# Доклад: Синхронизация 1PPS с использованием T2-MI потока и GNSS

## Введение

Точная синхронизация времени является критически важным аспектом для множества современных систем, от телекоммуникаций и энергетики до финансовых операций и научных исследований. В контексте цифрового телерадиовещания, особенно в сетях DVB-T2 с одночастотным вещанием (SFN), высокоточная синхронизация необходима для обеспечения целостности сигнала и предотвращения интерференции. Сигнал 1PPS (один импульс в секунду) является широко используемым стандартом для передачи точной временной метки. Данный доклад посвящен анализу возможностей достижения высокой точности синхронизации 1PPS с использованием двух основных источников: глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) и потока T2-MI (Modulator Interface) стандарта DVB-T2, а также рассмотрению задержек, которые необходимо учитывать при реализации таких систем.

## 1. Обзор методов синхронизации 1PPS

### 1.1. Синхронизация 1PPS с использованием GNSS

Глобальные навигационные спутниковые системы, такие как GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou, являются одним из наиболее точных и доступных источников синхронизации времени. Каждый спутник GNSS оснащен высокоточными атомными часами и постоянно передает сигналы, содержащие информацию о своем положении и точном времени. Приемник GNSS на Земле, получая сигналы от нескольких спутников, может вычислить свое местоположение и, что более важно для целей синхронизации, определить точное время с высокой степенью прецизионности. Сигнал 1PPS, генерируемый GNSS-приемником, представляет собой импульс, передний фронт которого точно совпадает с началом каждой секунды по шкале UTC (Coordinated Universal Time).

**Принцип работы:** GNSS-приемник измеряет время прихода сигналов от различных спутников. Зная точное время отправления сигнала со спутника (которое передается в самом сигнале) и его текущее положение, приемник может вычислить расстояние до спутника. Путем решения системы уравнений, основанных на измерениях от как минимум четырех спутников, приемник определяет свое трехмерное положение и корректирует свои внутренние часы, синхронизируя их с атомными часами спутников. Выход 1PPS является прямым результатом этой внутренней синхронизации.

**Достижимая точность:** Современные GNSS-приемники способны обеспечивать точность 1PPS сигнала в диапазоне **единиц или десятков наносекунд (нс)** относительно UTC. Например, для высококачественных GNSS-модулей типовое значение смещения переднего фронта 1PPS составляет **±50 нс** [1]. Эта высокая точность обусловлена использованием атомных часов на спутниках и сложными алгоритмами обработки сигналов, компенсирующими различные источники ошибок, такие как атмосферные задержки, многолучевость и шумы приемника.

### 1.2. Синхронизация 1PPS из потока T2-MI

T2-MI (DVB-T2 Modulator Interface) – это протокол, используемый для передачи данных DVB-T2 от шлюза DVB-T2 к модуляторам. Он содержит не только полезную нагрузку (транспортные потоки), но и важную служебную информацию, включая данные для синхронизации. В частности, T2-MI поток содержит временные метки (T2-timestamps), которые используются для синхронизации модуляторов в одночастотных сетях (SFN), обеспечивая точное время излучения сигнала.

**Принцип работы:** В T2-MI потоке передаются специальные пакеты, содержащие информацию о времени. Эти временные метки генерируются на стороне шлюза DVB-T2, который, в свою очередь, может быть синхронизирован с высокоточным источником времени (например, GNSS или атомными часами). Устройство, принимающее T2-MI поток, может извлекать эти временные метки и использовать их для восстановления собственной временной шкалы и генерации сигнала 1PPS. Этот метод позволяет распространять точное время по сети DVB-T2 без необходимости установки отдельных GNSS-приемников на каждом узле.

**Достижимая точность:** Точность 1PPS сигнала, извлеченного исключительно из T2-MI потока (без дополнительной внешней синхронизации, такой как GNSS на приемной стороне), существенно зависит от нескольких факторов, включая стабильность источника времени на шлюзе DVB-T2, качество передачи T2-MI потока по сети (наличие джиттера и задержек), а также точность алгоритмов восстановления времени в приемном устройстве. В идеальных условиях, при стабильном и качественном T2-MI потоке, возможно достижение точности в диапазоне **сотен наносекунд или единиц микросекунд (мкс)**. Например, предельная точность, достижимая при восстановлении синхронизации исключительно из T2-MI потока без внешней высокоточной привязки, может составлять **±100 нс** [2], однако на практике она может быть хуже из-за сетевых задержек и джиттера. В некоторых случаях, особенно при наличии значительных сетевых задержек и их вариаций, точность может снижаться до нескольких микросекунд. Важно отметить, что T2-MI не предназначен для передачи времени с такой же наносекундной точностью, как GNSS, но достаточен для синхронизации модуляторов в SFN.

## 2. Факторы, влияющие на точность и задержки в синхронизации

### 2.1. Задержки в системах синхронизации

При работе с высокоточными временными сигналами необходимо учитывать различные типы задержек, которые могут влиять на общую точность синхронизации.

#### 2.1.1. Задержки в GNSS-системах

* **Задержка распространения сигнала:** Сигнал от спутника GNSS проходит через атмосферу Земли (ионосферу и тропосферу), что вызывает задержки. Эти задержки зависят от состояния атмосферы и угла возвышения спутника. Современные GNSS-приемники используют модели атмосферы и двухчастотные измерения для компенсации этих задержек, но остаточные ошибки могут присутствовать.
* **Аппаратные задержки приемника:** Внутренние задержки в самом GNSS-приемнике, связанные с обработкой сигнала, фильтрацией и генерацией 1PPS импульса. Эти задержки обычно стабильны и могут быть откалиброваны производителем.
* **Задержки кабеля и антенны:** Время распространения сигнала по антенному кабелю от антенны до приемника. Длина кабеля напрямую влияет на эту задержку. Для высокоточных применений необходимо точно измерять длину кабеля и учитывать ее в расчетах.

#### 2.1.2. Задержки в T2-MI системах

* **Задержка на шлюзе DVB-T2:** Время, необходимое для формирования T2-MI потока и встраивания временных меток на стороне шлюза. Эта задержка обычно фиксирована для конкретного оборудования.
* **Сетевая задержка:** Время распространения T2-MI потока по IP-сети от шлюза до приемного устройства. Эта задержка может быть переменной (джиттер), особенно в несбалансированных сетях, что является основным источником ошибок синхронизации для T2-MI.
* **Аппаратные задержки приемного устройства:** Внутренние задержки в устройстве, извлекающем временные метки из T2-MI потока и генерирующем 1PPS сигнал. Эти задержки также могут быть откалиброваны.

### 2.2. Источники ошибок и их влияние на точность

#### 2.2.1. Ошибки в GNSS-системах

* **Многолучевость:** Прием сигналов, отраженных от окружающих объектов (зданий, земли), что приводит к искажению прямого сигнала и ошибкам в определении времени прихода. Использование антенн с подавлением многолучевости и выбор оптимального места установки могут минимизировать этот эффект.
* **Доступность спутников:** Недостаточное количество видимых спутников или их неблагоприятное геометрическое расположение (PDOP) может снизить точность определения времени.
* **Помехи и спуфинг:** Внешние радиочастотные помехи или преднамеренная подмена GNSS-сигналов (спуфинг) могут серьезно нарушить синхронизацию. Для критически важных систем применяются методы защиты от помех и аутентификации сигналов.

#### 2.2.2. Ошибки в T2-MI системах

* **Джиттер сетевой задержки:** Наиболее существенный фактор, влияющий на точность синхронизации из T2-MI. Вариации задержки в IP-сети приводят к нестабильности временной метки. Для минимизации джиттера используются специализированные сетевые протоколы (например, PTP - Precision Time Protocol) и высококачественное сетевое оборудование.
* **Точность источника времени на шлюзе:** Если шлюз DVB-T2 не синхронизирован с высокоточным источником времени, то и временные метки в T2-MI потоке будут неточными.
* **Потеря пакетов:** Потеря T2-MI пакетов в сети может привести к временной потере синхронизации или снижению ее точности.

## 3. Возможность достижения заявленных точностей

### 3.1. Достижимость точности с GNSS

Заявленная точность **±50 нс** для 1PPS сигнала при наличии синхронизации от GNSS является вполне достижимой для современных коммерческих GNSS-приемников высокого класса. Многие производители заявляют и демонстрируют такую точность в своих спецификациях. Для обеспечения такой точности необходимо:

* Использовать качественный GNSS-приприемник с низким уровнем джиттера на выходе 1PPS.
* Обеспечить оптимальное расположение GNSS-антенны с хорошим обзором неба и минимальным влиянием многолучевости.
* Учитывать и компенсировать задержки в антенном кабеле.
* Применять методы мониторинга качества GNSS-сигнала для выявления возможных проблем.

### 3.2. Достижимость точности с T2-MI (без GNSS)

Заявленная точность **±100 нс** для 1PPS сигнала, извлеченного только из T2-MI потока (без GNSS на приемной стороне), является амбициозной, но потенциально достижимой в идеальных условиях. Однако, она требует выполнения ряда строгих условий:

* **Высокоточная синхронизация шлюза DVB-T2:** Шлюз, формирующий T2-MI поток, должен быть синхронизирован с источником времени, обеспечивающим точность значительно лучше 100 нс (например, с GNSS-приемником или атомными часами).
* **Контролируемая сетевая среда:** T2-MI поток должен передаваться по сети с минимальным джиттером и стабильной задержкой. В идеале, это должна быть выделенная сеть или сеть с применением протоколов точного времени (PTP, IEEE 1588), которые позволяют компенсировать сетевые задержки и их вариации. В обычной IP-сети без механизмов QoS и PTP достичь такой точности будет крайне сложно, и она, скорее всего, будет в диапазоне микросекунд.
* **Эффективные алгоритмы восстановления времени:** Приемное устройство должно использовать сложные алгоритмы для извлечения временных меток из T2-MI потока, фильтрации джиттера и точного формирования 1PPS сигнала.

В реальных условиях, без использования PTP или других механизмов точной синхронизации по сети, точность 1PPS, извлеченного из T2-MI, может быть в диапазоне **нескольких микросекунд**. Достижение 100 нс без GNSS на приемной стороне является сложной инженерной задачей, требующей тщательного проектирования всей системы синхронизации, включая сетевую инфраструктуру.

## 4. Учет задержек при проектировании системы

Для обеспечения заявленной точности, особенно в случае компенсации времени распространения сигнала через космический аппарат, необходимо тщательно учитывать все задержки.

### 4.1. Компенсация задержек распространения через КА

Сигнал от космического аппарата до приемника на Земле проходит значительное расстояние, что приводит к существенной задержке распространения (сотни миллисекунд). Эта задержка зависит от орбиты спутника и географического положения приемника. Для точной синхронизации необходимо:

* **Точное знание координат:** Географические координаты объекта (широта, долгота, высота) должны быть известны с высокой точностью.
* **Модель орбиты спутника:** Использование актуальных эфемерид спутника для расчета его точного положения в любой момент времени.
* **Расчет задержки:** На основе координат объекта и положения спутника рассчитывается точное время распространения сигнала. Эта задержка затем используется для смещения генерируемого 1PPS сигнала, чтобы он соответствовал

точному времени UTC(SU) на приемной стороне, компенсируя задержку распространения.

### 4.2. Учет задержек в тракте обработки

Помимо задержек распространения, необходимо учитывать и компенсировать задержки, возникающие в самом оборудовании:

* **Задержки в CAM-модуле:** Время, необходимое CAM-модулю для приема T2-MI потока, его обработки, выделения синхросмеси и формирования внутреннего 1PPS сигнала. Эти задержки должны быть измерены и учтены.
* **Задержки в выходном тракте:** Время, необходимое для формирования выходного сигнала 1 ГГц и его передачи до точки использования. Это включает задержки в буферах, усилителях и кабелях.

Для точной компенсации всех этих задержек может потребоваться калибровка системы на этапе разработки и производства, а также возможность программной или аппаратной подстройки временного положения 1PPS сигнала.

## Заключение

Синхронизация 1PPS сигнала является ключевым элементом для многих критически важных инфраструктур. Использование GNSS-приемников обеспечивает наивысшую достижимую точность в диапазоне наносекунд, что делает их предпочтительным выбором для приложений, требующих максимальной прецизионности. В то же время, извлечение 1PPS из T2-MI потока предоставляет альтернативный метод синхронизации, особенно актуальный для распределенных сетей DVB-T2, где установка GNSS-приемников на каждом узле может быть нецелесообразной или невозможной. Однако, достижение высокой точности (порядка 100 нс) при использовании только T2-MI требует тщательного контроля сетевых задержек и джиттера, а также использования высокоточных источников времени на стороне шлюза DVB-T2.

При проектировании систем синхронизации крайне важно учитывать все типы задержек – от распространения сигнала в атмосфере и космосе до внутренних задержек в оборудовании. Только комплексный подход к анализу и компенсации задержек позволит обеспечить заявленную точность и надежность работы системы.

## Список литературы

[1] u-blox. Better understanding of the 1 PPS accuracy specification. [Электронный ресурс]. URL: https://portal.u-blox.com/s/question/0D52p0000CxpFPcCQM/better-understanding-of-the-1-pps-accuracy-specification (дата обращения: 06.07.2025).

[2] ETSI. Digital Video Broadcasting (DVB); Modulator Interface (T2-MI) for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). ETSI TS 102 773 V1.4.1. [Электронный ресурс]. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi\_ts/102700\_102799/102773/01.04.01\_60/ts\_102773v010401p.pdf (дата обращения: 06.07.2025).