

Ю. А. КОВАЛЬ *д-р техн. наук*, Е. А. ИВАНОВА, *канд. техн. наук*,
В. Ю. ПРИЙМАК, Б. А. АЛ-ТВЕЖРИ

КРИТЕРИИ СРАВНЕНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ СИНХРОНИЗАЦИИ РАЗНЕСЕННЫХ ЭТАЛОНОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

Введение и постановка задачи

Синхронизация (сравнение, сличение) территориально разнесенных стандартов (в частности эталонов) времени и частоты – основа для реализации современных частотно-временных методов, позволяющих решать актуальные научно-технические и оборонные задачи координатно-временного обеспечения, метрологии времени и частоты, радиоастрономии, радиолокации, радиопеленгации и др. [1–5].

Важную роль играет синхронизация в современных сетях связи для управления потоками информации с высокой надежностью, устойчивостью и при минимальных затратах [6–8]. Особо жесткие требования предъявляются к синхронизации опорных генераторов первичного уровня и транзитных узлов, верхняя граница относительной нестабильности по частоте которых составляет 10^{-11} [6–9]. В директивных документах отмечается необходимость иметь резервные средства синхронизации, размещенные на защищенных объектах.

Ключевыми понятиями в задаче синхронизации территориально разнесенных стандартов являются, согласно ДСТУ 2870–94 (*Вимірювання часу та частоти*), **шкала времени $H(t)$** – непрерывная последовательность интервалов времени определенной длительности, отсчитываемая от условного начала отсчета, и **сдвиг шкал ΔT** – алгебраическая величина, характеризующая взаимное опережение ($\Delta T > 0$) или запаздывание ($\Delta T < 0$) шкал.

В общем случае сдвиг шкал является функцией времени $\Delta T(t)$. Анализ функции $\Delta T(t)$ позволяет оценить отличие стандартов по частоте

$$\Delta f(t) = f_0 \frac{d[\Delta T(t)]}{dt}, \quad (1)$$

где f_0 – номинальное (опорное) значение частоты стандарта.

Таким образом, согласно выражению (1), сравнение шкал времени позволяет производить и сравнение (или синхронизацию) стандартов частоты.

Высокие темпы совершенствования эталонов (относительная нестабильность эталонов до недавнего времени составляла $10^{-13} \dots 10^{-14}$, а в настоящее время¹ – $10^{-15} \dots 10^{-16}$) определяют актуальность повышения точности методов синхронизации²(МС).

В настоящее время определился круг высокоточных МС (см. табл. 1), которые можно разделить на три группы:

- 1) прямой МС, основанный на использовании перевозимых квантовых часов (ПКЧ);
- 2) радиотехнические МС, использующие различные диапазоны распространения радиоволн (РРВ) и технические средства (радиометеорный метод синхронизации – РМС [11]; телекоммуникационные искусственные спутники Земли – ТКИСЗ [12]; спутниковые радионавигационные системы – СРНС [13]);

3) сетевые МС, использующие современные каналы связи и стандартные протоколы (Network Time Protocol – NTP; Precision Time Protocol – PTP [6]).

Таблица 1

Методы	Погрешности	Достоинства	Недостатки	
			Общие	Для Украины
ПКЧ	1..10 нс	Прямые измерения	Низкая оперативность,	Высокая стоимость
Радиотехнические	ТКИСЗ	Глобальная зона действия, оперативность	Излучение в пунктах	Зависимость от зарубежных систем
	СРНС	Глобальная зона действия	Низкие помехозащищенность и оперативность	
	РМС	Оперативность, автономность	Излучение в пунктах, ограниченная дальность	Высокая стоимость
NTP	1....1000 мкс	Для цифровых сетей связи	Низкие оперативность и точность	—
PTP, IEEE1588	100 нс			

Приведенные в табл.1 характеристики основных МС не позволяют объективно сравнивать данные методы как друг с другом, так и с новыми, разрабатываемыми в ХНУРЭ, методами [14–16].

При реализации МС особую роль играют алгоритмы измерений – порядок обмена сигналами между сравниваемыми стандартами, который, после обработки этих сигналов, а также исключения времени задержки сигналов в канале РРВ и аппаратуре, обеспечивает измерение сдвига шкал.

Для сравнения методов и алгоритмов синхронизации необходимы единые частные и общие критерии сравнения, разработке которых посвящена настоящая статья.

Алгоритмические погрешности и неопределенности синхронизации

Алгоритмы сличения, с точки зрения излучения сигналов в пунктах размещения эталонов, можно разделить на три вида [11, 17]:

1) полуактивный односторонний алгоритм (ОА) – сигналы излучаются только из одного пункта (англ. термин – *one-way*);

2) пассивный алгоритм общего охвата (АОО), основанный на приеме в пунктах сигнала общего источника (англ. термин – «*common-view*»);

3) группа активных алгоритмов, в которых сигналы излучаются в каждом из пунктов (англ. термины – «*two-way*» или «*Two-Way Time Transfer*», сокр. *TWTT*).

Поскольку в высокоточных МС используются, в основном, АОО и активные алгоритмы дальнейший анализ ограничивается только этими алгоритмами.

Алгоритм общего охвата. В АОО используется дополнительный общий источник (ОИ), сигнал которого $s_0(t)$ принимается в пунктах **a** и **в**. Структурная схема и временные диаграммы для АОО приведены на рис. 1, а структурная схема системы синхронизации, реализующей АОО, – на рис. 2.

На рис. 1 и 2 введены обозначения: t_1^a , t_1^b – временные положения сигналов в пунктах; $\tau_0^{\hat{a}}$, $\tau_0^{\hat{b}}$ – задержка сигнала в канале РРВ от общего источника до пунктов **a** и **в** соответственно; $\Delta T^{\hat{aa}} = \Delta T^{\hat{ab}} - \Delta T^{\hat{bb}}$ – сдвиг шкал пунктов **a** и **в**, выраженный через временные сдвиги между сигналом общего источника и шкалами пунктов; $\tau_{i\hat{aa}}^{\hat{a}}$ – задержка сигнала в передатчике ОИ; $\tau_{i\hat{ab}}^{\hat{a}}$,

$\tau_{i\delta i}^{\hat{a}}$ – задержки сигнала в приемных трактах пунктов; $\delta_{i1}^{\hat{a}}, \delta_{i1}^{\hat{a}}$ – абсолютные значения помеховых погрешностей оценок временного положения (ОВП) сигнала в пунктах; $\Delta T^{\hat{a}\hat{a}}, \Delta T^{\hat{a}\hat{a}}$ – оценки сдвигов шкал пунктов; $u_{c\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}}, u_{c\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}}$ – суммарные стандартные неопределенности измерений.

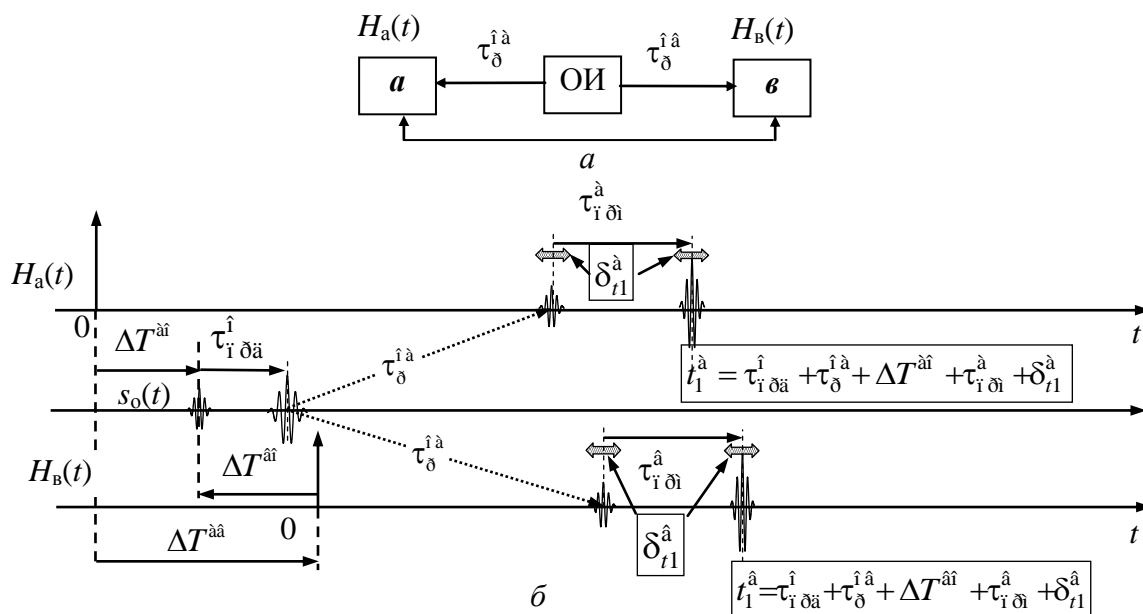


Рис. 1. Структурная схема (а) и временная диаграмма (б) АОО

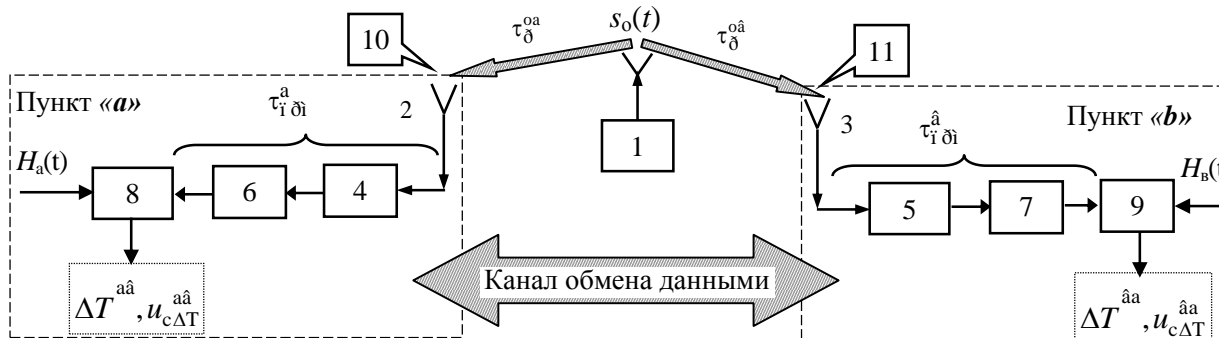


Рис. 2. Структурная схема системы синхронизации, реализующей АОО:

1 – источник общего сигнала; 2, 3 – антенны; 4, 5 – приемные устройства; 6, 7 – устройства оценки временного положения сигналов; 8, 9 – устройства, реализующие алгоритм измерений и методы обработки результатов; 10, 11 – источники помех

Активные алгоритмы. Распространение получили три вида активных алгоритмов: встречный (ВА); ретрансляционный (РА); опорно-ретрансляционный (ОРА) [11].

Структурная схема и временные диаграммы ВА приведены на рис.3. Для исключения обмена результатами измерений между пунктами используются алгоритмы РА и ОРА, временные диаграммы которых приведены соответственно на рис. 4 и 5.

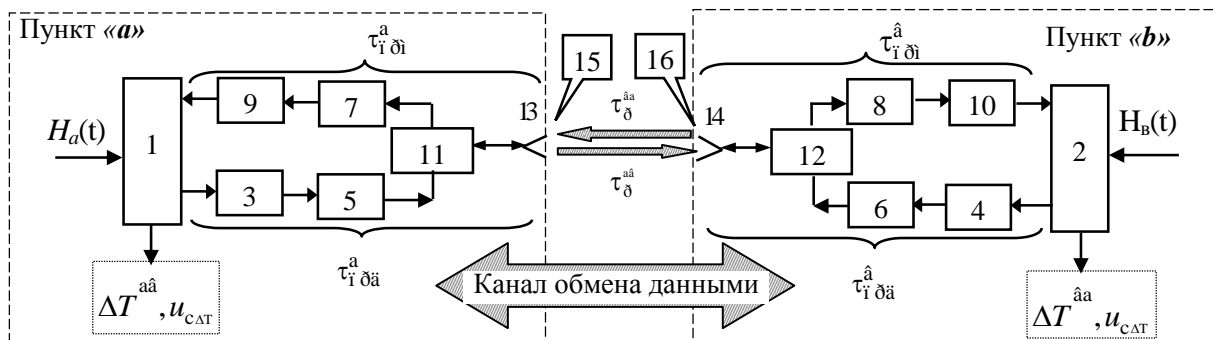


Рис. 6. Структурная схема систем синхронизации, реализующих активные алгоритмы:
 1, 2 – устройства, реализующие алгоритм измерений и методы обработки результатов;
 3, 4 – формирователи сигналов; 5, 6 – передающие устройства; 7, 8 – приемные устройства;
 9, 10 – устройства оценки временного положения сигналов; 11, 12 – антенные коммутаторы;
 13, 14 – антенны; 15, 16 – источники помех

На рис. 3 – 6 введены обозначения: $t_2^{\hat{a}}, t_2^{\hat{a}}$ – измеренное время задержки принимаемых сигналов в пунктах *a* и *b* соответственно в цикле ретрансляции; $\tau_{\delta 1}^{\hat{a}\hat{a}}, \tau_{\delta 1}^{\hat{a}\hat{a}}, \tau_{\delta 2}^{\hat{a}\hat{a}}, \tau_{\delta 2}^{\hat{a}\hat{a}}$ – соответствующие задержки в канале РРВ в циклах трансляции (индекс 1) и ретрансляции (индекс 2) сигналов; $\delta_{t_2}^{\hat{a}}, \delta_{t_2}^{\hat{a}}$ – погрешности ОВП сигналов, вызванные внутренними шумами и помехами, для пунктов в цикле ретрансляции; $\tau_{i \delta \hat{a}}^{\hat{a}}, \tau_{i \delta \hat{a}}^{\hat{a}}$ – задержки сигналов в передающих трактах пунктов; k, n – коэффициенты ретрансляции соответственно для РА и ОРА; t_0 – время задержки опорного импульса для ОРА; τ_{12} – временной интервал между циклами трансляции и ретрансляции сигналов.

Решение уравнений, составленных для рассмотренных алгоритмов, позволяют получить выражение для общей погрешности измерения сдвига шкал [11]:

$$\delta_{\Delta O}^{\hat{a}\hat{a}}(\Sigma) = \Delta T^{\hat{a}\hat{a}} - \Delta T^{\hat{a}\hat{a}} = \delta_{\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}}(\mathbf{DDB}) + \delta_{\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}}(\hat{a}\hat{i}) + \delta_{\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}}(\hat{n}/\hat{i}), \quad (2)$$

где $\delta_{\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}}(\mathbf{DDB})$, $\delta_{\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}}(\hat{a}\hat{i})$, $\delta_{\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}}(\hat{n}/\hat{i})$ – соответственно канальная РРВ, аппаратурная и помеховая погрешности, выражения для которых приведены в табл. 2.

В формулах табл. 2 применены обозначения: $V_{\tau_0} = d\tau_p/dt$ – скорость изменения задержки сигналов в канале РРВ (характеризует нестабильность задержки сигналов в канале) и ее оценка; $\Delta\tau_{\delta \hat{a}\hat{c}} = \tau_{\delta \hat{a}\hat{c}}^{\hat{a}\hat{a}} - \tau_{\delta \hat{a}\hat{c}}^{\hat{a}\hat{a}}$ – невязанность задержки сигналов в канале РРВ; $\hat{V}_{\tau_0}, \hat{\tau}_{12}, \Delta\tau_{\delta \hat{a}\hat{c}}, \hat{\tau}_{i \delta \hat{a}}^{\hat{a}}, \hat{\tau}_{i \delta \hat{a}}^{\hat{a}}, \hat{\tau}_{i \delta \hat{a}}^{\hat{a}}, \hat{\tau}_{i \delta \hat{a}}^{\hat{a}}$ – оценки соответствующих параметров.

Таблица 2

Состав (2)	АОО	ВА	РА ($n \leq -1; t_0 = 0$); ОРА ($n > -1; t_0 \neq 0$)	Вид неопределенно- сти
$\delta_{\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}}(\mathbf{DDB})$	$(\tau_{\delta}^{\hat{a}\hat{a}} - \tau_{\delta}^{\hat{a}\hat{a}}) -$ $-(\hat{\tau}_{\delta}^{\hat{a}\hat{a}} - \hat{\tau}_{\delta}^{\hat{a}\hat{a}})$	$0,5(\Delta\tau_{\delta \hat{a}\hat{c}} + V_{\tau_0} \Delta T^{\hat{A}\hat{B}}) -$ $-0,5(\Delta\tau_{\delta \hat{a}\hat{c}} + V_{\tau_0} \Delta T^{\hat{A}\hat{B}})$	$0,5(\Delta\tau_{\delta \hat{a}\hat{c}} + V_{\tau_0} \tau_{12}/n) -$ $-0,5(\Delta\tau_{\delta \hat{a}\hat{c}} + \hat{V}_{\tau_0} \hat{\tau}_{12}/n)$	B
$\delta_{\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}}(\hat{n}/\hat{i})$	$(\delta_{t_1}^{\hat{a}} - \delta_{t_1}^{\hat{a}})$	$0,5(\delta_{t_1}^{\hat{a}} - \delta_{t_1}^{\hat{a}})$	$\frac{\delta_{t_2}^{\hat{a}} - n\delta_{t_1}^{\hat{a}} + (n-1)\delta_{t_1}^{\hat{a}}\delta_{t_1}^{\hat{a}}}{2n};$ $0,5(\delta_{t_2}^{\hat{a}} - \delta_{t_1}^{\hat{a}}) - \text{äëü } n = 1$	A

$\delta_{\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}}(\hat{a}\hat{i})$	$(\tau_{i\hat{o}i}^{\hat{a}} - \tau_{i\hat{o}\hat{i}}^{\hat{a}}) -$ $-(\tau_{i\hat{o}i}^{\hat{a}} - \tau_{i\hat{o}\hat{i}}^{\hat{a}})$	$\frac{[(\tau_{i\hat{o}i}^{\hat{a}} - \tau_{i\hat{o}\hat{i}}^{\hat{a}}) - (\tau_{i\hat{o}i}^{\hat{a}} - \tau_{i\hat{o}\hat{i}}^{\hat{a}})]H[(\tau_{i\hat{o}i}^{\hat{a}} - \tau_{i\hat{o}\hat{i}}^{\hat{a}}) - (\tau_{i\hat{o}i}^{\hat{a}} - \tau_{i\hat{o}\hat{i}}^{\hat{a}})]}{2}$	B
--	---	---	----------

Наряду с погрешностями, в настоящее время для оценки точности измерений в метрологии все более широкое применение находит понятие неопределенности измерений [18–21]. Поскольку параметры помеховых погрешностей определяются при статистической обработке результатов измерений сдвига шкал, эта оценка погрешности соответствует стандартной неопределенности типа **A** [18, 19].

Канальную и аппаратную погрешности нельзя определить путем статистической обработки результатов измерений. Поэтому, согласно [18, 19], эти погрешности формируют неопределенность типа **B**. Эти соответствия составляющих общей погрешности (2) и видов неопределенностей отражены в табл. 2.

Соотношения для расчета среднеквадратических отклонений (СКО) случайных помеховых погрешностей измерения сдвига шкал и коэффициентов корреляции этих погрешностей $R(n)$ в пунктах приведены в табл. 3, где приняты обозначения: $\sigma_{\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}} = u_{A/\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}}$ – СКО случайных помеховых погрешностей и равные им стандартные неопределенности измерения сдвига шкал пунктов; $\sigma_i^a, \sigma_i^{\hat{a}}$ – СКО оценок временного положения сигналов в пунктах соответственно; $m_a = (\sigma_i^{\hat{a}} / \sigma_i^a)^2$ – коэффициент, учитывающий различие погрешностей ОВП сигналов в пунктах.

Формулы для СКО случайных погрешностей в пункте **B** ($\sigma_{\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}} = u_{A/\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}}$) отличаются от приведенных в табл. 3 индексами (вместо $m_a \rightarrow m_{\hat{a}} = 1/m_a = (\sigma_i^a / \sigma_i^{\hat{a}})^2$). В формуле для $R(n)$ в качестве параметра m могут быть использованы как m_a , так и $m_{\hat{a}}$.

Таблица 3

Алгоритмы	$\sigma_{\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}} = u_{A/\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}}$	$R(n)$
АОО	$\sigma_i^a \sqrt{1 + m_a}$	-1
ВА	$0,5\sigma_i^a \sqrt{1 + m_a}$	-1
РА ($n < -1$)	$\frac{\sigma_i^a \sqrt{n^2(1 + m_a) - 2n + 2}}{2 n }$;	$R(n, m) = -\frac{n(n-1)}{\sqrt{\left(n^2 - 2\frac{n-1}{m+1}\right)\left(n^2 - 2m\frac{n-1}{m+1}\right)}}; R(1, m) = 0$
ОРА ($n > -1$)	$0,5\sigma_i^a \sqrt{1 + m_a}$ – для $n=1$	

СКО случайных погрешностей для РА и ОРА зависят от коэффициентов ретрансляции ($k = -n$ – для РА, n – для ОРА). На рис. 7, а приведены графики для нормированных случайных погрешностей $(\sigma_{\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}})' = \sigma_{\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}} / \sigma_{\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}}(\hat{A}\hat{A})$ ($\sigma_{\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}}(\hat{A}\hat{A})$ – СКО для ВА).

Анализ графиков $(\sigma_{\Delta T}^{\hat{a}\hat{a}})'$ показывает, что помеховые погрешности минимальны для ОРА ($n = 2$) [11]. Коэффициент корреляции помеховых погрешностей в пунктах также зависит от величин n и k (см. рис. 7, б).

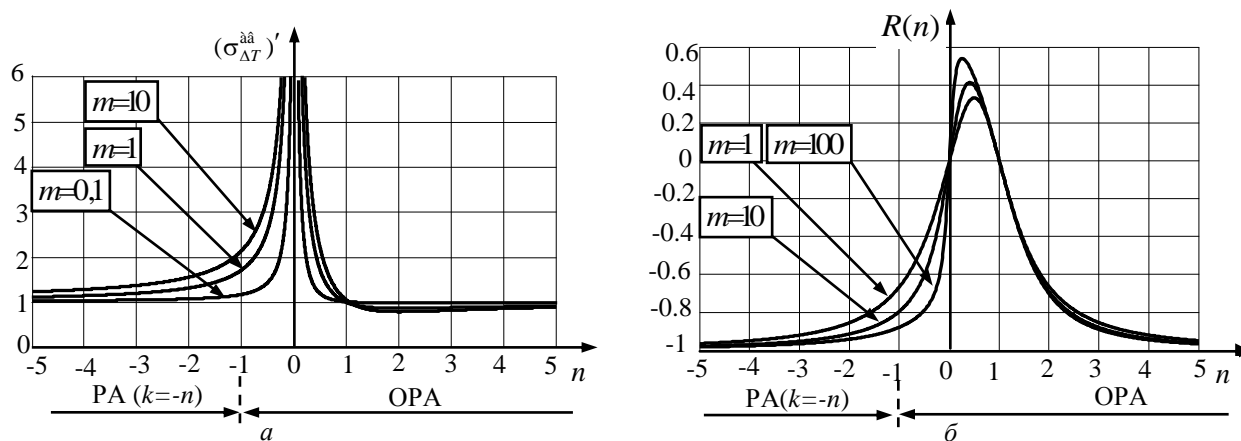


Рис. 7. Зависимости СКО относительной погрешности (а) и коэффициента корреляции погрешностей в пунктах (б) от коэффициента ретрансляции для РА и ОРА

Критерии сравнения алгоритмов и методов синхронизации

Помимо рассмотренных выше показателей точности измерений (оценки погрешностей и неопределенностей измерений) и корреляционных связей результатов измерений в пунктах, для сравнения алгоритмов и методов синхронизации предлагается использовать критерии:

- 3) энергетические показатели;
- 2) необходимость обмена результатами измерений;
- 3) требования к параметрам канала РРВ;
- 4) возможности модификации и синтеза комбинированных алгоритмов;
- 5) требования к параметрам сигналов и способам их обработки;
- 6) методы обработки результатов измерений.

Данные критерии применимы также к методам и системам синхронизации, для которых целесообразно ввести обобщенный показатель качества и дополнительные частные критерии сравнения:

- 1) оперативность, производительность – время единичного измерения и период между единичными измерениями;
- 2) возможности измерения или компенсации аппаратурных задержек;
- 3) экспериментальные и модельные методы оценки параметров канала РРВ;
- 4) особенности технической реализации (параметры радиоканала, сигналов и способов их обработки; способы измерения или компенсации аппаратурных задержек; каналы обмена результатами измерений и др.);
- 5) экономические показатели.

Современные требования к экологии и электромагнитной совместимости радиотехнических систем привели к тому, что существенно возросла роль энергетических показателей и к системам синхронизации.

Активные алгоритмы (ВА, РА, ОРА) и АОО несопоставимы по энергетическим показателям, поскольку последний не требует излучения сигналов синхронизируемыми пунктами. Отсутствие собственных излучений является серьезным преимуществом АОО.

Что касается учета энергетики принимаемых сигналов, то приведенные в табл. 3 соотношения для погрешностей не могут быть использованы для объективного сравнения алгоритмов, поскольку в этих соотношениях отсутствует информация о затраченной на каждое единичное измерение энергии. Поэтому для сравнения алгоритмов вводят эквивалентную энергетическую (ЭЭП) погрешность ОВП сигналов [11], СКО которой определяется эффективной шириной спектра сигнала ($\Delta\omega_{эф}$), спектральной плотностью шума в пунктах (N_0) и суммарной энергией принимаемых сигналов $\mathcal{E}_\Sigma = \mathcal{E}_a + \mathcal{E}_b$, соответствующих единичному измерению (наблюдению):

$$\sigma_{t(\dot{Y}_\Sigma)} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2\dot{Y}_\Sigma}{N_0} \cdot \Delta\omega_{y_0}}} . \quad (3)$$

На основе ЭЭП (3) для сравнения алгоритмов вводится коэффициент использования энергии при измерении сдвига шкал

$$\eta_{\dot{Y}_\Sigma} = \sigma_{t(\dot{Y}_\Sigma)} / \sigma_{\Delta T} . \quad (4)$$

Анализ $\eta_{\dot{Y}_\Sigma}$ для алгоритмов упрощается, если положить одинаковыми для пунктов как спектральные плотности шума, так и эффективную ширину спектра сигналов:

$$N_0^a = N_0^b = N_0; \quad \Delta\omega_{y_0}^a = \Delta\omega_{y_0}^b = \Delta\omega_{y_0} . \quad (5)$$

С учетом соотношений (3) – (5), коэффициенты ЭЭП составят:

для АОО $\eta_{\dot{Y}_\Sigma} = \sqrt{\dot{Y}_a \dot{Y}_a} / \dot{Y}_\Sigma = \sqrt{x} / (1+x)$;

для ВА и ОРА ($n=1$, измерение в одном из пунктов) $\eta_{\dot{Y}_\Sigma} = 2\sqrt{\dot{Y}_a \dot{Y}_a} / \dot{Y}_\Sigma = 2\sqrt{x} / (1+x)$,

где $x = \dot{Y}_a / \dot{Y}_a$.

Коэффициенты ЭЭП для этих случаев принимают максимальные значения $\eta_{\dot{Y}_\Sigma} = 1$ для ВА и ОРА ($n=1$) и $\eta_{\dot{Y}_\Sigma} = 0,5$ для АОО для $x=1$, то есть $\dot{Y}_a = \dot{Y}_a$ (см. рис. 8, а).

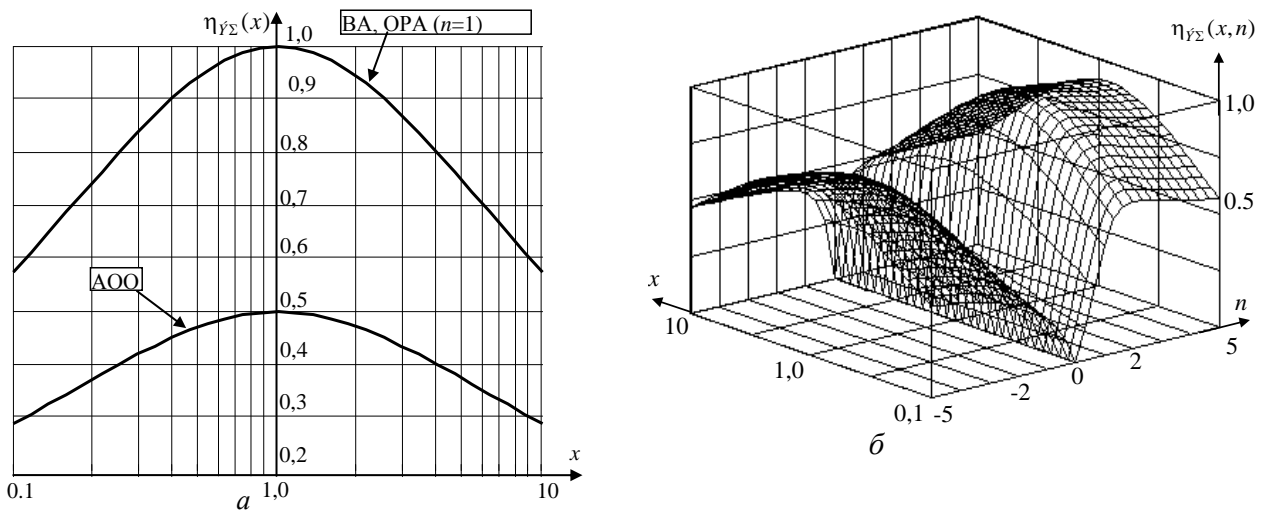


Рис. 8. Зависимости $\eta_{\dot{Y}_\Sigma}(x)$ для АОО, ВА, ОРА ($n=1$) – а и $\eta_{\dot{Y}_\Sigma}(x, n)$ для РА и ОРА – б

Для получения единичного измерения (наблюдения) в одном из пунктов в случае РА и ОРА (для $n \neq 1$) необходимо излучить и, соответственно, принять три сигнала. При этом суммарная энергия принимаемых сигналов в выражении (3) составит: $\mathcal{E}_\Sigma = 2\mathcal{E}_a + \mathcal{E}_b$ – для единичного измерения в пункте a ; $\mathcal{E}_\Sigma = 2\mathcal{E}_b + \mathcal{E}_a$ – для единичного измерения в пункте b . Исходя из этого, коэффициент ЭЭП для РА и ОРА ($n \neq 1$) составляет

$$\eta_{\dot{Y}_\Sigma}(x, n) = \frac{2|n|}{\sqrt{(n^2 - 2n + 2) \cdot (2 + x^{-1}) + n^2(1 + 2x)}} . \quad (6)$$

Построенное согласно (6) аксонометрическое представление $\eta_{\dot{Y}_\Sigma}(x, n)$ приведено на рис.8, б.

Таким образом, коэффициент ЭЭП позволяет сопоставлять затраченную на единичное измерение суммарную энергию принимаемых сигналов с достигнутым значением СКО помеховой погрешности и является своеобразным КПД алгоритма измерений.

Для реализации АОО и ВА необходим обмен информацией о результатах измерений между пунктами. Это является недостатком этих алгоритмов.

Преимуществом активных алгоритмов является то, что для них не требуется оценка задержек сигналов в канале РРВ, а необходимы только высокие стабильность и обратимость этой задержки. При этом наименьшие канальные погрешности обеспечивает ВА (см. табл. 2).

На базе активных алгоритмов, путем вариации коэффициентов ретрансляции и обмена результатами измерений между пунктами, приходят к синтезу ряда комбинированных алгоритмов, имеющих меньшие помеховые и канальные погрешности [11].

Перспективной комбинацией является сочетание АОО, как основного алгоритма, с одним из активных алгоритмов как средством калибровки.

Что касается аппаратных погрешностей, то все активные алгоритмы равноценны и уступают АОО, у которого задержки в трактах общего источника исключаются (см. табл. 2).

Помимо применения традиционной согласованной фильтрации (СФ) или корреляционной обработки сигналов, в случае ОРА ($n=1$) и АОО возможно применять специфические методы обработки. К таким методам относится, так называемая, зеркальная ретрансляция сигналов (ЗРС) для ОРА ($n=1$) и взаимокорреляционная обработка (ВКО) сигналов общего источника, принимаемого в пунктах.

Преимущество ЗРС (см. рис. 9) состоит в том, что отпадает необходимость в измерении времени задержки принятого сигнала $s_1^a(t)$ и высокоточном формировании ретранслированного сигнала $s_1^a(2t_0-t)$. Принципиальная симметрия сигнала при фазовых измерениях, а также простота цифровой реализации ЗРС позволили запатентовать способ и устройство для измерения полной аппаратурной систематической погрешности [22].

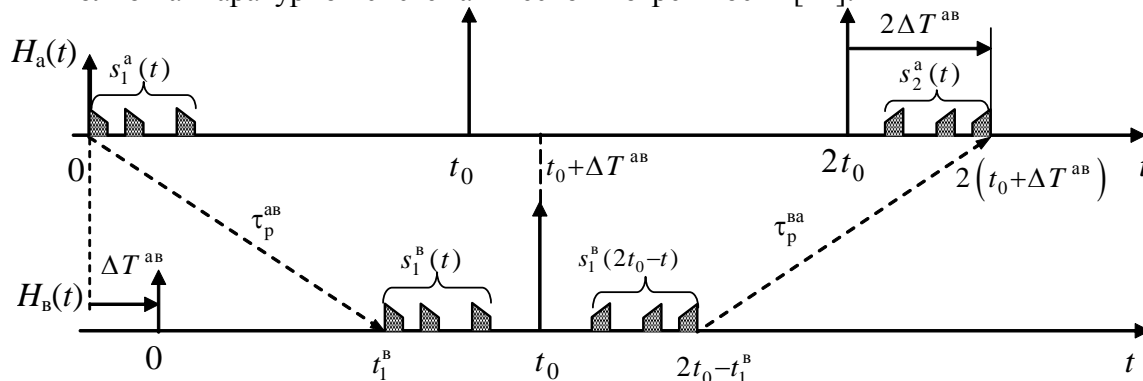


Рис. 9. Временная диаграмма зеркальной ретрансляции сигналов

ВКО сигналов в случае АОО позволяет использовать общие сигналы с неполностью известными параметрами, включая шумоподобные. К недостаткам ВКО следует отнести сравнительно большие объемы передаваемой между пунктами информации и меньшие значения пороговых отношений сигнал/помеха при ВКО по сравнению с СФ ($q_{i\hat{i}\delta,\hat{A}\hat{E}\hat{I}} < q_{i\hat{i}\delta,\hat{N}\hat{O}}$). Это подтверждают как теоретический анализ, так и моделирование (рис. 10) [23].

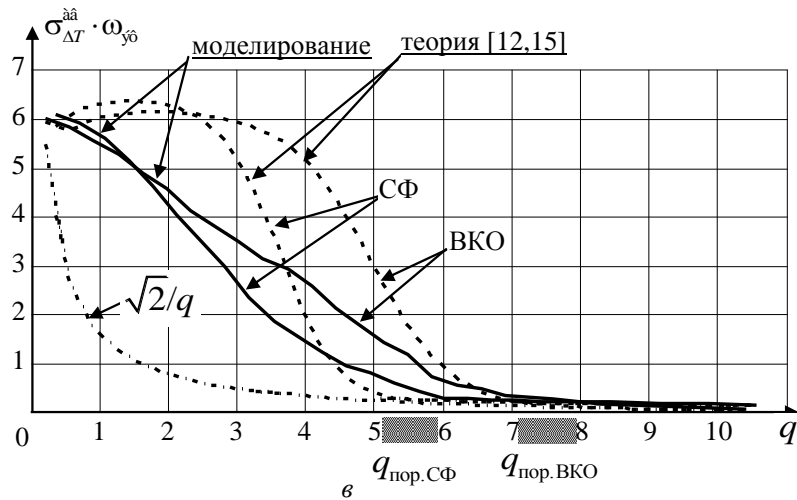


Рис. 10. Пороговые эффекты при СФ и ВКО сигналов в АОО

Основные результаты проведенного сравнения алгоритмов приведены в табл. 4.

Для учета степени реализации информационно-энергетического потенциала системы синхронизации применим обобщенный показатель качества [2]

$$\beta = \sigma_{\Delta\delta} \sqrt{P \Delta f_i B N k}, \quad (7)$$

где P – излучаемая импульсная мощность; Δf_i – ширина спектра сигнала; B – база сигнала; N – число импульсов в коде; k – число периодов, соответствующих единичному измерению с СКО $\sigma_{\Delta\delta}$.

Обобщенный показатель качества (7) можно дополнить такими существенными показателями, как оперативность измерений c – среднее число измерений в единицу времени и стоимость s . Это приводит к модифицированному обобщенному показателю качества

$$\beta_i = \beta s / c.$$

Для определенных классов систем с помощью показателей качества β и β_i можно рассчитать диаграммы обмена энергии и (или) полосы частот на погрешность синхронизации.

Таблица 4

Критерии сравнения	Алгоритмы		
	АОО	Активные	
		ВА	РА, ОРА
Требования к каналу РРВ	Должна оцениваться разность задержек в канале РРВ	Задержка в канале РРВ должна быть стабильной и обратимой	
Достоинства	Отсутствие излучения в пунктах. Возможность применять ВКО сигналов. Исключаются задержки в трактах общего источника	Задержка в канале РРВ практически исключается	
Недостатки	Необходимость оценки задержек в канале	Излучение в пунктах	
	Необходимость обмена измерительной информацией	–	
Реализации	СРНС (GPS, ГЛОНАСС); РСДБ; ТВ [15]; ГС ИСЗ [14, 16]	РМС; ТКИСЗ; кабельные, лазерные и волоконно-оптические линии	

Обозначения в табл. 4: РСДБ – радиointерферометры со сверхдлинными базами; ГС ИСЗ – геостационарный искусственный спутник Земли.

Выводы

1. Предложенные критерии сравнения алгоритмов, методов и систем синхронизации позволяют сделать более объективными их сравнение и оценку основных технических решений.

2. Анализ показал, что предпочтительного во всех отношениях алгоритма не существует – каждый из алгоритмов имеет как преимущества, так и недостатки.

3. Теоретический и практический интерес представляют проводимые на кафедре основ радиотехники ХНУРЭ работы по совершенствованию АОО и применению в качестве общих источников сигналы ТВ и ГС ИСЗ [14–16, 23].

Список литературы: 1. *Финкельштейн, А. М.* Фундаментальное координатно-временное обеспечение // Вестник Российской Академии наук. – 2007. – Т. 77, М 7. – С. 608–617. 2. *Соловьев, Ю.А.* Системы спутниковой навигации. – М. : Эко-Тендз, 2001. – 270 с. 3. *Клейман, О. С.* Державний первинний еталон одиниць часу і частоти / *О. С. Клейман., В. П. Оголюк, Г. С. Сидоренко, В. С. Соловьев* // Український метрологічний журнал. – 1997. – Вып. 3. – С. 18–23. 4. *Величко, О. М.* Державна програма створення та розвитку Державної служби єдиного часу і еталонних частот / *О. М. Величко., М.Т. Миронов, Г.С. Сидоренко Я.С. Клейман, В. С. Соловьев* // Український метрологічний журнал. – 1996. – Вып. 4. – С. 13–16. 5. *Величко, О. М.*, Державна служба єдиного часу і еталонних частот – необхідний елемент розвитку наземної космічної інфраструктури України / *Б. І. Макаренко, В. Ю. Камінський, Б. Л. Кащев, Я.С. Клейман, В. С. Соловьев, Я. С. Якув* // Космічна наука і технологія. – 1997. – Т. 3, № 1/2. – С. 7–15. 6. *Миллс Девид Л.* Сличение времени в компьютерных сетях: Протокол сетевого времени на Земле и в космосе пер. с англ. под ред. А.В. Савчука. – К. : WIRCOM, 2011. – 464 с. 7. *Бориц, В.І.* Сигналізація й синхронізація в телекомунікаційних системах / *В.І. Бориц, Є.І. Коришун, Ю.Г. Туманов, М.О. Чумак.* – К. : Наук. Думка, 2004. – 128 с. 8. *ITU-T G.8261/Y.1361* Timing and synchronization aspects in packet networks. – ITU_T, April 2008. 9. *IEEE Std. 1588–2008* IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. – IEEE, July 2008. 10. *Domnin, Yu. S.* Use of cold cesium atoms in quantum frequency standards / *Yu. S. Domnin, G. A. Elkin, A. V. Novoselov, V. N. Baryshev, L. N. Kopylov, Yu. M. Malyshev, V. G. Pal'chikov* // Quantum electron – 2004. – Vol. 34, No. 12. – P. 1084–1095. 11. *Антипов, И. Е.* Развитие теории и совершенствование радиометеорологических систем связи и синхронизации // *И.Е. Антипов, Ю.А. Коваль, В.В. Обельченко.* – Харьков : Коллегиум, 2006. – 416 с. 12. *Recommendation ITU-R TF.1153-3*, «The operational use of two-way satellite time and frequency transfer employing PN time codes». ITU, Radiocommunication Study Group, Geneva, Last update 2005. 13. *Zhang, V. S., Parker, T. E., Weiss, M. A., Vannicola, F. M.* Multi-Channel GPS/GLONASS Common-View between NIST and USNO // *IEEE International Frequency Control Symposium*, pp. 598-606, June 2000. 14. *Пат. 38167* Україна, МПК51 (2006), G04G 7/00. Спосіб частотно-часової синхронізації просторово рознесених еталонів та стандартів часу і частоти / *Нестеренко Г.В., Коваль Ю.О., Иванова О.О.* Опубл. 25.12.2008, Бюл. № 24. 15. *Коваль, Ю. А.* Анализ возможностей метода общего охвата для высокоточной синхронизации стандартов времени и частоты в пределах прямой видимости / *Ю. А. Коваль, А. А. Костыря, В. В. Обельченко, Е. Ю. Бондарь, Е. А. Иванова, Е. П. Ермолаев, М. В. Милых* // Радиотехника. Информатика. Управление. – 2009. – Вып. 1(20). – С.21-30. 16. *Коваль, Ю.А.* Экспериментальные исследования возможностей частотно-временной синхронизации при использовании сигналов геостационарных ИСЗ системы SBAS / *Коваль Ю.А., Иванова Е.А., Костыря А.А., Иванова Е.А., Ал – Твежри Б.А., Хусейн А. Ф., Асаад Х. Х* // Радиотехника : Всеукр. межвед. научн. -техн. сб. – 2011. – №. 165. – С. 46-55. 17. *Petley, B.W.* Time and frequency in fundamental metrology / *B.W. Petley* // *PIEEE*. – 1991. – Vol. 79, No. 1. – P. 1070–1076. 18. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition.* – ISO, Switzerland, 1993. 19. *PMГ 91-2009.* ГСИ. Совместное использование понятий "погрешность измерения" и "неопределенность измерения". Общие принципы. 20. *Lewandowski, W., Matsakis, D., Panfilo, G., Tavella, P.* The evaluation of uncertainties in [UTC – UTC(k)], *Metrologia* 43 (2006). pp 278-286. 21. *Коваль, Ю.А.* Оценивание неопределенности измерений при сличениях эталонов времени и частоты радиотехническими методами / *Коваль Ю.А., Костыря А.А., Приймак В.Ю.* // Системи обробки інформації. – Харків : ХУПС, 2012. – Вып. 21 (99). С. 30–33. 22. *Пат. 54198* Україна, А, 7 G04 G 7/02. Спосіб звірення просторо-рознесених еталонів часу і частоти / *Коваль, Ю. О., Бавикіна, В. В., Антипов, І. Є., Нестеренко, Г.В.* Опубл. 17.02.2003. Бюл. № 2.

23. *Иванова, Е.А.* Моделирование систем частотно-временной синхронизации, использующих сигналы общих источников / *Коваль Ю.А, Иванова Е.А., Костыря А.А., Ал – Твержи Б.А.* // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2011. – №. 2. С. 12-21.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 25.04.2012