УДК 529.781:621.396.96

И. Е. АНТИПОВ, канд. техн. наук, В. В. БАВЫКИНА, канд. техн. наук,
Ю. А. КОВАЛЬ, д-р. техн. наук

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО СПУТНИКОВОГО ТЕЛЕВИЗИОННОГО ВЕЩАНИЯ ДЛЯ СЛИЧЕНИЯ ШКАЛ ВРЕМЕНИ

Высокоточная частотно-временная синхронизация территориально разнесенных хранителей времени и частоты необходима для работы современных систем координатно-временного обеспечения. В ряде случаев частотно-временная синхронизация имеет и самостоятельное значение. Так, для Украины актуальна задача синхронизации опорных генераторов в национальной цифровой сети связи; создана и развивается Государственная служба единого времени и эталонных частот [1 – 4]. Как для функционирования этой службы, так и для реализации частотно-временных методов, необходимы средства высокоточного сравнения территориально разнесенных эталонов и хранителей времени.

В последнее время широкое распространение получил метод сравнения шкал времени территориально разнесённых объектов с помощью искусственных спутников Земли. Для этой цели успешно используются навигационные спутники навигационных систем GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия). Достоинством спутниковых систем является их наибольшая среди других систем сличения зона действия и высокая точность, а основными недостатками – техническая сложность и высокая стоимость как приёмного оборудования, так и поддержания работоспособности всей системы.

Существует несколько различных алгоритмов решения задач сличения с использованием спутников: непосредственной синхронизации, взаимной синхронизации (общего охвата), пролётных часов и радиоинтерферометрии на короткой базе [5].

Алгоритм непосредственной синхронизации часов, схематически представленный на рис. 1, является наиболее простым. Для его реализации достаточно иметь один навигационный спутник, находящийся в зоне видимости из точки приёма (часы **A**) и один приёмник в пункте с часами **B**. Сдвиг шкал времени пунктов $\Delta T^{AB} = -\Delta T^{BA}$ можно определить, если известно время задержки сигналов между пунктами τ_p^{AB}. Этот алгоритм обеспечивает глобальную зону охвата и не требует привлечения дополнительной информации, кроме передаваемой в составе навигационного сигнала, а именно: шкала $H_A(t)$ и координаты спутника ($X_A(t)$, $Y_A(t)$, $Z_A(t)$). Поправки, учитывающие задержки в ионосфере и тропосфере, вычисляются на основе координат спутника и параметров, хранимых в приёмнике.

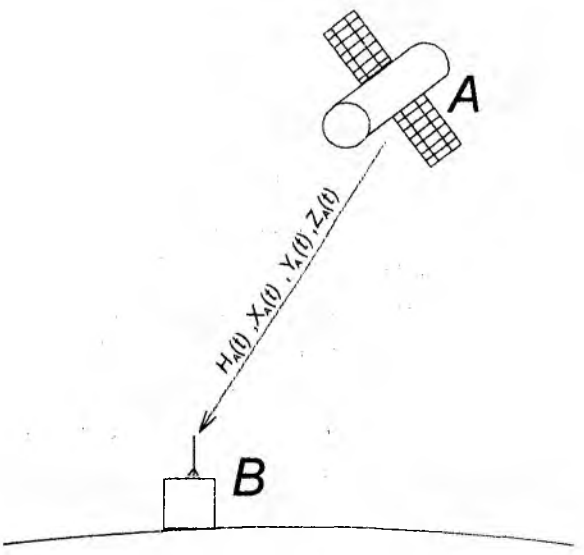


Рис. 1

Погрешность синхронизации часов, использующих этот алгоритм, определяется следующими составляющими: погрешность определения дальности до спутника; нестабильность задержек сигнала в приёмнике; погрешность учёта тропосферной и ионосферной поправок; погрешность знания координат антенны приёмника.

Алгоритм общего охвата (АОО) состоит в том, что в сверяемых пунктах A и B выполняются измерения временных положений (t_i^A и t_i^B) сигналов шкалы спутника $H_C(t)$ в шкалах пунктов A и B (рис. 2). После исключения прогнозируемых задержек в канале распространения радиоволн ($\hat{\tau}_p^{CA}, \hat{\tau}_p^{CB}$) оцениваются сдвиги шкал пунктов со шкалой ИСЗ ($\Delta\hat{T}^{AC}, \Delta\hat{T}^{BC}$),

а после обмена информацией между пунктами определяется сдвиг шкал последних $\Delta\hat{T}^{AB}, \Delta\hat{T}^{BA}$:

$$\Delta\hat{T}^{AC} = t_l^A - \hat{\tau}_p^{CA};\ \Delta\hat{T}^{BC} = t_l^B - \hat{\tau}_p^{CB}; \tag{1}$$

$$\Delta\hat{T}^{AB} = \Delta\hat{T}^{AC} - \Delta\hat{T}^{BC} = (t_l^A - t_l^B) - (\hat{\tau}_p^{CA} - \hat{\tau}_p^{CB}); \tag{2}$$

$$\Delta\hat{T}^{BA} = \Delta\hat{T}^{BC} - \Delta\hat{T}^{AC} = (t_l^B - t_l^A) - (\hat{\tau}_p^{CB} - \hat{\tau}_p^{CA}). \tag{3}$$

Оценки задержек сигналов в канале распространения производятся по известным координатам пунктов и ИСЗ. Для повышения точности учитываются параметры тропосферы и ионосферы. Анализ показывает, что абсолютные погрешности измерения сдвига шкал в пунктах составляют:

$$\delta_\Sigma^A = \Delta\hat{T}^{AB} - \Delta T^{AB} = \delta_{c/n}^A + \delta_p^A + \delta_{AП}^A;\ \delta_\Sigma^B = \Delta\hat{T}^{BA} - \Delta T^{BA} = \delta_{c/n}^B + \delta_p^B + \delta_{AП}^B, \tag{4}$$

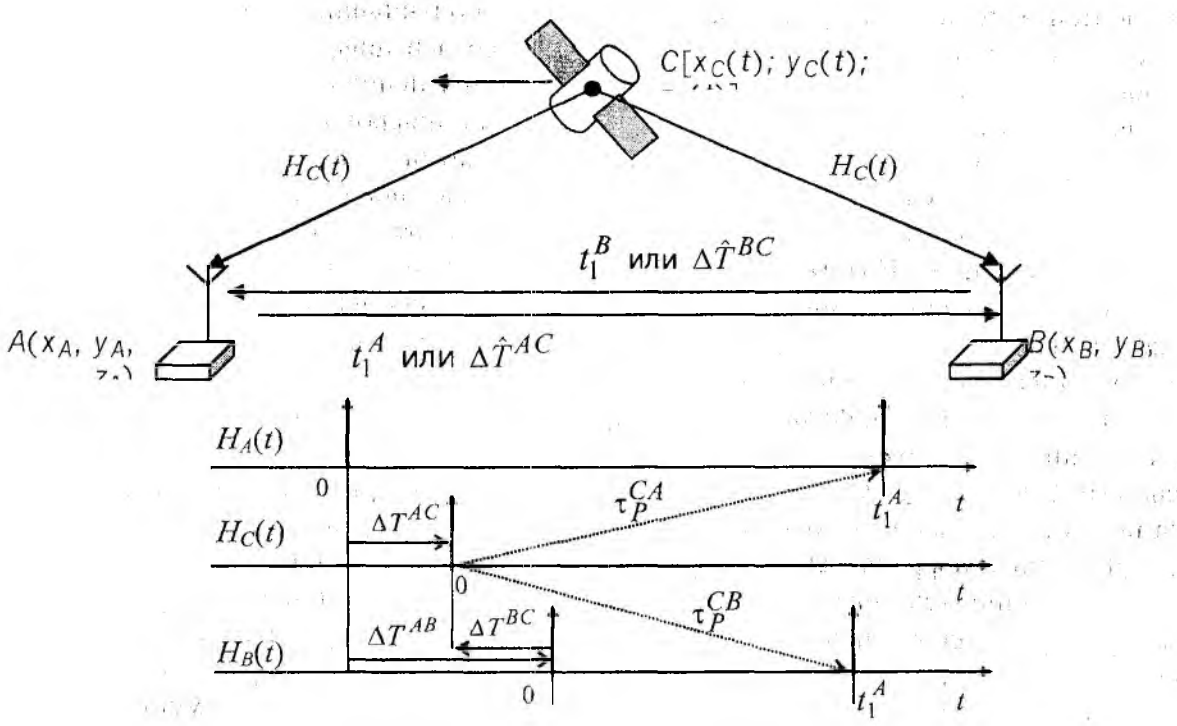
где ΔT^{AB}, ΔT^{BA} – истинные сдвиги шкал ($\Delta T^{AB} = -\Delta T^{BA}$); $\delta_{c/п}^A = \delta_{t1}^A - \delta_{t1}^B$; $\delta_{c/п}^B = \delta_{t1}^B - \delta_{t1}^A$ – погрешности, вызванные конечным отношением сигнал/помеха; $\delta_{t1}^A, \delta_{t1}^B$) – погрешности оценки временного положения сигналов в пунктах; $\delta_p^A = (\tau_p^{CA} - \tau_p^{CB}) - (\hat{\tau}_p^{CA} - \hat{\tau}_p^{CB})$, $\delta_p^B = (\tau_p^{CB} - \tau_p^{CA}) - (\hat{\tau}_p^{CB} - \hat{\tau}_p^{CA})$ – канальные погрешности; τ_p^{CA}, τ_p^{CB} – истинные значения задержек в канале; $\delta_{ап}^A = \tau_{прм}^A - \tau_{прм}^B$, $\delta_{ап}^B = \tau_{прм}^B - \tau_{прм}^A$ – аппаратурные погрешности; $\tau_{прм}^A, \tau_{прм}^B$ – задержки сигналов в приемных трактах пунктов A и B соответственно.

Следует заметить, что однотипные погрешности отличаются только знаками. Поэтому погрешности единичных измерений $\delta_\Sigma^A = -\delta_\Sigma^B$, т. е. имеют коэффициент корреляции $R = -1$. За счёт исключения ряда общих источников погрешностей (нестабильности задержек в передающих трактах и шкалы ИСЗ, аномалии в канальных задержках при коротких трассах и др.), точность данного алгоритма выше, чем у других. Достоинством является также отсутствие излучения в пунктах, т. е. АОО относится к группе пассивных алгоритмов.

Указанные выше методы относятся к группе пассивных и позволяют осуществлять синхронизацию с использованием специализированных навигационных спутников. Помимо них, на орбите существует большое количество спутников, с помощью которых организовано телевизионное вещание.

Наибольшее распространение в настоящее время получила Радиовещательная спутниковая служба (РВСС). Ретранслируемые бортовым передатчиком телевизионные сигналы предназначены для непосредственного приёма населением (непосредственным считается как индивидуальный, так и коллективный приём, при котором телезрители принимают программу по кабельной сети). Большое распространение получили относительно простые и недорогие установки с антеннами небольших размеров для непосредственного приёма телевизионных сигналов со спутников.

Современные технические средства позволяют сформировать достаточно узкий пучок волн, чтобы при необходимости сконцентрировать практически всю энергию передатчика на ограниченной территории, например одного государства.



$H_A(t)$, $H_B(t)$ – шкалы времени пунктов A и B; $H_C(t)$ – шкала времени ИСЗ СРНС

Рис. 2

В таблице представлены диапазоны частот, отведённые МККР для спутникового ТВ вещания в Районе 1, в который входят все страны СНГ, а также Европа и ряд других стран.

Диапазон	Полоса частот, *ГГц*
1	1.452-1,550 и 1,61-1,71
3	1,93-2,70
C	3,40-5,25 и 5,725-7,075
X	7,25-8,40
Ku	10,70-12,75 и 12,75-14,80
Ka	15,4-26,5 и 27.0-50,2
K	84-86

Два последних диапазона, *Ka* и *K*, почти не используются и пока считаются экспериментальными.

Сформулированные в Регламенте радиосвязи основные положения, касающиеся систем непосредственного спутникового телевизионного вещания (СНТВ), содержат, в частности, указание о том, что отношение сигнал/шум в зоне обслуживания не должна быть меньше 14 *дБ*. Плотность потока мощности в ней должна быть не менее 103 *дБВт/м*^{2} для индивидуального приема и 111 *дБВт/м*^{2} для коллективного.

Коротко рассмотрим существующие системы СНТВ [6].

В середине 70-х годов, когда спутниковые системы только создавались, использовался аналоговый телевизионный сигнал, как и в наземном вещании. Однако такой тип сигналов не слишком хорош для спутниковых каналов. Из-за технических сложностей использование цифровых методов тогда не представлялось возможным. В связи с этим в начале 80-х годов

был разработан и принят цифро-аналоговый стандарт, получивший название MAC. Активные поиски продолжились, и в конце 80-х годов был создан цифровой стандарт обработки телевизионного сигнала MPEG-2. Таким образом, сегодня используется три вида передачи телевизионного сигнала; аналоговый, цифро-аналоговый и цифровой.

При использовании АМ мощность бортового передатчика должна быть недостижимо большой: единицы – десятки киловатт. Кроме того, создавались бы большие помехи наземным службам радиосвязи. Поэтому в системах СНТВ для передачи изображения используется частотная модуляция (ЧМ). Во всём остальном отличия аналоговых систем СНТВ от систем наземного телевидения незначительны. Они касаются в основном цепей предыскажений, особенностей передачи сигналов цветности и звукового сопровождения.

Системы цифро-аналогового СНТВ также в целом сохраняют привычную структуру ТВ сигнала: в них чётко определена длительность строки, иногда присутствуют кадровые и строчные синхронизирующие импульсы.

В системе B-MAC осуществляется временное разделение сигналов яркости и цветности сигналами звука/данных в основной полосе частот на интервалах строчного и кадрового гашения. Для этого цифровые сигналы звукового сопровождения, синхронизации, дополнительной информации, телетекста и др., объединяются в пакеты и с очень высокой скоростью передаются в интервалах гашения. Активная часть строки отводится для передачи видеоинформации, а пассивная – для цифровых сигналов звука/данных. Формат используемого в этих системах сигнала цветного изображения предполагает сжатие во времени аналоговых сигналов яркости и цветности в соотношении 3/2 и 3/1 соответственно, и последовательную по строкам передачу этих сигналов.

В системе C-MAC цифровые сигналы звука/данных вводят в интервалы строчного и кадрового гашения в виде модулированной цифровым методом несущей радиосигнала. Для передачи видеосигнала в течение активной части строки используют аналоговую частотную модуляцию второй несущей из радиочастотного диапазона. После накопления в буфере отсчёты ТВ сигнала считываются с тактовой частотой, превышающей в 1,5 и 3 раза, соответственно, частоты дискретизации сигналов яркости и цветности, а посредством цифро-аналогового преобразования трансформируются в аналоговый сигнал. Аналоговые сигналы яркости и цветности передаются ЧМ-несущей через спутник-ретранслятор последовательно во времени на активной части строки. В интервале длительности строки, соответствующей длительности гасящих импульсов, посредством фазовой манипуляции (ФМ), при которой фаза изменяется мгновенно на 90° для каждого бита, передаются цифровые сигналы звукового сопровождения.

В системе D2-MAC аналоговые сигналы яркости и цветности передаются в течение активной части строки в сжатом во времени виде. Цифровая часть сигнала, соответствующая звуку, синхронизации, телетексту и другим данным, объединена в пакеты, передаваемые в течение обратного хода по строке и по кадру. Строчная синхронизация сигнала D2-MAC осуществляется с помощью 6 бит цифровой информации, передаваемой в начале каждой строки в виде определенного кодового слова или его инверсии (в зависимости от номера строки), а кадровая – с помощью слова в 64 бита кадровой синхронизации, размещенного в 625-й строке.

Сигналы цифрового телевидения представляют собой цифровой поток, несущий в себе информацию о цветности и яркости различных элементов изображения в соответствии с принятой системой кодирования без привычного разделения на кадры и строки. Скорость потока может составлять от 15 до 50 *Мбит/с*. Сигналы синхронизации, присутствующие в нём, предназначены для правильной работы декодеров, а не телевизионных развёрток непосредственно.

Таким образом, на основе обзора [6] можно заключить, что сигналы любой из систем спутникового телевидения содержат в себе элементы, к которым можно осуществить привязку шкалы времени. Наиболее удобными для этой цели являются строчные синхроимпульсы. Исходя из изложенного предлагается следующий метод синхронизации, использующий СНТВ.

В пунктах размещения часов А и В устанавливаются комплекты одинакового приёмного оборудования спутникового телевидения (антенны и приёмники), которые настраиваются на приём одного и того же спутникового ТВ канала (рис. 3). В обоих пунктах принимаются и измеряются временные положения определённых синхросигналов относительно шкал времени этих пунктов. Чтобы исключить неоднозначность, грубую привязку можно осуществлять по кадровым импульсам, а точную – по строчным.

Информация о времени задержки определённого синхроимпульса относительно шкалы пункта А ΔT^{AC} по отдельному каналу передаётся в пункт В. На основании информации о положении спутника на геостационарной орбите и координатах пунктов вычисляется разность задержек $\tau_p^{CA} - \tau_p^{CB}$. С учётом информации о времени задержки ΔT^{AC} осуществляется синхронизация часов пункта В.

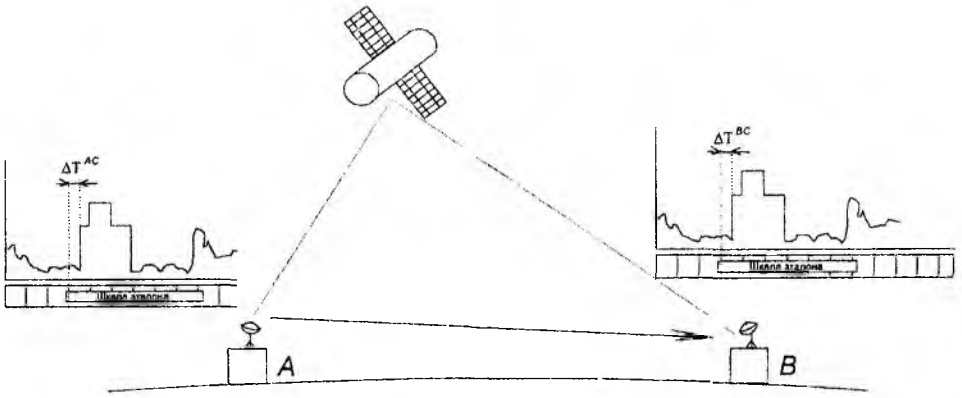


Рис. 3

Видимое преимущество метода синхронизации с использованием СНТВ состоит в том, что ТВ спутники расположены на геостационарных орбитах и оснащены достаточно мощными передатчиками. Первое обстоятельство позволяет считать, что местоположение спутника в пространстве известно достаточно точно, спутник неподвижен. Это избавляет от необходимости следить за ним или работать, переключаясь с одного спутника на другой. Достаточно большая мощность бортового передатчика позволяет принимать сигнал на небольшую антенну (если не ставится задача получения высококачественного ТВ изображения). Таким образом, система оказывается независимой от GPS или ГЛОНАС. Существует также возможность принимать сигналы нескольких спутников одновременно, что увеличивает количество измерений и позволяет уменьшить их погрешность. Измерения можно производить оперативно, не ожидая появления необходимого количества спутников в зоне видимости и не производя длительного накопления.

Безусловно, использование спутникового вещательного телевидения для высокоточной синхронизации эталонов имеет и свои недостатки. К ним относятся:

– неоднозначность измерений, связанная с периодичностью используемого сигнала;

– невозможность использования сигналов в тех случаях, когда пункты пространственно разнесённых эталонов А и В принимают сигналы одной и той же ТВ программы, но сформированные разными спутниками, или же разными антеннами, установленными на одном и том же спутнике;

Спутники, расположенные на геостационарной орбите видны под небольшим углом места, если приём осуществляется на большом широтном удалении от экватора. Их сигналы проходят большой путь через атмосферу и могут быть в значительной степени подвержены рефракции.

Решение этих задач может стать предметом дальнейших исследований.

Список литературы: 1. *Величко О. М., Макаренко Б. І., Камінський В. Ю.* та ін. Державна служба єдиного часу і еталонних частот – необхідний елемент розвитку наземної космічної інфраструктури України // Космічна наука і технологія. 1997. Т. 3. № 1/2. С. 7–15. 2. *Клейман А. С., Соловьёв В. С., Ткачук А. А.* Эталонная база Украины в области измерений времени и частоты // Український метрологічний журнал. 1996. Вип. 4. С. 17–18. 3. *Величко О. М., Миронов М. Т., Сидоренко Г. С.* та ін. Державна програма створення та розвитку Державної служби єдиного часу і еталонних частот // Український метрологічний журнал. 1996. Вип. 4. С. 13–16. 4 . *Клейман О. С., Оголюк В. П., Сидоренко Г. С.* та ін. Державний первинний еталон одиниць часу і частоти / /Український метрологічний журнал. 1997. Вип. 3. С. 18–23. 5. *Гужва Ю. Г., Геворкян А. Г., Богданов П. П., Овчинников В. В.* Синхронизация часов по сигналам "ГЛОНАСС" // Радионавигация и время. 1994. N1. С.11-14. 6. *Левченко В. Н.* Спутниковое телевидение. СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 1999. 288 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 02.07.2004