования частот.
* **Интерфейсные микросхемы:** Для обеспечения взаимодействия с CI-слотом (Common Interface) приемника-декодера. Необходимо изучить спецификации CI для выбора соответствующих трансиверов и контроллеров.
* **Компоненты для формирования 1 ГГц выхода:** Высокочастотные генераторы, усилители, фильтры и согласующие цепи, обеспечивающие стабильный и чистый сигнал 1 ГГц с требуемыми характеристиками.
* **Модуль GNSS (опционально):** Если планируется реализация варианта с синхронизацией от GNSS, необходимо выбрать компактный и высокоточный GNSS-модуль с выходом 1PPS. Требования: точность 1PPS ±50 нс, низкое энергопотребление, малые габариты.
* **Компоненты питания:** Высокоэффективные DC/DC преобразователи, LDO стабилизаторы, обеспечивающие стабильное питание для всех узлов модуля в условиях ограниченного энергопотребления CI-слота.
* **Память:** Для хранения прошивки ПЛИС, программного обеспечения микроконтроллера, конфигурационных данных и временных буферов.

### 2.2. Схемотехническое проектирование

* **Разработка принципиальных электрических схем:** Создание детальных схем для каждого функционального блока, включая:
  + Схема питания и распределения напряжения.
  + Схемы интерфейсов CI, 1PPS, 1 ГГц.
  + Схемы подключения ПЛИС, процессора, памяти.
  + Схемы индикации и управления (если предусмотрены аппаратные кнопки/индикаторы).
  + Схемы для опционального GNSS-модуля.
* **Выбор пассивных компонентов:** Резисторы, конденсаторы, индуктивности, соответствующие требованиям по точности, стабильности и рабочим частотам.
* **Анализ целостности сигналов (Signal Integrity) и целостности питания (Power Integrity):** Проведение предварительного анализа для высокоскоростных цепей (T2-MI, 1 ГГц) с целью минимизации отражений, перекрестных помех и просадок напряжения.

### 2.3. Проектирование печатной платы (PCB)

* **Выбор стека слоев:** Определение оптимального количества слоев PCB (например, 6-8 слоев) для обеспечения необходимой разводки высокоскоростных сигналов, питания и земли.
* **Трассировка высокоскоростных цепей:** Особое внимание к трассировке цепей T2-MI и 1 ГГц:
  + Контролируемый импеданс дорожек.
  + Минимизация длины и согласование длин дифференциальных пар.
  + Использование экранирующих слоев и переходных отверстий для снижения помех.
  + Разделение аналоговых и цифровых цепей.
* **Размещение компонентов:** Оптимальное размещение компонентов для минимизации длины сигнальных цепей, обеспечения теплоотвода и соответствия форм-фактору CAM модуля.
* **Проектирование системы питания:** Разводка шин питания с учетом минимальных потерь и шумов, использование развязывающих конденсаторов.
* **Тепловой расчет:** Анализ тепловыделения компонентов и разработка решений для отвода тепла (например, использование теплопроводящих паст, радиаторов, если позволяет форм-фактор).

### 2.4. Изготовление и монтаж опытных образцов

* **Заказ производства PCB:** Выбор производителя PCB, способного обеспечить требуемый класс точности и качество.
* **Закупка компонентов:** Организация закупки всех необходимых электронных компонентов, включая долгосрочное планирование для критически важных или дефицитных позиций.
* **Монтаж компонентов:** Автоматизированный или ручной монтаж компонентов на печатные платы. Контроль качества пайки.

### 2.5. Первичное тестирование и отладка аппаратной части

* **Проверка питания:** Измерение напряжений и токов потребления на различных узлах.
* **Тестирование интерфейсов:** Проверка работоспособности CI-интерфейса, 1PPS выхода, 1 ГГц выхода с использованием специализированного оборудования (осциллографы, анализаторы спектра).
* **Функциональная проверка основных блоков:** Верификация работы процессора, памяти, ПЛИС (базовая загрузка прошивки).
* **Выявление и устранение дефектов:** Идентификация производственных дефектов, ошибок монтажа или проектирования, их устранение и документирование.

### 2.6. Документирование аппаратной части

* Разработка полного комплекта конструкторской документации (КД) в соответствии с ЕСКД: принципиальные схемы, перечни элементов, сборочные чертежи, спецификации, топология печатной платы, ведомости покупных изделий.
* Подготовка инструкций по монтажу и тестированию аппаратной части.

## 3. Детализация требований к программной части (ПЛИС) CAM модуля

Программная часть, реализованная в ПЛИС, является сердцем CAM модуля, отвечающим за высокоточную обработку T2-MI потока и формирование синхронизирующих сигналов. Детализация этого этапа включает в себя глубокое погружение в алгоритмы и их реализацию.

### 3.1. Архитектура прошивки ПЛИС

Разработка модульной архитектуры прошивки ПЛИС для обеспечения гибкости, тестируемости и возможности дальнейшего масштабирования. Основные функциональные блоки:

* **Модуль приема и демультиплексирования T2-MI:** Отвечает за прием данных из CI-слота, демультиплексирование T2-MI потока, выделение служебной информации и полезной нагрузки. Должен быть устойчив к ошибкам передачи и обеспечивать высокую пропускную способность.
* **Модуль выделения синхросмеси и временных меток:** Ключевой блок, отвечающий за точное извлечение временных меток (например, PTP, NTP или других, используемых в T2-MI) из T2-MI потока. Реализация алгоритмов фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и цифровой фильтрации для минимизации джиттера и обеспечения стабильности синхронизации. Учет особенностей T2-MI спецификации для корректного выделения синхроинформации.
* **Модуль формирования 1PPS:** Генерация импульсного сигнала 1PPS с заданными характеристиками (длительность, уровень) на основе высокоточных временных меток, полученных от модуля выделения синхросмеси. Реализация механизма смещения временного положения 1PPS для компенсации задержек распространения и географических поправок.
* **Модуль генерации 1 ГГц:** Формирование стабильного выходного сигнала на частоте 1 ГГц. Использование встроенных в ПЛИС PLL (Phase-Locked Loop) или внешних высокоточных генераторов тактовых импульсов для обеспечения чистоты и стабильности частоты.
* **Модуль управления и интерфейсов:** Обеспечение взаимодействия с внешним микроконтроллером (если используется) или непосредственно с CI-слотом для настройки параметров, мониторинга состояния и передачи диагностической информации. Реализация регистров управления и статуса.
* **Модуль GNSS-интерфейса (опционально):** Если предусмотрен вариант с GNSS, этот модуль будет отвечать за прием 1PPS сигнала и данных от GNSS-модуля, а также за их интеграцию в общую систему синхронизации для повышения точности.

### 3.2. Разработка HDL-кода и верификация

* **Выбор языка описания аппаратуры (HDL):** Предпочтительно Verilog или VHDL, в зависимости от экспертизы команды. Возможно использование SystemVerilog для более продвинутой верификации.
* **Написание модульного HDL-кода:** Разработка кода для каждого функционального блока с учетом требований к производительности, ресурсам и переносимости. Использование параметризуемых модулей для гибкости.
* **Моделирование и симуляция:** Проведение многоуровневой симуляции:
  + **Модульная симуляция:** Тестирование каждого отдельного блока с использованием тестовых векторов.
  + **Системная симуляция:** Комплексное тестирование всей прошивки ПЛИС с использованием реальных или синтезированных T2-MI потоков, имитацией различных сценариев (потеря пакетов, джиттер, изменение параметров синхронизации).
  + **Верификация с использованием верификационных сред:** Применение методологий UVM (Universal Verification Methodology) или OVM (Open Verification Methodology) для создания полноценной верификационной среды, включающей генераторы стимулов, мониторы, скорборды и функциональное покрытие.
* **Синтез и размещение/трассировка (Place & Route):** Компиляция HDL-кода с использованием САПР ПЛИС (например, Vivado для Xilinx, Quartus для Intel FPGA). Оптимизация по площади, задержкам и энергопотреблению. Анализ временных характеристик (Timing Analysis) для подтверждения соответствия требованиям по частоте.

### 3.3. Отладка на аппаратном уровне

* **Загрузка прошивки:** Загрузка сгенерированного битстрима в ПЛИС на опытных образцах CAM модуля.
* **Использование встроенных отладчиков:** Применение встроенных в ПЛИС отладочных инструментов (например, Xilinx ILA, Intel SignalTap) для мониторинга внутренних сигналов и регистров в реальном времени.
* **Измерение параметров 1PPS и 1 ГГц:** Использование высокоточного измерительного оборудования (осциллографы с высокой частотой дискретизации, частотомеры, анализаторы спектра) для измерения точности, стабильности и чистоты выходных сигналов.
* **Тестирование компенсации задержек:** Проверка корректности работы механизма компенсации задержек с использованием различных сценариев и географических поправок.
* **Стресс-тестирование:** Проверка стабильности работы ПЛИС при длительной нагрузке, изменении температуры и других внешних факторов.

### 3.4. Документирование программной части (ПЛИС)

* **Архитектурное описание:** Детальное описание архитектуры прошивки ПЛИС, включая блок-схемы, диаграммы состояний, описание взаимодействия модулей.
* **Описание алгоритмов:** Подробное описание всех реализованных алгоритмов (выделение синхросмеси, ФАПЧ, компенсация задержек).
* **Исходный код:** Полный исходный HDL-код с подробными комментариями.
* **Тестовая документация:** Описание тестовых сценариев, тестовых векторов, результатов симуляции и аппаратной отладки.
* **Руководство по сборке и прошивке:** Инструкции по компиляции, синтезу и загрузке прошивки в ПЛИС.

## 4. Детализация дорожной карты интеграции и тестирования

Этап интеграции и тестирования является заключительным и наиболее ответственным, поскольку на нем происходит объединение всех разработанных компонентов и их всесторонняя проверка на соответствие требованиям ТЗ. Особое внимание уделяется точности синхронизации и надежности работы.

### 4.1. Интеграция аппаратной и программной частей

* **Загрузка финальной прошивки в ПЛИС:** После завершения разработки и верификации HDL-кода, финальная версия прошивки загружается в ПЛИС на опытных образцах CAM модуля.
* **Интеграция с микроконтроллером (если применимо):** Если в аппаратной части используется отдельный микроконтроллер для управления или взаимодействия с CI-слотом, производится интеграция его программного обеспечения с прошивкой ПЛИС. Это включает определение протоколов обмена данными между микроконтроллером и ПЛИС.
* **Первоначальная настройка и калибровка:** Проведение базовой настройки модуля, включая параметры компенсации задержек, режимы работы, а также калибровку выходного сигнала 1 ГГц. Это может потребовать использования специализированного тестового оборудования.

### 4.2. Разработка и подготовка тестового стенда

* **Проектирование тестового стенда:** Разработка архитектуры и состава тестового стенда, который должен обеспечивать:
  + Подачу T2-MI потока с заданными характеристиками (включая возможность имитации различных сценариев: джиттер, потеря пакетов, изменение параметров синхронизации).
  + Высокоточное измерение 1PPS сигнала (с разрешением лучше 10 нс) относительно эталонного источника времени (например, атомных часов, высокоточного GNSS-приемника).
  + Измерение параметров выходного сигнала 1 ГГц (частота, стабильность, фазовый шум).
  + Возможность имитации CI-слота приемника-декодера для полной проверки взаимодействия.
  + Автоматизацию процесса тестирования.
* **Закупка и сборка оборудования для стенда:** Приобретение необходимого измерительного оборудования (осциллографы, частотомеры, анализаторы спектра, генераторы сигналов), источников T2-MI потока, эталонных источников времени.
* **Разработка программного обеспечения для тестового стенда:** Создание ПО для управления тестовым оборудованием, автоматизации тестовых сценариев, сбора и анализа данных.

### 4.3. Комплексное тестирование

* **Функциональное тестирование:**
  + Проверка корректности приема и обработки T2-MI потока через CI-слот.
  + Верификация выделения синхросмеси и временных меток из T2-MI потока.
  + Тестирование формирования 1PPS сигнала с заданными характеристиками (длительность, уровень).
  + Проверка работы механизма смещения временного положения 1PPS для компенсации задержек распространения и географических поправок.
  + Тестирование сохранения формирования сигнала с заявленной точностью при отсутствии приема сигналов с космического аппарата в течение не менее 10 минут.
  + Проверка генерации выходного сигнала 1 ГГц.
  + Тестирование локального управления и индикации состояния.
* **Тестирование производительности:**
  + **Измерение точности 1PPS:** Детальное измерение смещения переднего фронта 1PPS сигнала относительно эталонного источника времени для обоих сценариев:
    - **С GNSS:** Подтверждение точности ± 50 нс.
    - **Без GNSS (только из T2-MI):** Подтверждение точности ± 1 мкс. Проведение тестов в различных условиях T2-MI потока (стабильный, с джиттером, с потерями).
  + **Измерение стабильности 1PPS:** Оценка долговременной стабильности 1PPS сигнала, в том числе при изменении внешних условий (температура) и при кратковременных прерываниях T2-MI потока.
  + **Измерение задержек:** Точное измерение сквозных задержек от момента приема T2-MI до формирования 1PPS и 1 ГГц. Верификация эффективности механизмов компенсации задержек.
  + **Измерение параметров 1 ГГц:** Точность частоты, стабильность, фазовый шум, уровень выходного сигнала.
* **Тестирование надежности:**
  + **Длительные прогоны:** Непрерывная работа модуля в течение длительного времени (несколько суток) для выявления скрытых дефектов и нестабильностей.
  + **Тестирование в условиях окружающей среды:** Проверка работоспособности при различных температурах (в пределах рабочего диапазона), влажности.
  + **Тестирование на отказ:** Имитация различных сбоев (например, кратковременное пропадание T2-MI потока, изменение параметров питания) и проверка реакции модуля.
* **Тестирование на соответствие стандартам:** Проверка соответствия требованиям безопасности (ГОСТ 55696-2013, ГОСТ 12.2.007-75) и электромагнитной совместимости (ЭМС).

### 4.4. Анализ результатов тестирования и доработка

* **Сбор и анализ данных:** Систематический сбор и анализ всех данных, полученных в ходе тестирования. Использование статистических методов для оценки точности и стабильности.
* **Выявление и устранение дефектов:** Идентификация любых обнаруженных дефектов, несоответствий требованиям или проблем с производительностью. Разработка планов по их устранению (корректировка аппаратной части, доработка прошивки ПЛИС).
* **Повторное тестирование:** Проведение повторного тестирования после внесения изменений для подтверждения устранения дефектов и отсутствия новых, а также для верификации, что изменения не внесли регрессий.

### 4.5. Документирование результатов тестирования

* **Протоколы испытаний:** Детальные протоколы всех проведенных тестов с указанием условий, методик, результатов и выводов.
* **Отчеты о тестировании:** Сводные отчеты по результатам функционального тестирования, тестирования производительности, надежности и соответствия стандартам.
* **Акты приемки:** Подготовка актов приемки опытных образцов.
* **Обновление эксплуатационной и технической документации:** Внесение изменений и дополнений в документацию на основе результатов тестирования и выявленных особенностей работы модуля.

## 5. Управление проектом и поставка

Этот раздел описывает общие аспекты управления проектом, включая планирование, контроль, управление рисками и, наконец, поставку опытных образцов.

### 5.1. Планирование и контроль проекта

* **Детализация плана-графика:** Разработка подробного плана-графика работ с указанием сроков, ответственных лиц и контрольных точек для каждого этапа и подэтапа. Использование инструментов управления проектами (например, MS Project, Jira, Trello).
* **Управление ресурсами:** Планирование и распределение человеческих ресурсов (инженеры-схемотехники, ПЛИС-разработчики, тестировщики), оборудования и бюджета.
* **Управление рисками:** Идентификация потенциальных рисков (например, задержки в поставках компонентов, технические сложности, изменение требований), оценка их влияния и разработка планов по их минимизации или устранению.
* **Контроль качества:** Внедрение процедур контроля качества на всех этапах разработки, включая ревью схем, кода, документации.
* **Регулярные совещания:** Проведение регулярных совещаний с командой разработчиков и заказчиком для отслеживания прогресса, обсуждения проблем и принятия решений.

### 5.2. Управление изменениями

* **Процедура управления изменениями:** Разработка и внедрение формализованной процедуры для обработки запросов на изменения в требованиях или дизайне. Это включает анализ влияния изменений на сроки, стоимость и функциональность.
* **Система контроля версий:** Использование систем контроля версий (например, Git) для управления исходным кодом ПЛИС, схемотехнической документацией и другими проектными файлами.

### 5.3. Производство опытных образцов

* **Подготовка к серийному производству (для опытной партии):** Оптимизация процессов сборки и тестирования для производства 250 опытных образцов. Это может включать разработку автоматизированных тестовых стендов для массового контроля качества.
* **Контроль качества на производстве:** Внедрение процедур входного контроля компонентов, пооперационного контроля на всех этапах сборки и выходного контроля готовых изделий.

### 5.4. Поставка и документация

* **Подготовка к поставке:** Упаковка, маркировка и организация логистики для поставки 250 опытных образцов по указанному адресу.
* **Формирование комплекта документации:** Подготовка полного комплекта эксплуатационной документации (руководства пользователя, паспорта), технической документации (схемы, описания, протоколы испытаний) на русском языке в соответствии с требованиями ТЗ.
* **Гарантийные обязательства:** Обеспечение гарантийных обязательств на оборудование в течение не менее 12 месяцев с момента поставки, включая безвозмездное устранение дефектов или замену вышедших из строя узлов.

### 5.5. Сроки выполнения работ

На основе ТЗ, общий срок поставки опытных образцов составляет не более 8 месяцев с даты заключения договора. Детализация сроков по этапам:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Наименование этапа | Отчетный материал | Сроки |
| **Этап 1: Разработка РКД** | РКД на опытные образцы изделий | 01.09.2025 - 31.10.2025 |
| **Этап 2: Разработка программного обеспечения** (для выделения синхросмеси из потока T2-MI и формирования сигнала 1PPS) | Программное обеспечение | 01.09.2025 - 28.11.2025 |
| **Этап 3: Изготовление и отладка опытных образцов** (включая аппаратную часть и интеграцию ПО) | 250 опытных образцов | 31.10.2025 - 15.01.2026 |
| **Этап 4: Проведение испытаний и отладка изделия** (для достижения заявленных характеристик, включая доработанную РКД и ОО) | Доработанная РКД и ОО | 15.01.2026 - 31.03.2026 |

*Примечание: Даты в таблице приведены в соответствии с предоставленным ТЗ и могут быть скорректированы по результатам детального планирования проекта.*