

УДК 621.371

Канд. техн. наук П.И. Неежмаков, д-р физ.-мат. наук А.В. Прокопов,  
канд. техн. наук А.М. Гричанюк

## **АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКА "ЛИБИДЬ" ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ ТОЧНОГО ВРЕМЕНИ НА ТЕРРИТОРИЮ УКРАИНЫ И ПРОВЕДЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ СЛИЧЕНИЙ**

*Описана система передачи сигналов точного времени Украины, предложены варианты ее усовершенствования с использованием технических возможностей телекоммуникационного спутника "Либидь".*

*Описано систему передачі сигналів точного часу України, запропоновано варіанти її удосконалення з використанням технічних можливостей телекомунікаційного супутника "Либідь".*

*Ukrainian standard time signal transmission system is described, options of its improvement, using Lybid telecommunication satellite performance capabilities, are proposed.*

Система единого времени Украины создана для обеспечения единства частотно-временных измерений на территории Украины и обеспечения потребителей достоверной частотно-временной информацией.

Единство измерений в Украине достигается передачей потребителям размера единиц времени и частоты от Государственного первичного эталона единиц времени и частоты, размещенного в г. Харькове в Национальном научном центре "Институт метрологии".

Государственный первичный эталон единиц времени и частоты, созданный в 1996 г., представляет собой комплекс, в состав которого входят:

- аппаратура воспроизведения и хранения размеров единиц времени и частоты (три водородных мазера и один цезиевый стандарт времени и частоты);
- аппаратуры хранения шкалы времени и эталонных частот;
- автоматизированная система внутренних сличений;
- автоматизированная система внешних сличений.

Технические характеристики Государственного эталона:

- неисключенная систематическая погрешность, не более  $1 \cdot 10^{-13}$ ;
- нестабильность на интервалах времени от 1000 с до 1 сут, не более  $2 \cdot 10^{-14}$ ;

- диапазон значений интервалов времени, воспроизводимый эталоном, – от  $1 \cdot 10^{-10}$  до  $1 \cdot 10^8$  с, диапазон значений частоты – от 1 до  $7 \cdot 10^{10}$  Гц.

На основании результатов международных сличений Государственного эталона единиц времени и частоты калибровочные и измерительные возможности (Calibration and Measurement Capabilities – СМС) в области частотно-временных измерений были опубликованы в международной базе данных измерительных и калибровочных возможностей (KCDB) Международного бюро мер и весов (BIPM). Всего в таблице СМС опубликовано 30 сервисов [1].

Результаты международных сличений эталона ежемесячно публикуются на сайте BIPM в Циркуляре Т [2]. Эталон принимает участие в формировании шкал Международного атомного времени (TAI) и Международного координированного времени (UTC).

В настоящий момент сигналы точного времени от Государственного первичного эталона единиц времени и частоты доставляются потребителям тремя способами:

1. Передачей сигналов повышенной информативности ("шесть точек") по украинскому радио.

2. Синхронизацией шкалы времени потребителя по протоколу NTP со шкалой времени Государственного эталона через сервер точного времени ННЦ "Институт метрологии" ([ntp.metrology.kharkov.ua](http://ntp.metrology.kharkov.ua)).

3. Передачей размеров единиц времени и частоты в ходе проведения проверок и калибровок стандартов времени и частоты непосредственно на Государственном эталоне.

Все эти способы передачи единицы времени потребителям имеют существенные недостатки: первый – имеет недостаточную надежность и точность, а также требует наличия специализированных устройств для детектирования сигнала "шесть точек"; второй – недоступен потребителям при отсутствии подключения к интернету; третий – требует дополнительных временных и финансовых затрат.

Запуск отечественного телекоммуникационного спутника "Либідь" открывает новые возможности по обеспечению потребителей Украины достоверной частотно-временной информацией.

Оценим возможности спутника "Либідь" по передаче размера единицы частоты.

Для проведения частотных измерений необходимо обеспечить потребителя стабильным во времени сигналом опорной частоты. В настоящий момент стандартными для большинства измерительных приборов являются значения опорной частоты, равные 5 и 10 МГц. Частотный план спутника "Либідь" известен, передаваемые спутником несущие частоты не являются равными или кратными частотам 5 и 10 МГц.

Известны три типовые схемы транспондеров, применяемых на телекоммуникационных спутниках: с непосредственной ретрансляцией сигнала и однократным преобразованием несущей частоты; с непосредственной ретрансляцией сигнала и двойным преобразованием несущей частоты и ретрансляцией сигнала с бортовой обработкой [3]. В том случае, если на спутнике "Либідь" будут использованы транспондеры с непосредственной ретрансляцией частоты, то существует техническая возможность повышения стабильности несущей частоты, принимаемой наземными станциями при помощи сигналов, сформированных на Государственном первичном эталоне единиц времени и частоты. Для реализации подобного технического решения в системе формирования опорной частоты необходимо создать замкнутую систему управления частотой опорного сигнала с обратной связью. Для этого потребуется со-

здать канал связи от Государственного эталона до передающей станции, установить приемную аппаратуру телекоммуникационных сигналов и аппаратуру измерения принимаемой опорной частоты и формирования сигнала коррекции на Государственном эталоне (рис. 1). Подобная система позволит компенсировать нестабильность частоты опорного генератора передающей станции и бортового гетеродина приблизительно на 2 порядка (с  $10^{-6}$  до  $10^{-8}$ ). На рис. 1 аппаратура, которую необходимо разработать, выделена пунктиром.

Данная система управления несущей частотой обладает определенными недостатками. Создание подобной системы требует значительных финансовых затрат, при этом принимаемые частоты неудобны для применения в качестве опорных (стандартными являются частоты 5, 10 МГц и 100 кГц), т.е. необходимо дополнительно создавать аппаратуру преобразования несущей частоты в стандартный ряд опорных частот и поставлять ее каждому потребителю.

В том случае, если транспондеры спутника "Либідь" построены по схеме с бортовой обработкой сигнала (наиболее современный вариант), то никакого воздействия на принимаемую потребителями несущую частоту путем коррекции передаваемой частоты оказать нельзя.

Таким образом, использование спутника "Либідь" для обеспечения потребителей Украины достоверной частотной информацией либо нереализуемо на практике, либо сопряжено со значительными материальными затратами, а значит – малоперспективно.

Оценим возможности спутника "Либідь" по передаче на территорию Украины размера единицы времени.

Для обеспечения потребителей Украины информацией о точном времени необходимо непрерывно передавать сигналы текущей даты, часа, минуты, секунды.

Предлагается на начальном этапе работ по организации передачи сигналов точного времени использовать стандартные функции транспортного протокола передачи цифрового телевидения MPEG2 TS, описанные в стандартах ISO/IEC 13818-1 и ETSI EN 300468.

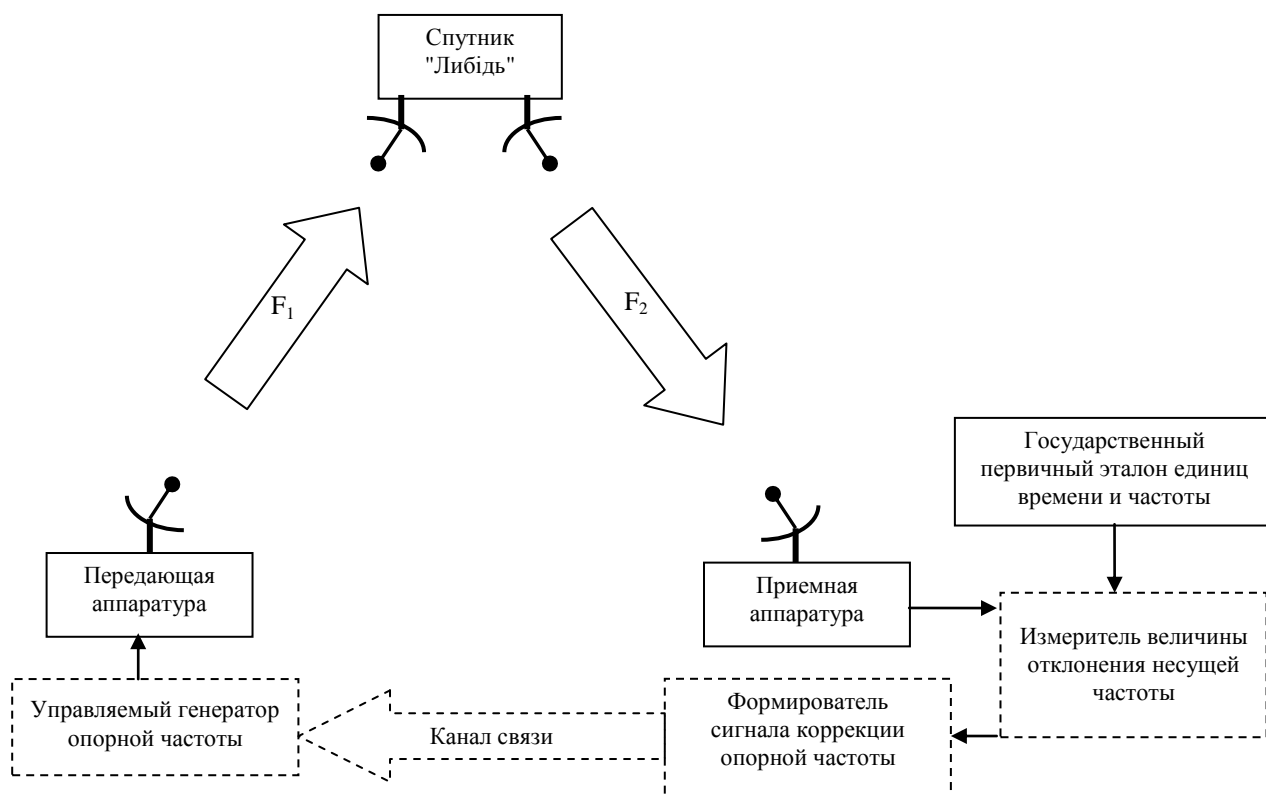


Рис. 1. Вариант построения системы управления несущей частотой передаваемого сигнала

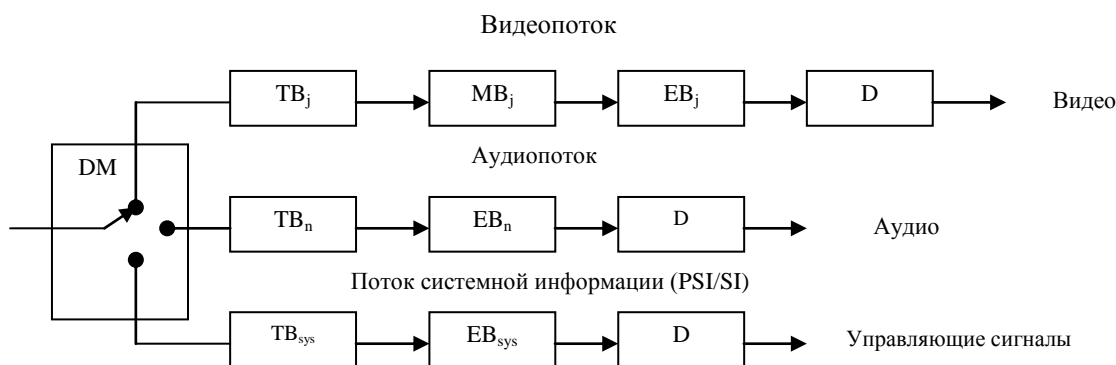


Рис. 2. Модель стандартного декодера T-STD транспортного потока MPEG2 TS:

DM – демultipлексор потоков;  $TB_j$  – транспортный буфер видео;  $MB_j$  – буфер мультиплексирования видео;  $EB_j$  – буфер видеодекодера;  $TB_n$  – транспортный буфер аудио;  $EB_n$  – буфер аудиодекодера;  $TB_{sys}$  – транспортный буфер для PSI/SI;  $EB_{sys}$  – буфер декодера таблиц PSI/SI; D – декодеры видео, аудио и информации PSI/SI.

В соответствии со стандартом ISO/IEC 13818-1 весь информационный поток представляет собой набор пакетов данных длиной по 188 байт каждый. На передающей стороне кодер транспортного потока объединяет в единый поток пакеты с данными различных типов (видео-, аудиоинформация, системная информация). На приемной стороне декодер транспортного потока производит обратное разделение единого потока данных на три различных потока.

На рис. 2 приведена модель стандартного декодера T-STD транспортного потока MPEG2 TS [3].

Для совмещения видео- и аудиоданных в правильной последовательности каждый из пакетов имеет в заголовке информацию о состоянии программных часов кодера в момент формирования пакета (временной штамп программных часов PCR – Program Clock Reference). Тактовая частота программных часов 27 МГц, максимальная погрешность PCR

±500 нс, средняя – десятки нс. Передача значения PCR обязательна, без этой информации правильное восстановление потоков данных на приемной стороне невозможно. Следует отметить, что поле данных PCR представляет собой значение счетчика программных часов длиной 33 бита (или в других реализациях 42 бита), не привязанное к реальному времени.

В стандарте ETSI EN 300468 описана возможность передачи текущих значений даты и времени в виде служебной информации PSI/SI (Program Specific Information/System Information), передаваемой в составе специальных пакетов данных.

Служебная информация PSI/SI формируется в виде таблиц. Таблица TDT (Time end Date Table) содержит информацию о текущей дате и точном времени, таблица TOT (Time Offset Table) – о часовом поясе.

В таблице показан пример кодирования информации о дате и времени в соответствии с рекомендациями, изложенными в ETSI EN 300468.

Синтаксис данных в таблице TDT

Syntax	No. of bits	Identifier
time date section () { table_id	8	uimsbf
section_syntax_indicator	1	bslbf
Reserved_future_use	1	bslbf
Reserved	2	bslbf
Section_length	12	uimsbf
UTC_time}	40	bslbf
<b>section_syntax_indicator:</b>	однобитный индикатор, который должен быть установлен в "0".	
<b>section_length:</b>	12-битовое поле, первые два бита которого должны быть "00". Поле определяет количество байт секции начиная сразу после поля section_length и до конца раздела.	
<b>UTC_time:</b>	40-битовое поле, содержит текущую дату MJD и время UTC. Старшие 16 бит содержат дату в формате MJD, следующие 24 бита кодируют шесть десятичных цифр точного времени UTC (по четыре бита на цифру). Пример: 93/10/13 12:45:00 кодируется как "0xC079124500"	

Следует отметить, что передача таблиц TDT и TOT не является обязательной и ответственность за содержимое и правильность значений таблиц служебной информации PSI/SI несет персонал передающих телевизионных станций.

На основании изложенного можно сделать вывод, что возможности транспортного потока MPEG2 TS позволяют с минимальными

затратами организовать передачу данных о текущем времени и дате от Государственного первичного эталона единиц времени и частоты потребителям Украины через телекоммуникационный спутник "Либидь". Вариант построения подобной системы передачи сигналов точного времени показан на рис. 3.

Для реализации передачи сигналов времени необходимо единожды настроить синхронизацию шкалы времени передающей станции с сервером времени ННЦ "Институт метрологии" по интернету (используется стандартный протокол NTP). Также на передающей станции необходимо настроить автоматическое формирование таблиц TDT и TOT в пакетах служебной информации PSI/SI. Наиболее предпочтительным следует считать темп обновления таблиц, равный 10 Гц.

Передача информации о дате и времени непосредственно от Государственного эталона позволит обеспечить ее высокую достоверность, однако низкий темп обновления информации (несколько раз в секунду) и наличие в составе передающей и приемной аппаратуры специальных буферов не дадут возможности реализовать высокую точность.

Следующим этапом, позволяющим значительно (до десятков наносекунд) повысить точность передаваемых сигналов времени, должна стать работа, направленная на создание программно-аппаратного комплекса, использующего данные программных часов (PCR) для уточнения данных о текущем времени. В случае создания подобной аппаратуры прогнозируемая погрешность передачи сигналов времени может составить десятки наносекунд.

Необходимо отметить, что наличие национального телекоммуникационного спутника открывает возможности по осуществлению высокоточных частотно-временных сличений эталонов единиц времени и частоты методом двухсторонней передачи сигналов времени и частоты через спутник с применением псевдослучайных шумовых кодов TWSTFT (рекомендация МСЭ-R TF.1153-3) [4]. На рис. 4 показана схема проведения подобных сличений.

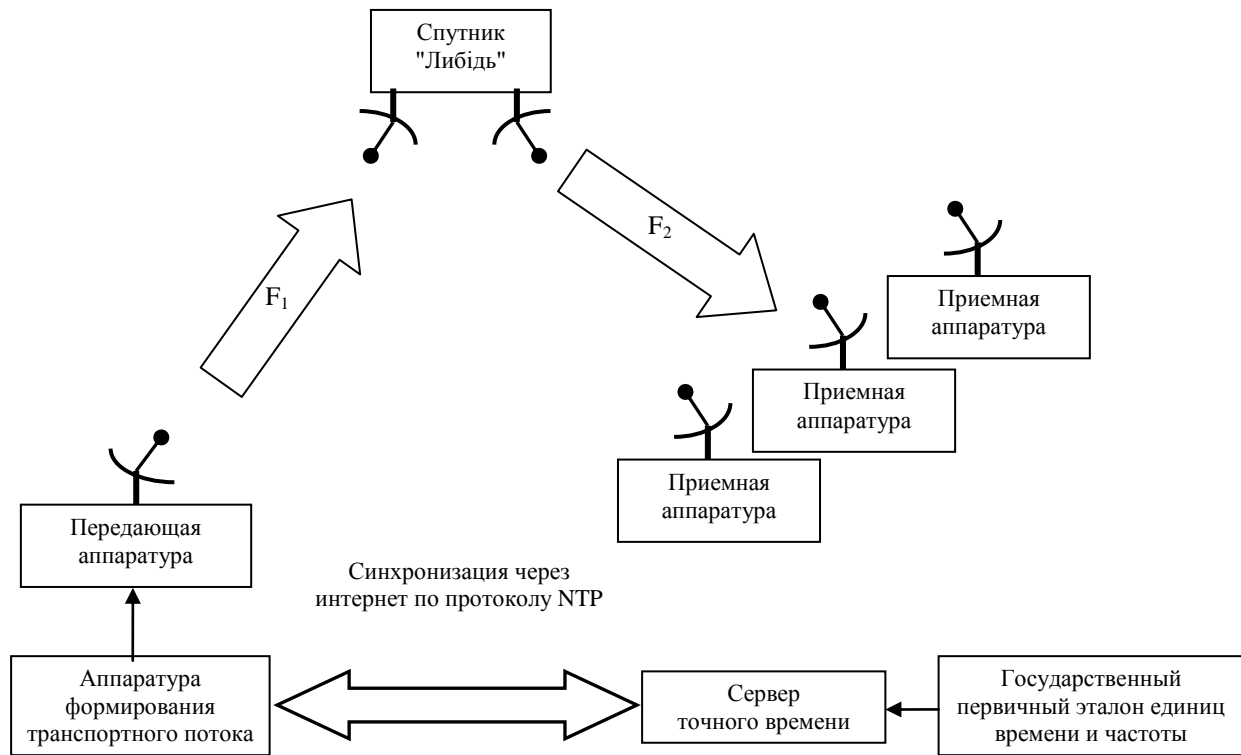


Рис. 3. Вариант построения системы передачи точного времени по территории Украины

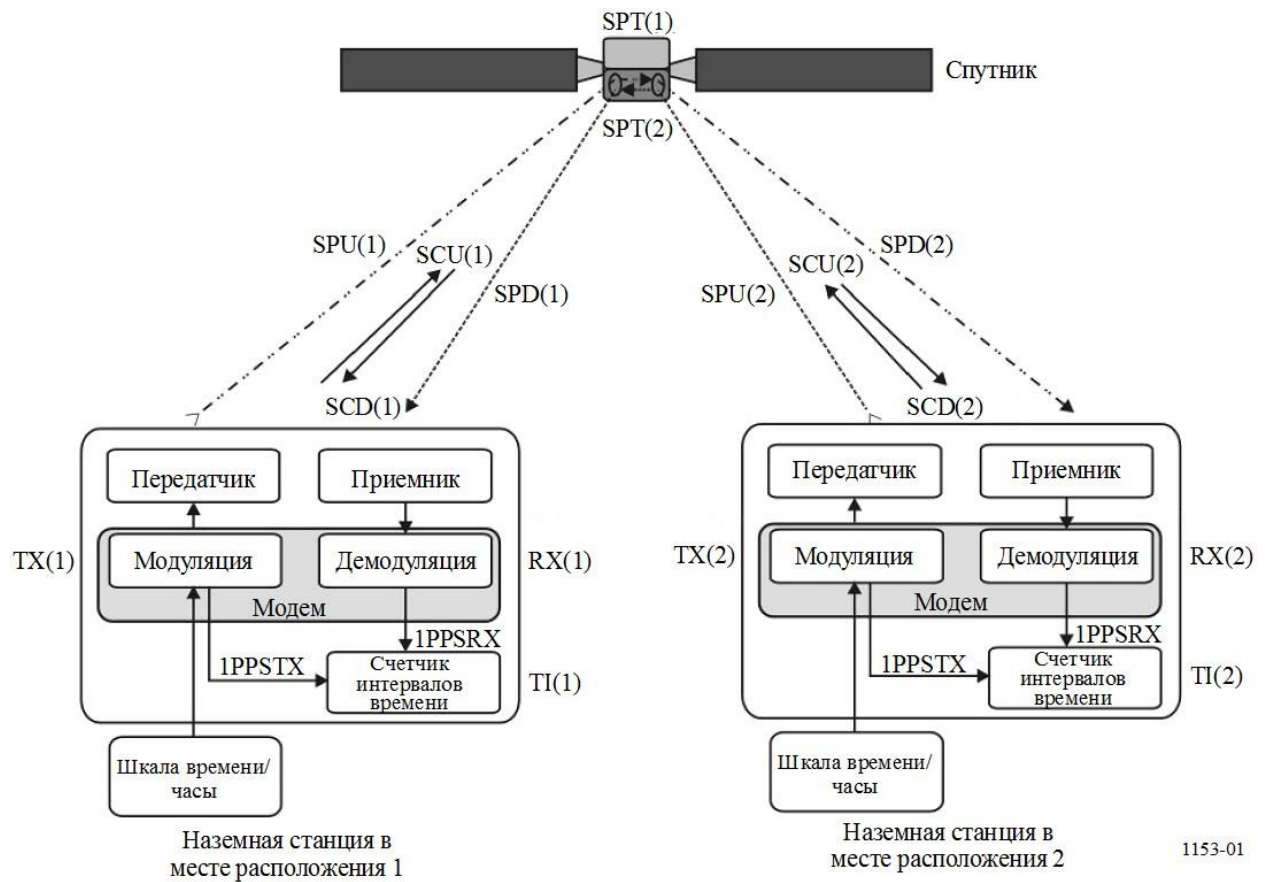


Рис. 4. Реализация сличений эталонов времени методом двухсторонней передачи сигналов времени и частоты через спутник с применением псевдослучайных шумовых кодов TWSTFT

Метод TWSTFT, в котором используются геостационарные спутники связи, оказался наиболее целесообразным способом сравнения шкал времени атомных стандартов частоты, имеющих погрешность по шкале времени менее 1 нс и относительную погрешность по частоте, составляющую примерно  $1 \times 10^{-15}$  за сутки. Поэтому данный метод широко используется в международной сети институтов хранения времени, обеспечивающих реализацию TAI и UTC Международным бюро мер и весов. Данный метод был выбран в качестве главного способа синхронизации элементов наземного сегмента глобальных спутниковых навигационных систем.

В течение долгого времени радиоприемники использовались для передачи сигналов времени от одних часов на другие. Однако в радиоприемах задержки сигнала изменяются в зависимости от расстояния, ионосферы, тропосферы, температуры, проводимости почвы и т.д.

Двухсторонняя схема была введена прежде всего для исключения этих влияний: с пунктов расположения обоих часов сигналы времени передаются одновременно. В каждом из этих пунктов принимается сигнал от других часов и фиксируется время его прихода. После обмена данными измерений вычисляется разница между показаниями двух часов. Задержки исключаются ввиду идентичности трасс распространения сигналов. Поэтому точность результата сличений зависит от остаточных эффектов, обусловленных неполной идентичностью.

Реализация метода TWSTFT на базе спутника "Либідь" позволит проводить высокоточные сличения Государственного первичного эталона единиц времени и частоты с национальными эталонами некоторых стран Европы, Африки и Юго-Восточной Азии. Кроме того, возможно проведение высокоточных сличений Государственного первичного эталона единиц времени и частоты со вторичным эталоном, размещенным в Киеве.

Основным достоинством метода TWSTFT является его максимально высо-

кая точность, недостатками – необходимость закупки дополнительной аппаратуры и аренды каналов на время проведения сличений.

**По результатам анализа можно сформулировать следующие выводы.**

1. Обеспечение потребителей Украины частотной информацией через телекоммуникационный спутник "Либідь" неперспективно.

2. Для максимального использования возможностей по передаче сигналов точного времени потребителям Украины через телекоммуникационный спутник "Либідь" необходимо:

- предусмотреть синхронизацию системного времени аппаратуры передающих телевизионных станций по серверу времени Государственного первичного эталона единиц времени и частоты (с использованием интернета);

- обеспечить на передающих телевизионных станциях настройку передачи таблиц TDT и TOT с темпом обновления информации 10 Гц;

- провести исследования в области оценки погрешности передачи сигналов точного времени через телекоммуникационный спутник "Либідь" и разработать технические решения по повышению точности передачи сигналов времени на территории Украины;

- инициировать проведение работ по реализации в Украине системы высокоточной синхронизации эталонов времени методом двухсторонней передачи сигналов времени и частоты через спутники с применением псевдослучайных шумовых кодов (TWSTFT).

#### **Список использованной литературы**

1. База данных ключевых сличений. – <http://kcdb.bipm.org>
2. <http://www.bipm.org>
3. Серов А.В. Эфирное цифровое телевидение DVB-T/H. – СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 464 с.
4. <http://www.itu.int/rec/R-REC-TF.1153-3-201004-I>

Статья поступила 25.06.2013