

ОСНОВЫ ТЕОРИИ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМ СИНХРОНИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

2. АЛГОРИТМЫ ИЗМЕРЕНИЙ СДВИГА ШКАЛ ВРЕМЕНИ

Некоторые аспекты теории многопозиционных систем синхронизации времени и частоты изложены в первой работе этого направления [1], а также были представлены в докладе [2]. Особая роль алгоритмов измерений сдвига шкал в многопозиционных системах синхронизации времени и частоты объясняется следующими причинами: эти алгоритмы присущи только системам синхронизации; выбор алгоритма измерений существенно влияет на особенности технической реализации системы синхронизации в целом; различные алгоритмы измерений сдвига шкал времени по-разному трансформируют источники погрешностей в результирующую погрешность измерений; алгоритмы измерений сдвига шкал времени непосредственно связаны с заключительным этапом измерений – обработкой их результатов.

1 Общая характеристика

Алгоритмы синхронизации можно разделить на две группы [3, 4]: к первой группе относятся так называемые **пассивные алгоритмы**, отличительной особенностью которых является излучение сигналов только в одном из синхронизируемых пунктов; вторую группу составляют **активные алгоритмы**, основанные на двусторонней передаче информации. При этом время задержки сигналов между пунктами может быть неизвестным, требуется только его высокая стабильность и обратимость. Основные характеристики алгоритмов приведены в табл. 1.

Структурная схема и временная диаграмма пассивного алгоритма в случае двух синхронизируемых пунктов, один из которых излучает сигналы, приведены на рис. 1. Такой вариант пассивного алгоритма принято называть **непосредственным** или **односторонним алгоритмом** (ОА). Сдвиг шкал времени пунктов А и В $\Delta T^{AB} = -\Delta T^{BA}$ при одностороннем алгоритме можно определить, если известно время задержки сигналов между пунктами τ_p^{AB} .

Примеры реализации одностороннего алгоритма измерения сдвига шкал времени – СДВ, ДВ и спутниковые навигационные системы; система, использующая отражение сигналов от Луны; телевизионные каналы; односторонний радиометеорный канал; кабельные, лазерные и волоконно-оптические линии.

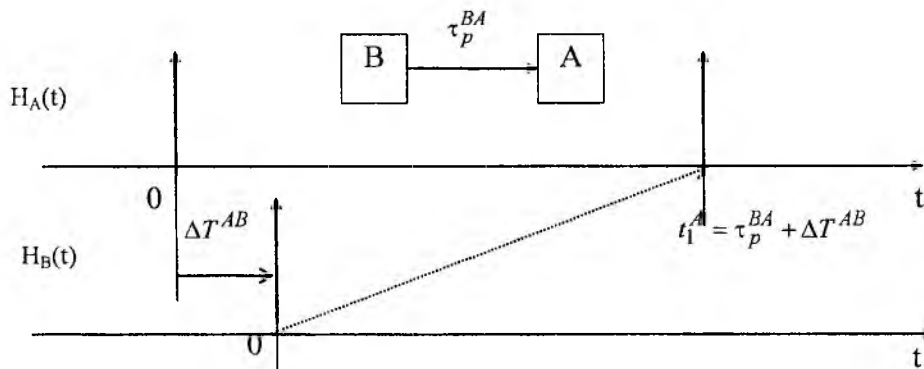


Рис. 1

Вариант пассивного алгоритма, в котором используется дополнительный высокостабильный источник (О), сигналы которого принимаются в синхронизируемых пунктах, называется **взаимным (дифференциальным) или алгоритмом общего охвата (АОО)**.

Структурная схема и временная диаграмма взаимного алгоритма приведены на рис. 2. Сдвиг шкал времени пунктов А и В ($\Delta T^{AB} = -\Delta T^{BA}$) при этом определяется с учетом известной разности задержек сигналов между общим и сличаемыми пунктами ($\tau_p^{OA} - \tau_p^{OB}$).

Таблица 1

Характеристики алгоритмов	Основные алгоритмы			
	Пассивные		Активные	
	Непосредственный	Взаимный	Встречный	Ретрансляционные
Требования к задержке сигналов в канале	Должна оцениваться задержка в канале	Должна оцениваться разность задержек в канале	Задержка в канале должна быть стабильной и обратимой	
Достоинства	Отсутствие излучения в одном из пунктов синхронизации	Отсутствие излучения в пунктах синхронизации. Исключение погрешностей, вызванных общими источниками	Задержка сигналов в канале исключается	
Недостатки	Погрешности определения задержек в канале. Необходимость обмена информацией о результатах измерений		Излучение в пунктах. Необходимость обмена информацией о результатах измерений	Излучение в пунктах.
Примеры реализации	Телевизионный метод синхронизации; системы СДВ и ДВ диапазонов; спутниковые радионавигационные системы GPS и ГЛОНАСС; отражение сигналов от Луны; кабельные, лазерные и волоконно-оптические линии.	Спутниковые радионавигационные системы GPS и ГЛОНАСС; радиоинтерферометры со сверхдлинными базами	Радиометеорный метод синхронизации; спутники связи; кабельные, лазерные и волоконно-оптические линии	

Пассивный взаимный алгоритм применяется для синхронизации путем приема сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС) Глонасс и GPS (Навстар), а также в радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами (РСДБ). Для СРНС дополнительным источником является стандарт времени на борту спутника. В РСДБ роль дополнительных источников играют высокостабильные сигналы космического происхождения (пульсары, квазары).

Структурная схема и временная диаграмма одного из возможных активных алгоритмов, принятого называть встречным алгоритмом (ВА), приведены на рис.3. Существуют и другие активные алгоритмы, 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 – 7], расширенная временная диаграмма которого показана на рис. 4. На этой диаграмме учтены погрешности синхронизации, принятые обозначения которых приведены ниже.

Активные алгоритмы реализуются в радиометеорном [5], спутниковых [8], оптических и телефонных каналах связи.

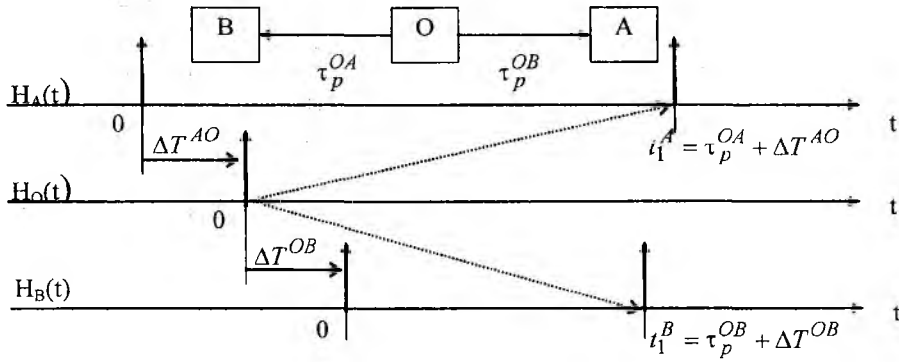


Рис. 2

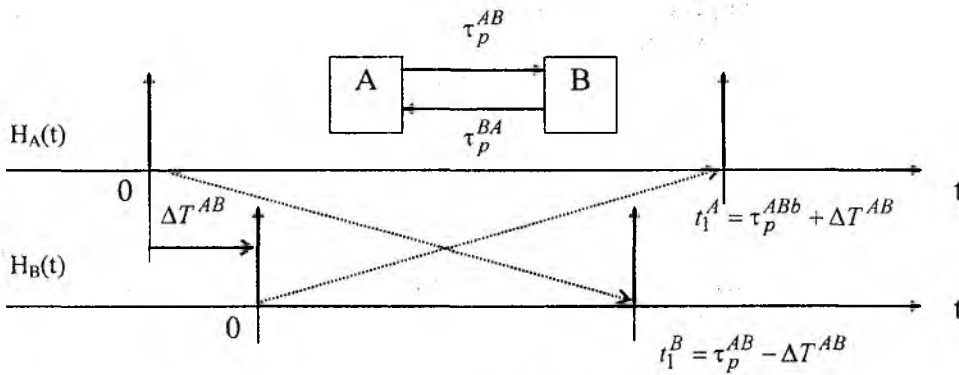


Рис. 3

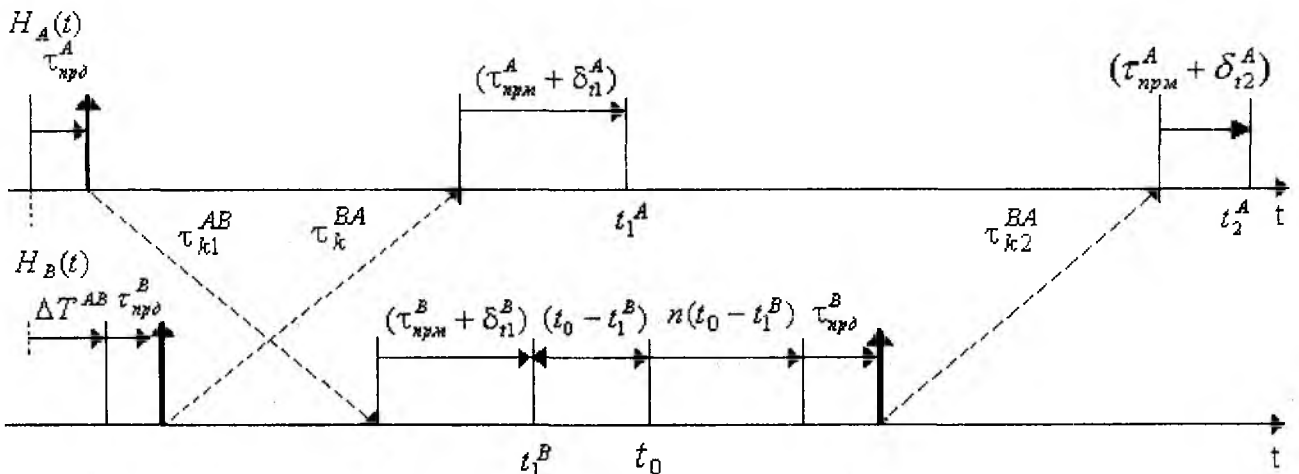


Рис. 4

2 Модели основных алгоритмов измерения сдвига шкал

Поскольку временные диаграммы алгоритмов измерения сдвига шкал, подобные приведенным на рис. 1–4, не могут быть непосредственно использованы для анализа, были рассмотрены различные способы описания алгоритмов – с помощью направленных графов (рис. 5, 6), K -сетей (рис. 7) и систем уравнений, записанных в матричной форме. Направленные графы ОА (а), ВА (б) и АОО (в) приведены на рис. 5, где: 1 – кодирование и формирование сигналов передатчиков; 2 – излучение сигналов передатчиков, передача информации в канале; 3 – суммирование сигналов и помех; первичная обработка сигналов; детектирование и последетекторная обработка; 4 – измерение временного положения сигналов; 5 – передача информации о результатах измерений; 6 – вычисление сдвига шкал; 7 – статистическая обработка результатов измерений.

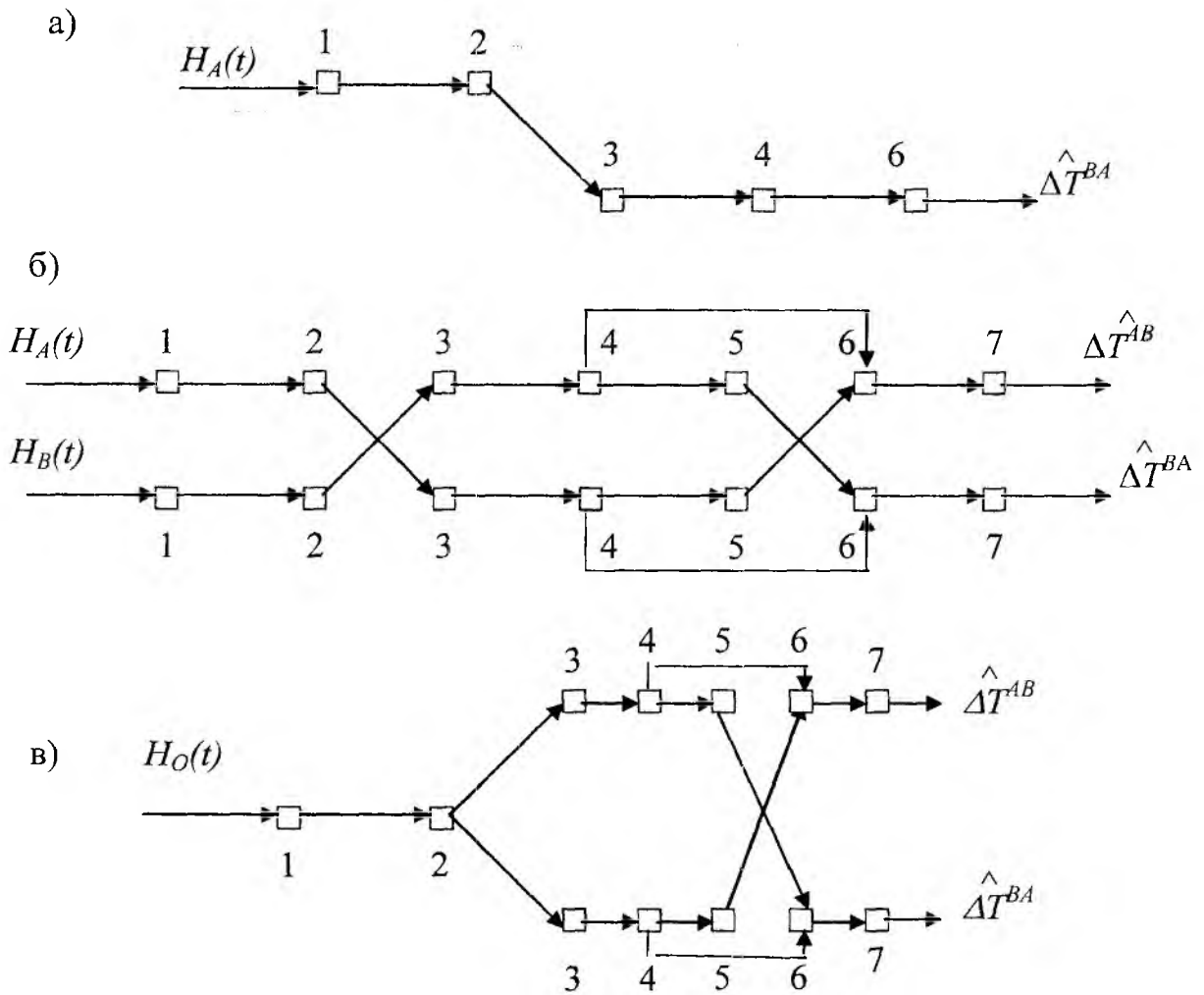


Рис. 5

На рис.6 изображен направленный граф ретрансляционного алгоритма, где: 1, 6 – кодирование и формирование сигналов передатчиков; 2, 7 – излучение сигналов передатчиков, передача информации в канале; 3, 8 – суммирование сигналов и помех; первичная обработка сигналов; детектирование и последетекторная обработка; 4, 9 – измерение временного положения сигналов; 5 – функциональное преобразование, определяющее временное положение ретранслированного сигнала; 10 – вычисление сдвига шкал; 11 – статистическая обработка результатов измерений.

Применение К-сетей для анализа встречного и ретрансляционного алгоритмов иллюстрируют рис. 7 а) и рис. 7 б) соответственно, где: 1 – формирующие и передающие устройства; 2 – приёмные устройства и измерители; 3 – вычислительные устройства.

Анализ основных алгоритмов проводился для общего случая – непостоянства задержек сигналов в канале передачи информации и в аппаратуре, а также наличия помех [4]. Это позволило в дальнейшем оценить влияние на погрешность измерения сдвига шкал для различных алгоритмов параметров канала передачи информации, аппаратуры и помех.

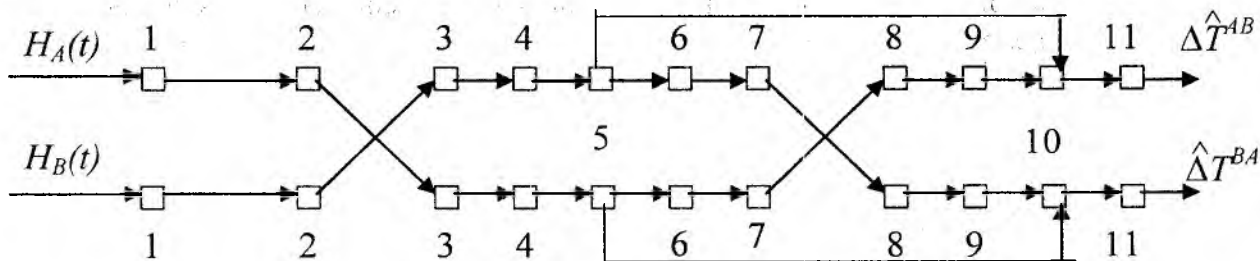


Рис. 6

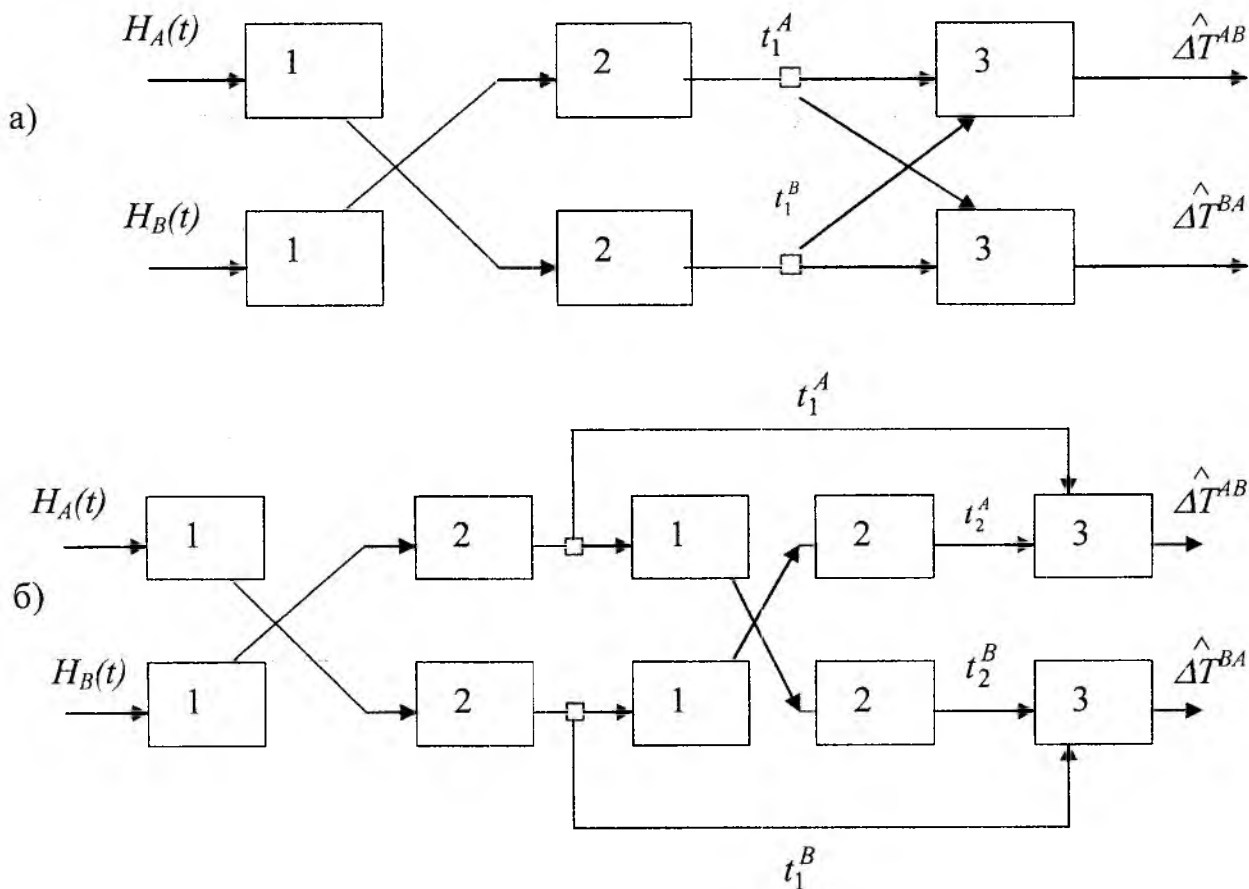


Рис. 7

Достоинством использования графов и К-сетей для моделирования алгоритмов является наглядность их реализации и полнота учета основных источников погрешностей, а недостатком – сложность аналитической записи. Поэтому основной анализ был выполнен с применением систем уравнений, составленных для измеряемых интервалов времени, истинных значений сдвига шкал и источников погрешностей.

3 Соотношения для расчета сдвига шкал и погрешностей измерения

В качестве примера составим систему уравнений для измеряемых интервалов времени в пункте A в случае ОРА, временная диаграмма которого приведена на рис. 4.

Измеренные значения временного положения сигнала, транслированного из пункта A в пункт B , и сигнала, ретранслированного из пункта B в пункт A , составят:

$$t_1^A = \tau_{ПРД}^B + \tau_{k1}^{BA} + \Delta T^{AB} + \tau_{ПРМ}^A + \delta_{t1}^A; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} t_2^A &= t_0 + \Delta T^{AB} + n \cdot (t_0 - t_1^B) + \tau_{ПРД}^B + \tau_{k2}^{BA} + \tau_{ПРМ}^A + \delta_{t2}^A = \\ &= t_0 + \Delta T^{AB} + n \cdot [t_0 - (\tau_{k1}^{AB} - \Delta T^{AB} + \delta_{t1}^B + \tau_{ПРД}^A + \tau_{ПРМ}^B)] + \tau_{ПРД}^B + \tau_{k2}^{BA} + \tau_{ПРМ}^A + \delta_{t2}^A = \quad (2) \\ &= (n+1) \cdot t_0 + (n+1) \cdot \Delta T^{AB} - n \cdot (\delta_{t1}^B + \tau_{ПРД}^A + \tau_{ПРМ}^B + \tau_{k1}^{AB}) + \tau_{k2}^{BA} + \tau_{ПРД}^B + \tau_{ПРМ}^A + \delta_{t2}^A, \end{aligned}$$

где $\delta_{t1}^A, \delta_{t1}^B, \delta_{t2}^A, \delta_{t2}^B$ – абсолютные погрешности оценки временного положения сигналов, вызванные конечным соотношением сигнал/помеха в пунктах; $\tau_{k1}^{AB}, \tau_{k1}^{BA}, \tau_{k2}^{AB}, \tau_{k2}^{BA}$ – соответствующие задержки сигналов в канале передачи информации; $\tau_{ПРМ}^A, \tau_{ПРД}^A, \tau_{ПРМ}^B, \tau_{ПРД}^B$ – задержки сигналов в приемных и передающих трактах аппаратуры соответствующих пунктов; t_0 – время задержки опорного импульса.

Решение системы уравнений (1), (2) позволяет оценить сдвиг шкалы пункта A в виде

$$\begin{aligned} \Delta \hat{T}^{AB} &= \frac{(n-1) \cdot t_1^A + t_2^A - (n-1) \cdot t_0}{2} = \Delta T^{AB} + \frac{\delta_{t2}^A - n\delta_{t1}^B + (n-1) \cdot \delta_{t1}^A}{2n} + \\ &+ \frac{n(\tau_{k1}^{BA} - \tau_{k1}^{AB}) + (\tau_{k2}^{BA} - \tau_{k1}^{BA})}{2n} + \frac{(\tau_{ПРМ}^A - \tau_{ПРД}^A) - (\tau_{ПРМ}^B - \tau_{ПРД}^B)}{2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Записать полученную выше систему уравнений можно в матричной форме следующим образом

$$[t_u^{AB}] = [\Delta T^{AB}] + [\tau_k] + [\delta_{C/П}] + [\tau_{АП}], \quad (4)$$

где $[t_u^{AB}]$ – матрица-столбец измеряемых интервалов времени; $[\Delta T^{AB}]$ – матрица-столбец истинного сдвига шкал; $[\tau_k]$ – матрица-столбец задержек сигналов в канале передачи информации; $[\delta_{C/П}]$ – матрица-столбец помеховых погрешностей оценок временного положения сигнала; $[\tau_{АП}]$ – матрица-столбец аппаратурных задержек.

Оценка сдвига шкал $\Delta \hat{T}^{AB}$ и суммарная абсолютная погрешность измерения сдвига шкал в пункте A могут быть получены в матричной форме в виде

$$\Delta \hat{T}^{AB} = [F_m] [t_u^{AB}], \quad \delta_{\Sigma}^A = \Delta T^{AB} - \Delta T^{AB} = \delta_{C/П}^A + \delta_K^A + \delta_{АП}^A, \quad (5)$$

где $[t_u^{AB}]$ – видоизмененная матрица-столбец измеряемых интервалов времени; $[F_m]$ – функциональная матрица-строка коэффициентов и параметров опорно-ретрансляционного алгоритма синхронизации, а $\delta_{C/П}^A$ – помеховая погрешность, вызванная конечным соотношением сигнал/помеха в пунктах; δ_K^A – канальная погрешность, вызванная нестабильностью и необратимостью задержек сигналов в канале передачи информации; $\delta_{АП}^A$ – аппаратурная погрешность, вызванная нестабильностью задержек сигналов в аппаратуре.

Состав матриц для основных алгоритмов измерения сдвига шкал в пункте A приведен в табл. 2. Соответствующие соотношения для пункта B отличаются верхними индексами (вместо индекса A ставится индекс B и наоборот). Значения $\Delta \hat{T}$, а также слагаемые суммарной погрешности для основных алгоритмов измерения сдвига шкал времени пункта A приведены в табл. 3. Соответствующие соотношения для пункта B отличаются верхними индексами (вместо индекса A ставится индекс B и наоборот).

Таблица 2

Матрицы	Алгоритмы			
	Непосредственный (ОА)	Взаимный (АОО)	Встречный (ВА)	Ретрансляционные: РА ($n \leq -1; t_0 = 0$); ОРА ($n > -1; t_0 > 0$)
$[F_m]$	$\begin{bmatrix} 1; \tau_P^{BA} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1; -1; \tau_P^{OA} - \tau_P^{OB} \end{bmatrix}$	$[0,5; -0,5]$	$\begin{bmatrix} n-1; \frac{1}{2n}; \frac{(n+1)t_0}{2n} \end{bmatrix}$
$[t_u]$	$\begin{bmatrix} t_1^A \\ -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} t_1^A \\ t_1^B \\ -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} t_1^A \\ t_1^B \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} t_1^A \\ t_2^A \\ -1 \end{bmatrix}$
$[\Delta T]$	$[\Delta T^{AB}]$	$\begin{bmatrix} \Delta T^{AO} \\ -\Delta T^{OB} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta T^{AB} \\ -\Delta T^{AB} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta T^{AB} \\ (n+1)t_0 + \Delta T^{AB} \end{bmatrix}$
$[\tau_k]$	$\begin{bmatrix} \tau_k^{BA} \\ -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \tau_k^{OA} \\ \tau_k^{OB} \\ -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \tau_{k1}^{BA} \\ \tau_{k1}^{AB} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \tau_{k1}^{BA} \\ -n \cdot \tau_{k1}^{AB} + \tau_{k2}^{BA} \\ -1 \end{bmatrix}$
$[\tau_{АП}]$	$[\tau_{прд}^B + \tau_{прм}^A]$	$\begin{bmatrix} \tau_{прд}^O + \tau_{прм}^A \\ \tau_{прд}^O + \tau_{прм}^B \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \tau_{прд}^B + \tau_{прм}^A \\ \tau_{прд}^A + \tau_{прм}^B \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \tau_{прд}^B + \tau_{прм}^A \\ \tau_{прд}^B + \tau_{прм}^A - n(\tau_{прд}^A + \tau_{прм}^B) \end{bmatrix}$
$[\delta_{СП}]$	$[\delta_{i1}^A]$	$\begin{bmatrix} \delta_{i1}^A \\ \delta_{i1}^B \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \delta_{i1}^A \\ \delta_{i1}^B \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \delta_{i1}^A \\ (\delta_{i2}^A - n \cdot \delta_{i1}^B) \end{bmatrix}$

В заключение отметим, что сопоставление алгоритмов синхронизации по основным показателям в настоящее время затруднено из-за отсутствия единого подхода к математическому описанию алгоритмов синхронизации и применения единых методов обработки результатов измерений в существующих ССВЧ. Основной вывод, который можно сделать из предварительного сравнения основных методов синхронизации и алгоритмов измерения сдвигов шкал, заключается в том, что предпочтительных во всех отношениях как методов, так и алгоритмов не существует.

Оценка сдвига шкал и абсолютные погрешности	Алгоритмы			
	ОА	АОО	ВА	РА ($n \leq -1; t_0 = 0$); ОРА ($n > -1; t_0 > 0$)
$\Delta \hat{T}^{AB}$	$(t_1^A - \hat{t}_k^{BA})$	$(t_1^A - t_1^B) -$ $-(\hat{t}_k^{OA} - \hat{t}_k^{OB})$	$0,5(t_1^A - t_1^B)$	$\frac{(n-1)t_1^i + t_2^A - (n+1) \cdot t_0}{2n};$ $(0,5t_2^A - t_0) - \text{для } n = 1$
δ_k^A	$\tau_k^{BA} - \hat{\tau}_k^{BA}$	$(\tau_k^{OA} - \tau_k^{OB}) -$ $-(\hat{\tau}_k^{OA} - \hat{\tau}_k^{OB})$	$\frac{(\tau_{k1}^{BA} - \tau_{k1}^{AB})}{2}$	$\frac{n(\tau_{k1}^{BA} - \tau_{k1}^{AB}) + (\tau_{k2}^{BA} - \tau_{k1}^{BA})}{2n}$ $\frac{(\tau_{k2}^{BA} - \tau_{k1}^{AB})}{2} - \text{для } n = 1$
$\delta_{c/n}^A$	δ_{t1}^A	$(\delta_{t1}^A - \delta_{t1}^B)$	$0,5(\delta_{t1}^A - \delta_{t1}^B)$	$\frac{\delta_{t2}^A - n\delta_{t1}^B + (n-1) \cdot \delta_{t1}^A}{2n};$ $\frac{\delta_{t2}^A - \delta_{t1}^B}{2} \text{ для } n = 1$
$\delta_{АП}^A$	$\tau_{прм}^A + \tau_{прд}^B$	$\tau_{прм}^A - \tau_{прм}^B$	$0,5(\tau_{прм}^A - \tau_{прд}^A) - 0,5(\tau_{прм}^B - \tau_{прд}^B)$	

Список литературы: 1. Ю. А. Коваль, В. В. Бавыкина, Основы теории многопозиционных систем синхронизации времени и частоты. I Постановка задачи // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2002. Вып. 130. С. 109 – 116. 2. Ю. А. Коваль, В. В. Бавыкина. Основы теории большебазовых систем синхронизации времени и частоты // I-й Международн. Радиоэлектронн. форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2002. Сб. научн. трудов. Ч. 1. Харьков: АН ПРЭ, ХНУРЭ. 2002. С. 177 – 182. 3. Коваль Ю.А., Троцин О. Л. Анализ алгоритмов синхронизации эталонов времени и частоты // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч. -техн. сб. 2000. Вып. 113. С. 47 – 52. 4. Коваль Ю. А., Бавыкина В. В., Троцин О. Л. Анализ путей совершенствования алгоритмов измерения сдвига шкал в системах синхронизации времени и частот // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2001. Вып. 118. С. 85 – 91. 5. Метеоры сегодня / Б.Л. Кашеев, Ю.А. Коваль, В.И. Горбач, Б.Г. Бондарь. Киев.: Техника, 1996. 196 с. 6. А.С. 712807 СССР, МКИ G 04 C 11/02. Способ сравнения шкал времени / Б.С.Дудник, Б.Л. Кашеев, В.П. Моисеев. Опубл. 7.06.80 Бюл. №4. 7. А.С. 1167573 СССР, МКИ G 04 C 11/02. Способ сличения шкал времени и устройство для его осуществления / Б.С. Дудник, В.П. Моисеев.- N 2737342; заявл. 16.03.79. Опубл. 09.05.85. Бюл. N 26. 8. Hanson D. W. Fundamentals of two-way time transfers by satellite // 43rd Annual Symposium on Frequency Control. 1989. P. 174 – 178.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 27.03.2003