

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ СИНХРОНИЗАЦИИ ЭТАЛОНОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

Высокоточная частотно-временная синхронизация территориально разнесенных эталонов и хранителей времени и частоты необходима для реализации современных систем координатно-временного обеспечения. В ряде случаев частотно-временная синхронизация имеет и самостоятельное значение. Так, в настоящее время для Украины актуальна задача синхронизации опорных генераторов в национальной цифровой системе связи [1, 2].

Для реализации частотно-временных методов необходимы, помимо высокостабильных эталонов и хранителей времени, средства для их взаимной привязки (синхронизации).

Высокие темпы совершенствования эталонов времени и частоты (повышение стабильности на порядок в течение 5...7 лет) требуют повышения точности их синхронизации.

Основные методы синхронизации, за исключением прямого метода с использованием перевозимых квантовых часов (ПКЧ), реализуются в виде многопозиционных радиотехнических систем. По функциональному назначению, составу и принципам работы системам синхронизации присущи черты информационных, локационных и измерительных систем.

Системы синхронизации принципиально отличаются от других систем алгоритмами измерений, основанными на учете либо исключении времени задержки сигналов синхронизации в среде распространения. Алгоритмы синхронизации можно разделить на три группы [3, 4].

К первой группе относятся алгоритмы односторонней передачи информации из одного пункта (А) в другой (В). Структурная схема и временная-диаграмма одностороннего алгоритма измерения сдвига шкал времени приведены на рис. 1. Сдвиг шкал времени пунктов $\Delta T^{AB} = -\Delta T^{BA}$ при односторонней передаче можно определить, если известно время задержки сигналов между пунктами τ_p^{BA} .

Примеры реализации алгоритмов первой группы – СДВ, ДВ и спутниковые радионавигационные системы (СРНС); система, использующая отражение сигналов от Луны; телевизионные каналы; односторонний радиометеорный канал; кабельные, лазерные и волоконно-оптические линии.

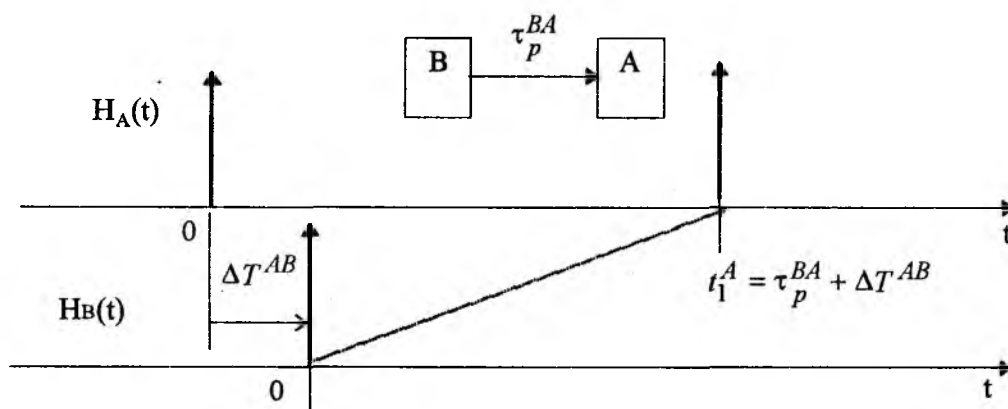


Рис. 1

Во второй группе используется дополнительный высокостабильный общий источник (О), сигналы которого принимаются в сличаемых пунктах. Сдвиг шкал времени пунктов А и В ($\Delta T^{AB} = -\Delta T^{BA}$) при этом определяется с учетом известной разности задержек сигналов между общим пунктом и сличаемыми пунктами ($\tau_p^{OA} - \tau_p^{OB}$).

Структурная схема и временная диаграмма второй группы алгоритмов, получивших название метода общего охвата или метода третьего генератора, приведены на рис. 2.

Алгоритмы второй группы реализуются в СРНС Глонасс и GPS в дифференциальном режиме, а также в радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами (РСДБ). В системах Глонасс и GPS дополнительным источником является стандарт времени на борту спутника. В РСДБ роль дополнительных источников играют высокостабильные сигналы космического прохождения (пульсары, квазары).

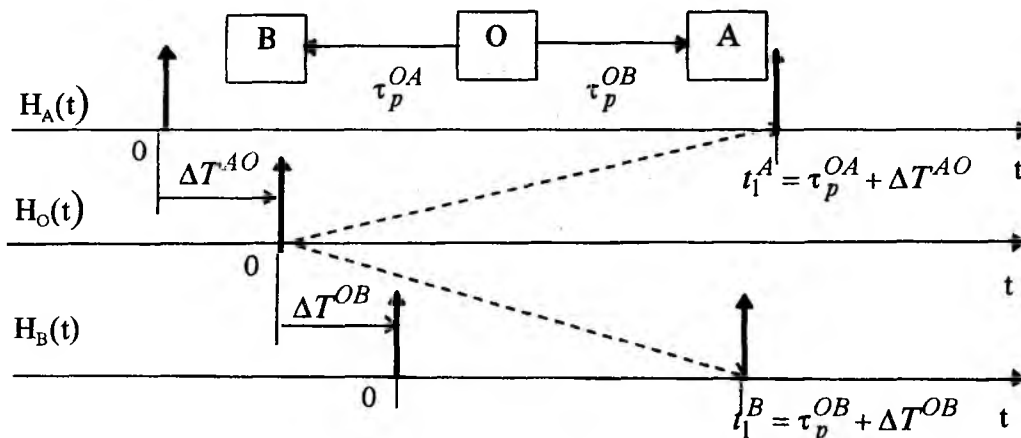


Рис. 2

Поскольку в первой и второй группах излучаются сигналы только из одного пункта, алгоритмы этих групп относятся к категории пассивных.

Третья группа алгоритмов основана на двусторонней передаче информации. При этом время задержки сигналов между пунктами может быть неизвестным, требуется только его высокая стабильность и обратимость (в идеальном случае $\tau_p^{AB} = \tau_p^{BA}$).

Структурная схема и временная диаграмма одного из возможных алгоритмов двусторонней передачи информации, принятого называть встречным алгоритмом (ВА), приведены на рис. 3. Существуют и другие алгоритмы этой группы, позволяющие исключить обмен информацией о результатах измерений между пунктами за счет ретрансляции принятых сигналов. Это ретрансляционный и опорно-ретрансляционный алгоритмы (РА и ОРА). Наибольшее распространение из этих алгоритмов получил ОРА [5], временная диаграмма которого показана на рис. 4.

Алгоритмы третьей группы относятся к активным (сигналы излучаются каждым пунктом) и реализуются в радиометеорном, спутниковых, оптических и телефонных каналах связи.

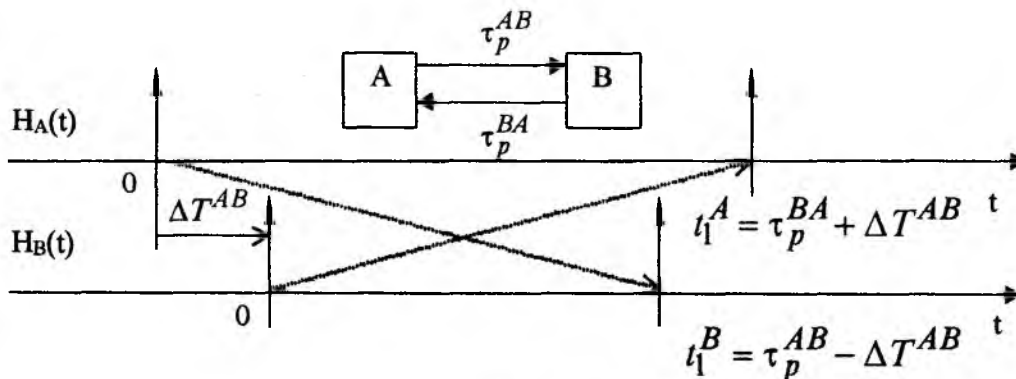


Рис. 3

Сопоставление систем синхронизации по основным показателям (точность и оперативность) в настоящее время затруднен из-за отсутствия единого подхода к математическому описанию алгоритмов синхронизации.

Принимая во внимание общие для всех систем синхронизации, за исключением ПКЧ, источники погрешностей (нестабильность и невзаимность задержки сигналов в канале; нестабильности аппаратурных задержек; внутренние шумы аппаратуры и помехи канала связи; динамика измеряемой величины), можно предложить общую для систем синхронизации модель, структура которой приведена на рис. 5.

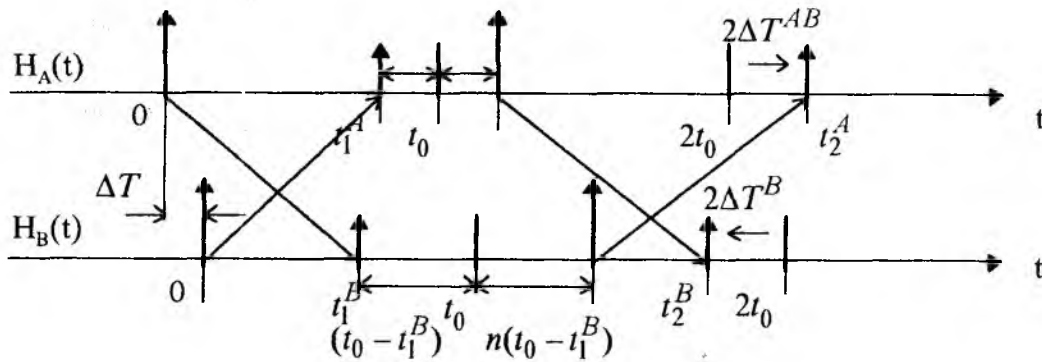


Рис. 4

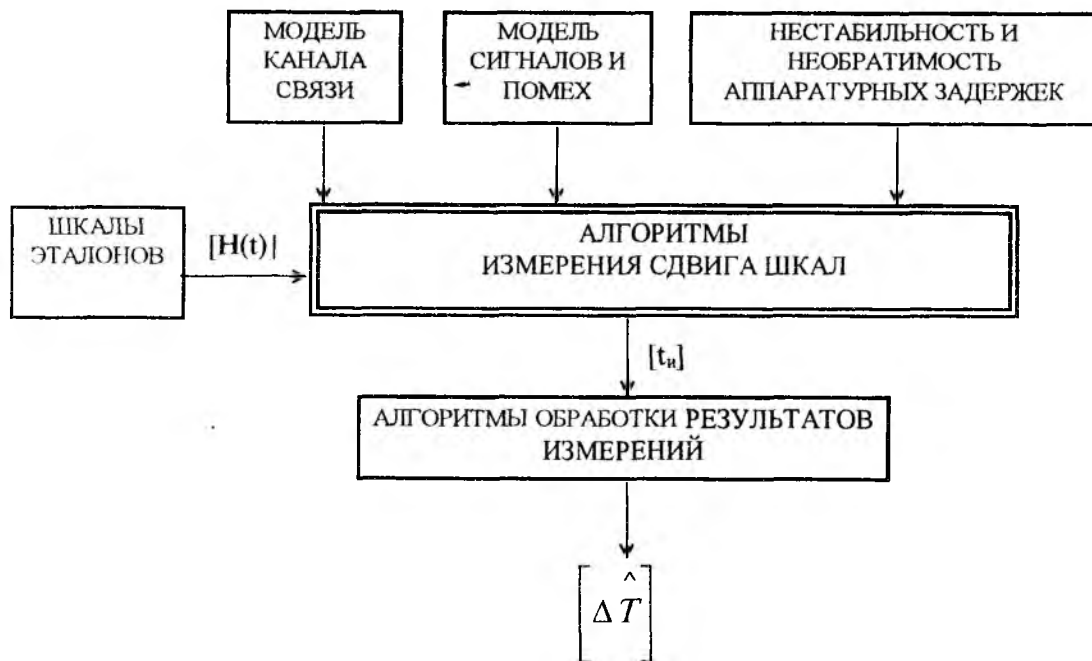


Рис. 5

Значения единичных измерений (наблюдений) сдвига шкал $\hat{\Delta T}$ в одном из пунктов могут быть получены в результате решения матричного уравнения

$$\begin{bmatrix} \hat{\Delta T} \end{bmatrix} = [F_m][t_u], \tag{1}$$

где $[F_m]$ – функциональная матрица-строка коэффициентов и параметров соответствующего алгоритма синхронизации; $[t_u] = [\Delta T] + [\tau_p] + [\Delta C/\Pi] + [\tau_{an}]$ – матрица измеряемых интервалов времени, равная сумме матриц истинного сдвига шкал (ΔT), задержек сигналов в канале связи (τ_p), помеховых погрешностей оценок временного положения сигнала ($\Delta C/\Pi$), аппаратурных задержек (τ_{an}).

Состав матриц уравнения (1) для основных групп алгоритмов синхронизации приведен в таблице 1.

Таблица 1

Матрицы	Алгоритмы			
	Односторонний	Общий охват	ВМ	PM ($n \leq -1; t_0 = 0$); OPM ($n > -1; t_0 \neq 0$)
$[F_m]$	$\begin{bmatrix} \hat{1} \\ \tau_P^{BA} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \hat{1}; -1; \tau_P^{OA} - \tau_P^{OB} \end{bmatrix}$	$[0,5; -0,5]$	$\left[\frac{n-1}{2n}, \frac{1}{2n}, \frac{(n+1)t_0}{2n} \right]$
$[t_u]$	$\begin{bmatrix} t_1^A \\ -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} t_1^A \\ t_1^B \\ -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} t_1^A \\ t_1^B \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} t_1^A \\ t_2^A \\ -1 \end{bmatrix}$
$[\Delta T]$	$[\Delta T^{AB}]$	$\begin{bmatrix} \Delta T^{AO} \\ -\Delta T^{OB} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta T^{AB} \\ -\Delta T^{AB} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta T^{AB} \\ (n+1)(t_0 + \Delta T^{AB}) \end{bmatrix}$
$[\tau_P]$	$\begin{bmatrix} \tau_P^{BA} \\ -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \tau_P^{OA} \\ \tau_P^{OB} \\ -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \tau_P + \Delta B_3 \\ \tau_P \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \tau_P + 0.5\Delta B_3 \\ (1-n)(\tau_P + 0.5\Delta B_3) + V_\tau \tau_{12} \\ -1 \end{bmatrix}$
$[\tau_{an}]$	$\begin{bmatrix} \tau_{прд}^B + \tau_{прм}^A \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \tau_{прд}^O + \tau_{прм}^A \\ \tau_{прд}^O + \tau_{прм}^B \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \tau_{прд}^B + \tau_{прм}^A \\ \tau_{прд}^A + \tau_{прм}^B \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \tau_{прд}^B + \tau_{прм}^A \\ \tau_{прд}^B + \tau_{прм}^A - n(\tau_{прд}^A + \tau_{прм}^B) \end{bmatrix}$
$[\Delta_{c/n}]$	$\begin{bmatrix} \Delta_1^A \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta_1^A \\ \Delta_1^B \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta_1^A \\ \Delta_1^B \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta_1^A \\ (\Delta_2^A - n \cdot \Delta_1^B) \end{bmatrix}$

Решение уравнения (1) позволяет определить абсолютную суммарную погрешность единичного измерения в виде

$$\Delta_S = \Delta \hat{T} - \Delta T = \Delta_K + \Delta_{C/П} + \Delta_{an} \quad (2)$$

где $\Delta \hat{T}$ — результат измерения; ΔT — истинный сдвиг шкал; Δ_K — погрешности, вызванные нестабильностью и невзаимностью задержки сигналов в канале связи; $\Delta_{C/П}$ — помеховые погрешности; Δ_{an} — аппаратные погрешности.

Значения $\Delta \hat{T}$, а также слагаемые погрешности для основных алгоритмов синхронизации приведены в таблице 2.

В таблицах 1 и 2 приняты следующие обозначения: $t_1^A; t_1^B; t_2^A; t_2^B$ — измеренное время задержки принимаемых сигналов в пунктах А и В соответственно; ΔT^{AB} — истинный сдвиг шкал пункта А относительно пункта В; $\tau_{прд}^A, \tau_{прд}^B, \tau_{прм}^A, \tau_{прм}^B$ — величины задержек в передающих и приемных трактах пунктов А и В соответственно; $\Delta_1^A; \Delta_1^B$ — абсолютные погрешности при измерениях временных положений сигналов, вы-

званные внутренними шумами и помехами для пунктов А и В соответственно; $\tau_p^{BA}, \tau_p^{OA}, \tau_p^{OB}$ — истинные значения задержек сигналов в канале связи между соответствующими пунктами; $\hat{\tau}_p^{BA}, \hat{\tau}_p^{OA}, \hat{\tau}_p^{OB}$ — оценочные значения задержек сигналов в канале связи между соответствующими пунктами; $V_\tau = \frac{d\tau_p}{dt}$ — скорость изменения задержки сигналов в канале связи (характеризует нестабильность задержки сигналов в канале); $\Delta_{B3} = \tau_p^{BA} - \tau_p^{AB}$ — невязимость задержки сигналов в канале; n — коэффициент ретрансляции для РА и ОРА; t_0 — время задержки опорного импульса для ОРА; τ_{12} — временной интервал между циклами трансляции и ретрансляции сигналов для РА и ОРА ($\tau_{12} > \tau_p$).

Таблица 2

Результаты измерений; Абсолютные погрешности	Алгоритмы			
	Односторонний	Общий охват	ВМ	РМ ($n \leq -1; t_0 = 0$); ОРМ ($n > -1; t_0 \neq 0$)
ΔT^{AB}	$(t_1^A - \hat{\tau}_p^{BA})$	$(t_1^A - t_1^B) - (\hat{\tau}_p^{OA} - \hat{\tau}_p^{OB})$	$0,5(t_1^A - t_1^B)$	$\frac{(n-1)t_1^A + t_2^A - (n+1) \cdot t_0}{2n}$; $(0,5t_2^A - t_0) - \text{для } n=1$
Δk	$\hat{\tau}_p^{BA} - \tau_p^{BA}$	$(\tau_p^{OA} - \tau_p^{OB}) - (\hat{\tau}_p^{OA} - \hat{\tau}_p^{OB})$	$0,5(\Delta_{B3} + V_\tau \Delta T^{AB})$	$\frac{\Delta_{B3}}{2} + \frac{V_\tau \tau_{12}}{2n}$; $0,5(\Delta_{B3} + V_\tau \tau_{12}) - \text{для } n=1$
$\Delta c/n$	Δ_1^A	$(\Delta_1^A - \Delta_1^B)$	$0,5(\Delta_1^A - \Delta_1^B)$	$\frac{(\Delta_2^A - n \cdot \Delta_1^B + (n-1)\Delta_1^A)}{2n}$; $\frac{\Delta_2^A - \Delta_1^B}{2} - \text{для } n=1$
Δan	$\tau_{nрм}^A + \tau_{nрд}^B$	$\tau_{nрм}^A + \tau_{nрм}^B$	$0,5(\tau_{nрм}^A - \tau_{nрд}^A) - 0,5(\tau_{nрм}^B - \tau_{nрд}^B)$	$0,5(\tau_{nрм}^A - \tau_{nрд}^A) - 0,5(\tau_{nрм}^B - \tau_{nрд}^B)$

Соотношения для расчета случайных помеховых погрешностей измерения сдвига шкал в одном из пунктов (А) приведены в таблице 3, где приняты обозначения: σ_t^A, σ_t^B — среднеквадратические помеховые погрешности оценки временного положения сигналов в пунктах А и В соответственно; $m_A = (\sigma_t^B / \sigma_t^A)^2$ — коэффициент, учитывающий различие помеховых обстановок в пунктах; σ_T^A — случайная помеховая погрешность измерения сдвига шкал в пункте А.

Для удобства сравнения алгоритмов синхронизации в таблице 3 приведены соотношения для относительных случайных погрешностей $(\sigma_T^A)' = \sigma_T^A / \sigma_{T/ВМ}^A$ ($\sigma_{T/ВМ}^A$ — случайная погрешность ВА).

Формулы для случайных погрешностей в пункте В отличаются от приведенных в таблице 3 индексами (вместо $\sigma_T^A \rightarrow \sigma_T^B$; вместо $m_A \rightarrow m_B = (\sigma_t^A / \sigma_t^B)^2$).

Анализ случайных помеховых погрешностей измерения сдвига шкал для различных алгоритмов показывает, что этот класс погрешностей минимален (σ_T – минимум) для ОРА ($n = 2; n = 1$) и ВА.

Таблица 3

Алгоритмы	ВМ	Случайная погрешность, σ_T^A	Относительная случайная погрешность, $\left(\frac{\sigma_T^A}{\sigma_T}\right)$
		$\frac{\sigma_t^A \sqrt{1+m_a}}{2}$	1
Двусторонние	РМ ($n < -1$)	$\frac{\sigma_t^A \sqrt{n^2(1+m_a) - 2n + 2}}{2 n }$	$\left\{ \frac{n^2(1+m_a) - 2n + 2}{n^2(1+m_a)} \right\}^{1/2}$
	ОРМ ($n > -1$)	$\frac{\sigma_t^A \sqrt{1+m_a}}{2}$ для $n = 1$	1 — для $n = 1$
Общего охвата		$\sigma_t^A \sqrt{1+m_a}$	2
Односторонний		σ_t^A	$\sqrt{2}$ для $m = 1$

Приведенные расчетные соотношения не позволяют в полной мере сравнивать различные алгоритмы по основным показателям без дополнительных данных о параметрах канала связи и назначении системы синхронизации. Однако сравнение по некоторым показателям (таким, как необходимость обмена информацией о результатах измерений между пунктами и излучения сигналов всеми пунктами, необходимость оценки времени задержки сигналов в канале, помеховые погрешности) могут быть выполнены. Так, обмен информацией о результатах измерений требуется во ВА и алгоритме общего охвата, что является их недостатком. Пассивные алгоритмы (односторонний и общего охвата) имеют преимущество с точки зрения отсутствия излучения сигналов синхронизируемыми пунктами. Существенным преимуществом двустороннего алгоритма является то, что для его реализации не требуется оценка времени задержки сигналов в канале, а необходимы только высокие стабильность и обратимость этой задержки.

Все это не позволяет отдать предпочтение ни одному из алгоритмов, тем более, что недостатки некоторых из них, путем модернизации, могут быть устранены. Например, при переходе от встречного алгоритма к ретрансляционному либо опорно-ретрансляционному алгоритмам (РА и ОРА) отпадает необходимость в обмене информацией о результатах измерений между пунктами.

Выполненный анализ алгоритмов синхронизации может быть использован для сравнения и моделирования современных высокоточных систем, обеспечивающих наивысшую точность синхронизации, - радиометеорных, спутниковых связных и спутниковых навигационных.

Список литературы: 1. Система синхронизации первичной цифровой сети связи Украины. Основные положения. Министерство связи Украины. УНИИС, Киев, 1996. 2. Бирюков Н.Л., Кильчицкий Е.В., Савчук А.В. Синхронизация сети связи // Діловий кур'єр ЗВ'ЯЗОК (Всеукраїнський інформаційний тижневик), 1998. № 29. 4 с. 3. Кащеев Б.Л., Коваль Ю.О., Горбач В.Л., Бондарь Б.Г. Метеори сьогодні. Київ.: Техніка, 1996. 196 с. 4. Кащеев Б.Л., Коваль Ю.А., Кундюков С.Г. Распространение сигналов синхронизации // Діловий кур'єр ЗВ'ЯЗОК (Всеукраїнський інформаційний тижневик), 1998. № 36. 7 с; № 38. 4 с. 5. А.С. 712807 СССР, МКИ G 04 C 11/02. Способ сличения шкал времени / Б.С. Дудник, Б.Л. Кащеев, В.П. Моисеев. Опубл. 07.06.80. Бюл. № 4.

Харьковский государственный технический университет радиотехники

Поступила в редколлегию 8.06.99