



ВЫСОКОТОЧНЫЕ РАДИОМЕТЕОРНЫЕ СИСТЕМЫ СРАВНЕНИЯ ЭТАЛОНОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

КАЩЕЕВ Б.Л., КОВАЛЬ Ю.А., КУНДЮКОВ С.Г.

Рассмотрены современное состояние радиометеорного метода сравнения эталонов времени и частоты, а также новые результаты исследований, полученные в ХТУРЭ в этом направлении. Описаны основные технические решения разработанных и внедренных аппаратурных комплексов. Намечены перспективы использования радиометеорного метода сравнения эталонов времени и частоты в Украине.

1. Задача сравнения эталонов времени и частоты

Синхронность или привязка территориально разнесенных эталонов времени и частоты – основа для реализации современных частотно-временных методов, позволяющих решать актуальные научно-технические и оборонные задачи в системах координатно-временного обеспечения, метрологии времени и частоты, радиоастрономии, радиолокации, цифровой синхронной связи. Успешное решение таких задач определяется как стабильностью эталонов времени и частоты, так и точностью их сравнения. Высокие темпы совершенствования эталонов (относительная нестабильность современных эталонов составляет 10^{-13} – 10^{-14} , а в перспективе – 10^{-15} – 10^{-16}) определяют актуальность задачи повышения точности методов сравнения.

Основные методы сравнения реализуются в виде многопозиционных радиотехнических систем. По функциональному назначению, составу и принципам работы им присущи черты информационных, локационных и измерительных систем.

Идеальную шкалу времени аналитически можно записать с применением дельта-функций:

$$H(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t+nT), \quad (1)$$

где T – единичный интервал шкалы, размерность $H(t)$ – c^{-1} .

Начало отсчета времени для шкал территориально разнесенных эталонов, размещенных в одной инерциальной системе, выбирается произвольным, как единым для системы, так и индивидуальным для каждой из шкал. В последнем случае каждая из шкал описывается выражением, аналогичным (1). При выборе единого начала отсчета времени вводится сдвиг шкал времени ΔT , как алгебраическая величина, характеризующая взаимное опережение или запаздывание шкал. Например, на рис. 1 изображены три шкалы времени, у которых единое начало отсчета времени принято

совпадающим с началом отсчета шкалы эталона А. При этом выражения для шкал примут вид:

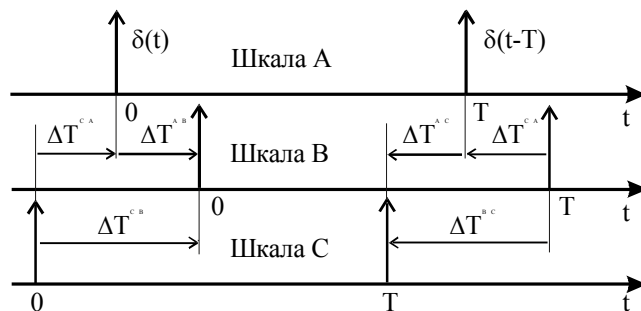


Рис. 1. Шкалы времени эталонов А, В, С

$$H_A(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t+nT); H_B(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t+nT+\Delta T^{BA}),$$

$$H_C(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t+nT+\Delta T^{CA}), \quad (2)$$

где $\Delta T^{CA} > 0$; $\Delta T^{BA} < 0$ – сдвиги шкал эталонов С и В относительно эталона А. Соответственно можно ввести следующие сдвиги шкал $\Delta T^{AB} = -\Delta T^{BA}$, $\Delta T^{AC} = -\Delta T^{CA}$, $\Delta T^{CB} = -\Delta T^{BC}$.

Для вычисления сдвига шкал в случае $|\Delta T| < T/2$ можно предложить соотношение:

$$\Delta T^{AB} = \int_{-T/2}^{T/2} \int_{-T/2}^{T/2} (H_A(t) - H_B(t)) dt dx, \quad (3)$$

где $H_A(t)$ и $H_B(t)$ приведены в выражениях (2).

Интегрирование в формуле (3) выполняется по временной шкале, для которой определяется сдвиг (в данном случае по времени шкалы пунктов А или В). Для определения сдвига шкал в n -м периоде необходимо на nT изменить пределы интегрирования в выражении (3).

Результаты измерений сдвигов шкал эталонов системы можно представить квадратной матрицей ΔT . По главной диагонали матрицы расположены результаты диагностики соответствующего пункта (в идеальном случае они равны нулю), а симметрично относительно главной диагонали – измеренные значения взаимных сдвигов шкал пунктов (теоретически должны отличаться лишь знаком).

Разлагая функции (1) и (2), описывающие шкалы времени, в ряд Фурье, можно показать связь шкал времени с эталонными частотами и дать фазовую трактовку сдвигов шкал:

$$H_A(t) = 1/T \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp(j\theta_k^A),$$

$$H_B(t) = 1/T \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp[j(\theta_k^A + \Psi_k^{BA})], \quad (4)$$

$$H_C(t) = 1/T \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp[j(\theta_k^A + \Psi_k^{CA})],$$

где $\theta_k^A = k\Omega t$ – полная фаза k -й гармоники спектра шкалы А; $\Omega = 2\pi/T$ – угловая частота первой гармо-

ники $\Psi_k^{BA} = k\Omega\Delta T^{BA}$; $\Psi_k^{CA} = k\Omega\Delta T^{CA}$ – начальные фазы k-х гармоник спектров шкал В и С соответственно.

Согласно с выражением (4) получаются фазовые определения сдвигов шкал:

$$\Delta T^{BA} = (\theta_k^B - \theta_k^A) / k\Omega; \Delta T^{CA} = (\theta_k^C - \theta_k^A) / k\Omega, \quad (5)$$

где $\theta_k^B = k\Omega t + k\Omega\Delta T^{BA}$, $\theta_k^C = k\Omega t + k\Omega\Delta T^{CA}$ – полные фазы k-х гармоник спектра шкал В и С соответственно.

Соотношения (5) справедливы и для случая различных частот эталонов. При этом сдвиг шкал ΔT является функцией времени. Анализ $\Delta T(t)$ позволяет оценить отличие частот эталонных генераторов. Так, если частота эталона В отличается от частоты эталона А на величину $\Delta\Omega \ll \Omega$, то сдвиг шкал в n-м периоде составит $\Delta T_n^{BA} = (k\Omega nT + k\Omega\Delta T^{BA}) / k\Omega = \Delta\Omega nT / \Omega + \Delta T_0^{BA}$, где ΔT_0^{BA} – начальный сдвиг шкал.

В рассмотренном случае $\Delta\Omega = \Omega (\Delta T_n^{BA} - \Delta T_0^{BA})$, а в общем случае $\Delta\Omega = \Omega d[\Delta T(t)] / dt$, где $\Delta T(t)$ – линейная аппроксимация дискретных значений T_n . Таким образом, сравнение шкал времени позволяет производить и сравнение (или синхронизацию) частот эталонов.

Первые методы сравнения были предложены А.Эйнштейном в период развития релятивистской теории (задача синхронизации часов). В одном из этих методов в синхронизируемых пунктах принимаются радиосигналы от общего равноудаленного излучателя, в другом – сигнал часов одного из пунктов принимается во втором пункте и ретранслируется обратно (по современной терминологии это дуплексный или ретрансляционный метод). В работах по частной теории относительности упоминается и вариант использования перевозимых часов.

К настоящему времени арсенал методов сравнения и варианты их технической реализации существенно расширились. В основе всех методов сравнения лежит передача информации о шкалах времени. В зависимости от алгоритмов передачи информации методы сравнения можно разделить на три группы.

К первой относятся методы односторонней передачи информации из одного пункта (А) в другой (В). Сдвиг ΔT можно определить, если известно время задержки сигналов между пунктами. Примеры реализации методов первой группы – перевозимые квантовые часы (ПКЧ); СДВ, ДВ и спутниковые навигационные системы; система, использующая отражение сигналов от Луны; телевизионное сравнение; односторонний радиометeorный канал; кабельные, лазерные и волоконно-оптические линии. Поскольку в этих методах (кроме ПКЧ) излучаются сигналы только из одного пункта, методы первой группы принято называть пассивными.

Вторая группа методов основана на двусторонней передаче информации. При этом время задержки сигналов между пунктами может быть неизвестным, требуется только его высокая стабильность и обратимость. Методы второй группы принято

называть активными. Они реализуются в радиометeorном, спутниковых и оптических каналах связи.

В третьей группе используется дополнительная высокостабильная шкала, сигналы которой принимаются в сверяемых пунктах. Сдвиг определяется с учетом известной разности задержек сигналов между пунктом дополнительной шкалы и сравниваемыми пунктами. Методы этой группы реализованы в спутниковых радионавигационных системах (СРНС) Глонасс и GPS (Навстар) в дифференциальном режиме, а также в радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами (РСДБ). В СРНС дополнительная шкала формируется эталоном на борту спутника. В РСДБ роль дополнительной шкалы играют высокостабильные сигналы космических источников (пульсары, квазары).

Основным критерием качества систем сравнения является погрешность измерения сдвига шкал. Погрешности измерений сдвигов шкал эталонов системы, подобно результатам измерений, можно представить в матричной форме. Сопоставление систем сравнения по точности возможно только при идентичных методиках расчета погрешностей (интервалы накопления результатов измерений, алгоритмы статистической обработки).

Общими для всех методов сравнения, за исключением ПКЧ, источниками погрешностей являются: нестабильность и невязанность (для активных методов) задержки сигналов в канале; нестабильности аппаратных задержек; внутренние шумы и помехи канала связи; динамика измеряемой величины из-за нестабильности эталонов. Каждый из методов имеет и специфические источники погрешностей, обусловленные особенностями канала, алгоритмами сравнения, аппаратной реализацией, релятивистскими эффектами.

Опуская подробный сопоставительный анализ методов сравнения (рис.2, где имеют место сокращения: 1 – звуковое радиовещание; 2 – ДВ радиостанции; 3 – ИСЗ (низкоорбитальные); 4 – радионавигационные системы ДВ (“Чайка”, “Лоран-С”); 5 – ТВ; 6 – ПКЧ (НР-50601А, Ч1-76, 17н646); 7 – среднеорбитальные спутниковые навигационные системы ГЛОНАСС и GPS (7.1 – штатный режим, 7.2 – дифференциальный режим); 8 – радиометeorный метод (МЕТКА, КАМА, 17н91, 17н830) и связные ИСЗ; 9 – лазерные и волоконно-оптические линии), можно выделить три метода, обеспечивающие в настоящее время высшую точность и широко применяемые для решения научно-технических задач: ПКЧ, радиометeorный метод сравнения (РМС) и СРНС. Перспективным методом является РСДБ, поскольку он имеет не только высокую потенциальную точность, но в будущем может стать основой нового типа эталонов времени относительно нестабильность сигналов квазаров и пульсаров не хуже 10^{-14} с.

2. Основы радиометeorного метода сравнения шкал времени и обобщенная модель метода

В основе РМС лежат высокая стабильность (оцениваемая скоростью изменения задержки – V) и обратимость задержки сигналов при распространении радиоволн метрового диапазона на дальность до 2000 км из-за рассеяния от ионизированных метеорных следов на высоте 80–105 км от

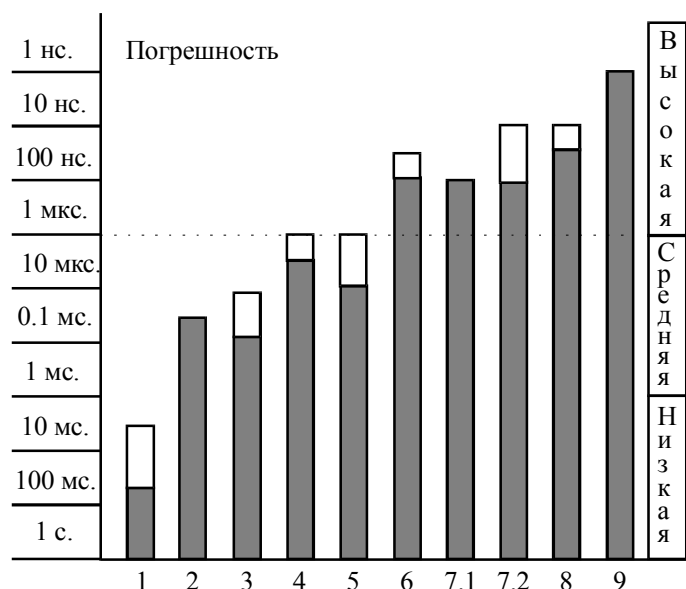


Рис. 2. Современное средство и системы сличения шкал времени

Земли. РМС, наряду с методами, использующими ПКЧ и СРНС (GPS, ГЛОНАСС), в настоящее время обеспечивает погрешности сравнения порядка десятков наносекунд. При этом РМС превосходит указанные методы по таким показателям, как производительность измерений, автономность, оперативность, экономичность, скрытность, устойчивость к ионосферным возмущениям.

Работы по РМС были начаты в Харькове вскоре после первых публикаций на эту тему [1] и уже в начале 70-х годов разработаны первые экспериментальные образцы аппаратуры (Метка-1) для службы времени Госстандарта [2] и МО. При этом были получены погрешности сравнения 0,2...0,3 мкс [2]. Позднее к данному направлению подключился Казанский университет [3]. Головными организациями, представляющими интересы потребителей, явились: от Госстандарта – ВНИИФТРИ; от МО – ЛНИРТИ.

В дальнейшем работы проводились в направлениях: теоретические и экспериментальные исследования возможностей повышения точности РМС (исследования точностных характеристик метеорного радиоканала, анализ и синтез алгоритмов сравнения, поиск путей снижения сигнальных и аппаратурных погрешностей, совершенствование методик обработки результатов измерений) [4-7]; разработка, изготовление и внедрение образцов аппаратуры для сравнения эталонов времени и частоты Госстандарта [8-10]; разработка, изготовление и испытания макетов аппаратуры в рамках ОКР, проводимых в ЛНИРТИ (ныне РИРВ) [11].

Основными источниками и причинами возникновения погрешностей МС являются (рис. 3.): 1) амплитудно- и фазо-временные характеристики метеорного канала сравнения (МКС), а также

некоторая нестабильность и невзаимность задержки сигналов при метеорном распространении радиоволн (МРРВ); 2) тракты аппаратуры, имеющие нестабильности задержки сигналов и отличные от идеальных характеристики; 3) конечное отношение сигнал/помеха; 4) нестабильности сигналов эталонов и устройств привязки к этим сигналам; 5) непостоянство измеряемой величины из-за взаимного хода шкал сверяемых эталонов; 6) алгоритмы обмена измерительной информацией между пунктами, определяющие потенциальные погрешности методов (если реализация метода нуждается в отдельном канале связи, то ошибки при передаче информации – источник погрешностей РМС); 7) алгоритмы обработки результатов измерений.

Классификацию погрешностей РМС можно произвести по двум признакам – исходя из одностипных по характеру источников и по интервалам корреляции (см. рис. 3.).

По характеру источников можно выделить погрешности: сигнальные, которые еще называют помеховыми (по причине появления) или потенциальными (из-за их неизбежности); трассовые, зависящие от характеристик МРРВ; аппаратурные; динамические, вызванные непостоянством

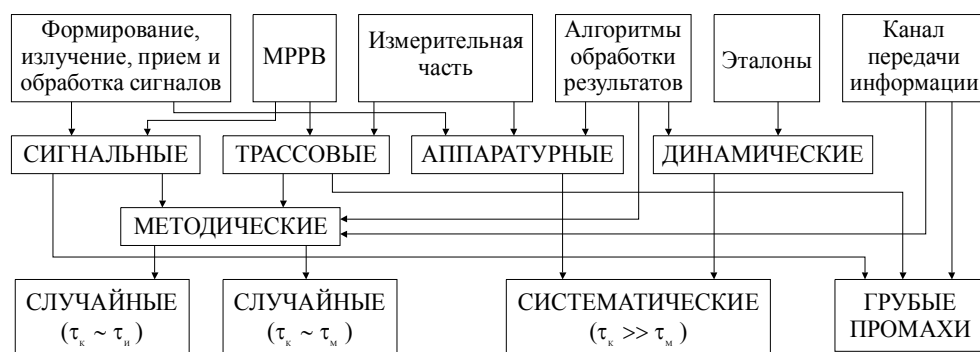


Рис. 3. Классификация погрешностей РМС

измеряемой величины; методические. Особо в этом перечне следует отметить методические погрешности, которые зависят не только от вида метода, но и от большинства иных источников погрешностей (см. рис. 3.).

К основным методам сравнения принято относить встречный метод (ВМ), ретрансляционный и опорно-ретрансляционный методы (РМ и ОРМ). В первых образцах радиометеорной аппаратуры сравнения [2] применялся РМ; в одной из первых публикаций по РМС [1] описан ВМ, сущность которого иллюстрирует рис. 4. Более совершенным оказался ОРМ [12], временная диаграмма которого приведена на рис. 5. ОРМ запатентован

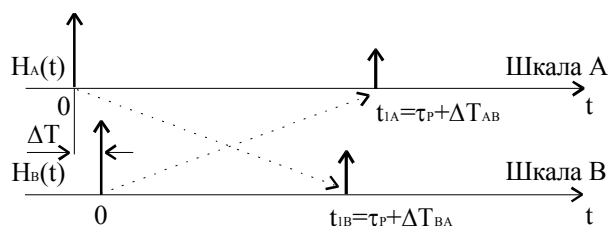


Рис. 4. Встречный метод сличения

и в США, причем материалы этого патента представлены после опубликования [12].

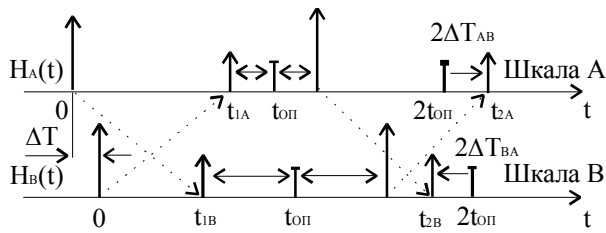


Рис. 5. Метод опорной ретрансляции (n=1)

По интервалам корреляции погрешности РМС можно разделить на три группы. В первой группе интервал корреляции соизмерим с длительностью используемых сигналов; во второй – со временем существования метеорных следов; в третьей – превышает время ожидания метеорных связей.

Погрешности первой и второй групп являются случайными, учитывая их неизбежность и неустранимость. Погрешности третьей группы можно отнести к систематическим, разделив на безусловно систематические (постоянная величина и закономерно изменяющиеся функции времени) и условно систематические (медленно меняющиеся случайные функции). Грубые погрешности (промахи) в РМС возникают из-за аномальных измерений при малых отношениях сигнал/помеха, многолучевости при МРРВ и ошибок в канале связи.

Перечисленные источники погрешностей положены в основу обобщенной модели (ОМ) РМС. В ОМ РМС (рис. 6.) включены: методы (алгоритмы) сравнения; сличаемые эталоны с их параметрами; модель МКС; модель сигналов и помех;

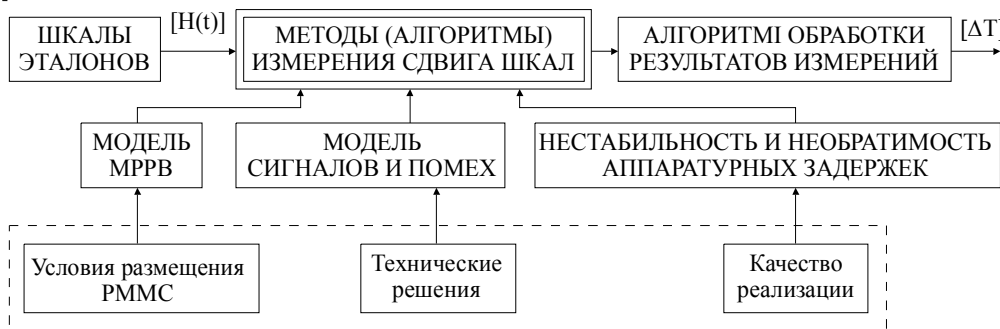


Рис. 6. Структура обобщенной модели РМС

характеристики нестабильности и невязанности аппаратных задержек; алгоритмы обработки результатов измерений. В ОМ РМС не включены такие факторы, как условия размещения аппаратуры в пунктах, выбор основных технических решений, качество реализации аппаратуры (показаны на рис. 6. пунктиром). Эти факторы целесообразно учитывать по экспериментальным результатам.

Величина единичного измерения (наблюдения) ΔT в соответствии с ОМ РМС может быть получена в результате решения системы уравнений, записанной в матричном виде:

$$[t_H] = [\Delta T] + [\tau_P] + [\tau_{C/П}] + [\tau_{АП}], \quad (6)$$

где $[t_H]$; $[\Delta T]$; $[\tau_P]$; $[\tau_{C/П}]$; $[\tau_{АП}]$ – матрицы измеряемых интервалов времени, истинного сдвига шкал, задержек сигналов в РМКС, помеховых погрешностей, аппаратных задержек соответственно.

Состав матриц уравнения (6) для основных методов (ВМ, РМ, ОРМ) приведен в табл. 1, где приняты следующие обозначения: t_1^A ; t_1^B ; t_2^A ; t_2^B – измеренное время задержки принимаемых транс-

Таблица 1

Матрицы	Методы	
	ВМ	РМ ($n \leq -1$; $t_{оп} = 0$) ОРМ ($n > -1$; $t_{оп} \neq 0$)
$[\tau_{и}]$	$\begin{bmatrix} t_1^A \\ t_1^B \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} t_2^A \\ t_2^B \end{bmatrix}$
$[\Delta T]$	$\begin{bmatrix} \Delta T^{AB} \\ -\Delta T^{AB} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta T^{AB} \\ (n+1) \cdot (T_{оп} + \Delta T^{AB}) \end{bmatrix}$
$[\tau_P]$	$\begin{bmatrix} \tau_P + \Delta_{B3} + \Delta_{PB} \\ \tau_P \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \tau_P + \Delta_{B3} + \Delta_{PB} \\ (1-n)\tau_P + \Delta_{B3} + \Delta_{PL} + V_\tau \tau_{12} \end{bmatrix}$
$[\tau_{АП}]$	$\begin{bmatrix} \tau_{ПРД}^B + \tau_{ПРМ}^A \\ \tau_{ПРД}^A + \tau_{ПРМ}^B \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \tau_{ПРД}^B + \tau_{ПРМ}^A \\ \tau_{ПРД}^B + \tau_{ПРМ}^A - n(\tau_{ПРД}^A + \tau_{ПРМ}^B) \end{bmatrix}$
$[\Delta_{СП}]$	$\begin{bmatrix} \Delta_1^A \\ \Delta_1^B \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta_1^A \\ \Delta_2^A - n \cdot \Delta_1^B \end{bmatrix}$

лированного (индекс 1) и ретранслированного (индекс 2) сигналов в пунктах А и В; 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; τ_P – обратимая часть времени задержки сигналов между пунктами при МРРВ; Δ_{B3} ; Δ_{PL} – параметры, характеризующие невязанность задержки сигналов из-за

физических особенностей МРРВ и релятивистских эффектов соответственно;

$(\Delta_{B3} + \Delta_{PL} = \tau_P^{BA} - \tau_P^{AB})$; $V_\tau = d\tau_P/dt$ – скорость изменения задержки сигналов в течение метеорного радиозоха (характеризует нестабильность задержки сигналов при МРРВ); τ_{12} – временной интервал между циклами трансляции и ретрансляции сигналов (для РМ и ОРМ); Δ_1^A ; Δ_1^B ; Δ_2^A ; Δ_2^B – случайные абсолютные погрешности при измерениях временных положений сигналов для циклов трансляции и ретрансляции в пунктах А и В; n – коэффициент ретрансляции (для ОРМ и РМ); $t_{оп}$ – время задержки опорного импульса (для ОРМ).

Решение уравнений (6) позволяет определить абсолютную суммарную погрешность единичного измерения в виде

$$\Delta_S = \Delta \bar{T} - \Delta T = \Delta_{ПРВ} + \Delta_{C/П} + \Delta_{АП} + \Delta_{PL}, \quad (7)$$

где $\Delta_{PPB} = \Delta_{B3} + \Delta_{CT}$ – погрешности МРРВ; D_{B3} , D_{CT} – погрешности невязимности и нестабильности задержки сигналов при МРРВ соответственно; $\Delta_{C/П}$ – помеховые погрешности; $\Delta_{АП}$ – аппаратные погрешности.

Значения $\Delta \bar{P}$, а также слагаемые погрешности для основных методов сравнения приведены в табл. 2. Учитывая разнородный характер слагае-

Таблица 2

Результат измерения; абсолютные погрешности	Методы сличения	
	ВМ	РМ ($n \leq -1$; $t_{оп} = 0$) ОРМ ($n > -1$; $t_{оп} \neq 0$)
Результат измерения – $\Delta \bar{P}^A$	$\frac{t_1^A - t_1^B}{2}$	$\frac{t_1^A(n-1) + t_2^A - t_{оп}(n+1)}{2n}$, $(0.5t_2^A - t_{оп})$ – для $n = 1$
Погрешности МРРВ – Δ_{PPB}^A	Δ_{B3}	$\frac{\Delta_{B3} + \Delta_{PД}}{2}$
	Δ_{CT}	$\frac{V_{\tau} \tau_{12}}{2n}; \pm \frac{V_{\tau} \tau_{12}}{n}$ – для $n = \pm 1$
Помеховые погрешности – $\Delta_{СП}^A$	$\frac{\Delta_1^A - \Delta_1^B}{2}$	$\frac{\Delta_2^A - n\Delta_1^B + \Delta_1^A(n-1)}{2n}$, $\frac{\Delta_2^A - \Delta_1^B}{2}$ – для $n = 1$
Аппаратурные – $\Delta_{АП}^A$	$\frac{(\tau_{ПРМ}^A - \tau_{ПРД}^A) - (\tau_{ПРМ}^B - \tau_{ПРД}^B)}{2}$	

мых погрешностей уравнения (7) и различия в интервалах корреляции, в ОМ РМС включены алгоритмы обработки результатов измерений.

Предложенная ОМ РМС позволяет решать основные задачи анализа и синтеза радиометеорных систем сравнения (РМС) эталонов времени и частоты.

3. Результаты теоретических исследований РМС

При исследовании метеорного радиоканала основное внимание было обращено на параметры, определяющие потенциал РМС: полоса пропускания; нестабильность и невязимность задержки сигналов. Экспериментальные исследования метеорного канала показали, что сигналы практически не искажаются, если их ширина спектра не превышает (10...15) % от несущей частоты. Для оценки V использовались результаты измерений задержки сигналов по фазе несущих частот и по фазе разностной частоты с использованием разработанного комплекса ФАЗА, параметры которого приведены в табл. 3. Выборочные средние значения для $|Vt|$ составили: в локационном режиме – $(2,5-3) \cdot 10^{-7}$; на трассе – $(0,5-1) \cdot 10^{-7}$. Максимальные значения – $(1-2) \cdot 10^{-6}$ и $(5-7) \cdot 10^{-7}$ соответственно. Закон распределения $|Vt_i|$ близок к экспоненциальному. В 5-10% случаев имели место существенные отличия V для различных частот и комплексов, что можно объяснить необратимостью задержки сигналов на метеорных следах.

Результаты экспериментального исследования кратковременной фазовой нестабильности задер-

жки сигналов в метеорном радиоканале позволили обосновать выбор фазового принципа построения

Таблица 3

Характеристики	МЕТКА-5, 6, 6М, 7	"Фаза"	Метка-11
Метод сравнения	ОРМ (n=1) СРМ	ОРМ (n=1) +ВМ	ВМ
Вид сигнала	Код (16 импульсов)	ФМ импульсы + ДЧС	ФМ импульсы + ДЧС
$\tau_{и}$, мкс	2	26 - ФМ, 500 - ДЧС	13*10 - ФМ 256*5 - ДЧС
$2\Delta f_{п}$, МГц	1	1	0.25
Импульсная мощность, $P_{и}$, кВт	20 - 40	10	2 - 5
Погрешность, нс	15 - 30	50 - 100 ФМ, 10 - ДЧС, 1 - ф	10 - ДЧС, 1 - ф
Использование	Службы времени Украины и России	Прототип промышленной аппаратуры 17-Н-830	Госстандарт, пункты НАКУ КА, радиоинтерферометры

второго поколения промышленной радиометеорной аппаратуры [11] и основных технических решений образца аппаратуры МЕТКА-11.

Анализ теоретических и экспериментальных исследований источников невязимности задержки канала (поляризационные явления при распространении в ионосфере и отражении от метеорного следа, а также релятивистские эффекты) показал, что измерения с использованием современной метеорной аппаратуры сравнения пока не позволяют подтвердить модельные оценки невязимности. При этом можно согласиться с верхней теоретической оценкой (менее 1 нс).

Результаты исследования метеорного радиоканала были положены в основу линейной параметрической модели канала сравнения. Линейная параметрическая модель метеорного канала сравнения (ЛПМ МКС) состоит из каскадного соединения линейного четырехполюсника с постоянными параметрами, идеальной линии с управляемой величиной задержки, идеального амплитудного модулятора и генераторов модулирующих функций (рис. 7). Представление метеорного канала сравнения линейной параметрической системой не противоречит физической теории метеоров, современным моделям МРРВ и одновременно позволяет использовать основные положения теории измерения параметров сигналов в рамках ОМ РМС.

Анализ прохождения сигналов в ЛПМ МКС показывает, что для периодических импульсных сигналов, временные параметры которых удовлетворяют неравенству $\tau_{и} < \bar{\tau}_p < T < \bar{\tau}_m$ ($\tau_{и}$ – длительность импульса; $\bar{\tau}_p$ – среднее время задержки сигналов между пунктами; T – период повторения импульсов; $\bar{\tau}_m$ – средняя продолжительность метеорных связей), искажения формы импульса определяются только линейным четырехполюсни-

ком модели, а высота и задержка импульса зависят от его временного положения в пределах длительности

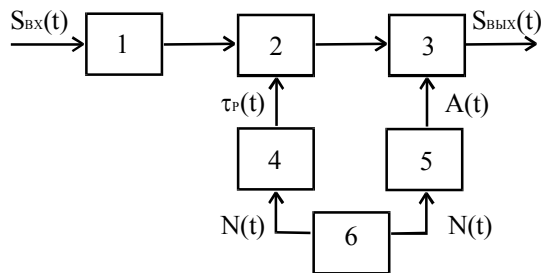


Рис. 7. Структурная схема линейной параметрической модели радиометеорного канала сличения:

1-линейный четырехполюсник; 2-идеальный фазовый модулятор (линия задержки); 3-идеальный амплитудный модулятор; 4-генератор модулирующей функции $\tau_p(t)$; 5-генератор модулирующей функции $A(t)$; 6-генератор функции "численности" - $N(t)$

ности метеорного следа. При этом выходной сигнал имеет вид суммы пачек идентичных по форме импульсов. Огибающая пачек определяется амплитудно-временной характеристикой следа $A(t)$. Длительность i -й пачки зависит от вида (насыщенный или ненасыщенный) и параметров i -го метеорного следа. Следовательно, основной вклад МРРВ в погрешность сличения связан с вариациями амплитуд импульсов и изменениями задержек на интервалах, соизмеримых с периодом повторения и более.

Проведен комплексный анализ основных методов сравнения (ВМ, РМ и ОРМ) с учетом влияния конечного отношения сигнал/помеха, нестабильности задержки сигналов в канале и корреляции погрешностей в пунктах. Показаны преимущества ВМ и выполнен синтез более совершенных комбинированных и модифицированных методов - совместного ретрансляционного метода (СРМ), ВМ с обменом результатами измерений по метеорному каналу "ВМ + ОРМ".

Для выбора вида и параметров сигналов для РМС решены теоретические задачи: анализ пороговых отношений сигнал/помеха; оценка потенциальных точностных характеристик основных типов простых и сложных сигналов; анализ влияния коррелированных помех. Анализ показал преимущества сложных сигналов и позволил наметить основные направления уменьшения сигнальных погрешностей: увеличение базы сигналов; усреднение результатов измерений по всем импульсам кода; переход к фазовым измерениям.

Анализ потенциальной точности для фазовых измерений проводился применительно к универсальному случаю когерентного дискретного составного частотного сигнала (КДСЧС), частным случаем которого является двухчастотный сигнал (ДЧС). Получены соотношения для потенциальной точности КДСЧС. Показано, что потенциальную точность КДСЧС можно реализовать при оптимальной обработке и измерениях временного положения каждого из элементов по огибающим и фазам с последующим весовым усреднением ре-

зультатов этих измерений. Предложено техническое решение, реализующее такую обработку [13].

В настоящее время наибольший удельный вес в результирующей погрешности измерения сдвига шкал в РМС имеют аппаратные систематические погрешности (АСП).

АСП возникают вследствие нестабильности задержек в трактах формирования, излучения, приема и измерения времени прихода сигналов, а также невзаимности задержек в общих устройствах приема и передачи. Они не зависят от методов (алгоритмов) сравнения и составляют для результатов измерения сдвига шкал в пунктах:

$$\Delta_{АП}^{AB} = -\Delta_{АП}^{BA} = \frac{(\tau_{ПРМ}^A - \tau_{ПРД}^A) - (\tau_{ПРМ}^B - \tau_{ПРД}^B)}{2} = \Delta_{АП}^A - \Delta_{АП}^B, \quad (7)$$

где $\tau_{ПРМ}^A, \tau_{ПРМ}^B$ - задержки в приеме-измерительных каналах РМСС (АФУ и антенные коммутаторы в режиме приема, приемные устройства, измерители временного положения сигналов); $\tau_{ПРД}^A,$

$\tau_{ПРД}^B$ - задержки в трактах формирования и излучения сигналов РМСС (устройства привязки к сигналам эталонов, формирователи сигналов, передающие устройства, антенные коммутаторы и

АФУ в режиме излучения); $\Delta_{АП}^A = (\tau_{ПРМ}^A - \tau_{ПРД}^A)/2$,

$\Delta_{АП}^B = (\tau_{ПРМ}^B - \tau_{ПРД}^B)/2$ - составляющие результирующих АСП, определяемые аппаратными задержками в пунктах.

Из выражения (7) следует, что АСП становятся равными нулю, если комплекты аппаратуры в пунктах имеют идентичные параметры. Однако это невозможно обеспечить по причинам: 1) изменение питающих напряжений и температуры, старение и замена элементов приводят к нестабильностям задержек сигналов в трактах аппаратуры; 2) общие устройства приема и передачи (АФУ и антенные коммутаторы) обладают невзаимными задержками сигналов; 3) вариация амплитуд принимаемых сигналов приводит к нелинейным искажениям и связанным с этим изменениям задержек.

На первом этапе развития РМС основное внимание уделялось первой из приведенных причин АСП. Для снижения АСП, вызванных нестабильностями задержек сигналов в трактах аппаратуры, предложены способы и устройства для контроля задержек сигналов в трактах (так называемое пилотирование задержек), а также способ компенсации АСП, получивший название "сквозной канал". Известные способы пилотирования задержек и метод "сквозного канала" не позволяют контролировать и учитывать второй и третий источники АСП (невзаимности задержек сигналов в общих устройствах и изменения задержек сигналов при вариации амплитуд принимаемых сигналов). Более того, эти источники АСП экспериментально были обнаружены и исследованы сравнительно недавно [11].

В активных системах сравнения для исключения погрешностей, вызванных различными угловыми координатами траекторий прохождения сигналов между пунктами, используются общие АФУ

для излучения и приема. При этом, на основании известного свойства обратимости антенн, задержки сигналов в АФУ при излучении и приеме полагаются одинаковыми, а следовательно, согласно выражению (7) – не влияющими на АСП.

Невзаимность задержек АФУ РМСС была впервые обнаружена в Харькове в 1991 г. при “локации друг на друга” двух полуккомплектов аппаратуры МЕТКА-8. Изменение длин кабеля, смена АФУ и замена элементов в коммутаторе приводили к АСП до 20–30 нс.

Физически невзаимность задержек в АФУ можно объяснить изменениями формы сигнала из-за отличий в режимах согласования кабеля при приеме (антенна → кабель → коммутатор → входное сопротивление приемника) и при излучении (передатчик → коммутатор → кабель → антенна). Поскольку идеальное согласование АФУ, что явилось бы наиболее простым решением этой задачи, невозможно, были продолжены экспериментальные исследования, а также проведен теоретический анализ искажений формы сигнала при рассогласованиях в АФУ и связанных с этим аномалий в задержках [10].

Отдельные результаты моделирования удалось подтвердить экспериментально. Для реальных длин кабеля и качества согласования АФУ РМСС аномальные задержки могут достигать единиц процентов от длительности импульсов, что составляет десятки наносекунд. Это может приводить к такого же порядка АСП. В наибольшей степени аномальные задержки проявляются в цепи передатчик → кабель → антенна, поскольку для достижения приемлемого КПД выходное сопротивление передатчика $Z_i \gg Z_B$, а сопротивление антенны в полосе частот сигнала отличается от волнового не менее чем в 1,1–1,2 раза.

Для учета аномальных задержек в АФУ предложены и реализованы схемы пилотирования с использованием дополнительной измерительной антенны (ИА). Экспериментальные исследования схемы пилотирования с ИА, проведенные в режиме “локации друг на друга” двух полуккомплектов аппаратуры МЕТКА-8 (полевая лаборатория ХИРЭ) и МЕТКА-6М – МЕТКА-5 (НПО “Метрология”), показали влияние на результаты пилотирования места размещения и высоты ИА. В случае с комплексами МЕТКА-6М – МЕТКА-5, высота подъема основных антенн которых составляла 2–2,5 м, пилотирование с ИА, размещенной на расстоянии 15–20 м от основных антенн, и оценка АСП по локационному режиму дали совпадающие результаты. У полуккомплектов аппаратуры МЕТКА-8 антенны имели высоту 7–8 м. При перемещении ИА (на расстояние до 40 м) и изменении ее высоты отличия результатов пилотирования и локационных измерений составляли +10 нс.

Таким образом, для повышения точности пилотирования АСП с применением ИА необходимо ее размещать на расстояниях, превышающих размеры нескольких зон Френеля.

Возможность измерять полную величину АСП аппаратуры в каждом из пунктов для сигналов с симметричной формой обеспечивает запатентованный способ зеркальной ретрансляции сигналов (ЗРС) [17]. При подключении аппаратуры и циф-

рового радиоимитатора (ЦРИ), осуществляющего ЗРС, к одному эталону, а также обратимости задержек ИА измеренная полуккомплексом величина t составит:

$$t_1 = (\tau_{ПРМ} - \tau_{ПРД}) + 2t_{ОП} + \Delta_{РИ}, \quad (8)$$

где $\tau_{ПРМ}$, $\tau_{ПРД}$ – соответственно полные задержки трактов приема и передачи полуккомплекта аппаратуры, включая АФУ; $t_{ОП}$ – момент времени, относительно которого ЦРИ производит ЗРС; $\Delta_{РИ}$ – АСП ЦРИ.

Из выражения (8) следует, что АСП аппаратуры

$$\Delta_{АП} = (\tau_{ПРМ} - \tau_{ПРД})/2 = t_1/2 - t_{ОП} - \Delta_{РИ}/2$$

можно определить, если известны и стабильны параметры ЦРИ – $t_{ОП}$ и $\Delta_{РИ}$.

Для оценки погрешностей в первых образцах аппаратуры использовались основные метрологические стандарты с учетом особенностей РМС. Однако не было принято единое понятие наблюдения, которое в одних случаях определялось как результат измерения в течение периода зондирования, в других – как усредненный результат измерений “на метеоре”. В алгоритмах обработки результатов не учитывалась их неравноточность и некоторые специфические особенности РМС.

В процессе разработки и испытаний в Харькове экспериментальных образцов аппаратуры предложены единые критерии оценки погрешностей и обобщенный показатель качества [6]:

$$\beta = \sigma \sqrt{P 2\Delta f_{П} B N k}, \quad (9)$$

где σ – одна из разновидностей оценки случайной погрешности; P – излучаемая импульсная мощность; $2\Delta f_{П}$ – ширина спектра сигнала; B – база сигнала; N – число импульсов в коде; k – число периодов, соответствующее одному измерению.

При подстановке в выражение (9) вместо σ энтропийной погрешности – Δ_3 либо вместо $2\Delta f_{П}$ и B соответственно – $\omega_{ЭФ}$ и $B_{ЭФ}$ получается ряд вариантов обобщенного показателя качества РМСС.

Коэффициенты качества можно дополнить такими существенными показателями, как оперативность измерений (среднее число измерений в единицу времени либо время ожидания) и стоимость, например, в виде $\beta s/c$ (s – стоимость системы, c – численность измерений).

Предельные значения коэффициента β можно определить, используя результаты информационной теории измерений, где рассматривается близкий по физическому смыслу энергетический порог чувствительности измерительных устройств. С учетом особенностей метеорного радиоканала и временных измерений $\beta_{\min} \approx 10^{-2} (\text{Джс})^{1/2}$.

Подобные коэффициенту β показатели качества можно применить для сравнения не только различных типов РМСС, но и систем, основанных на других принципах. Достоинство предложенного показателя заключается в том, что с его помощью можно для определенных классов РМСС

рассчитать диаграммы обмена энергии и (или) полюсы частот на погрешность сличения.

Дальнейшим развитием обобщенного коэффициента (9) явилась обобщенная статистическая модель РМСС с обучением, позволяющая учесть условия размещения аппаратуры в пунктах, реальную помеховую обстановку, сезонные и суточные изменения численности, протяженность и ориентацию трассы, качество исполнения аппаратуры. В такой модели по обучающей выборке, состоящей из результатов сличений, оцениваются статистические характеристики для числа сличений "на метеорном следе", времени ожидания, погрешностей единичных измерений, а также выявляются параметры суточного (при соответствующей продолжительности обучающей выборки – сезонного) хода этих величин.

Обобщенная статистическая модель РМСС позволяет генерировать результаты сличений для измененных параметров трассы и аппаратуры (энергетика, вид и параметры сигнала, метод сравнения, техническая реализация отдельных блоков). Совершенствованию методов обработки результатов измерений посвящены работы [16, 17].

Измерение сдвига шкал эталонов в течение сеанса, продолжающегося обычно несколько часов, дает массив результатов, который можно записать в матричной форме:

$$[t_i, \Delta \vec{T}_{ij}], \quad (10)$$

где $i = 1, 2, \dots, m$ – номер метеорного следа; m – количество метеоров за сеанс; $j = 1, 2, \dots, n$ – номер измерения в пределах i -го метеорного следа; n – количество измерений на i -м метеоре; t – текущее время i -го метеорного следа. В матрице (10) отдельные значения $\Delta \vec{T}_{ij}$ отсутствуют, поскольку n у различных метеорных следов в общем случае отличаются.

Массив $\Delta \vec{T}_{ij}$ представляет собой случайную выборку из генеральной совокупности, в которой закон распределения в первом приближении можно считать нормальным, так как погрешность результата измерений представляет собой сумму большого числа независимых случайных величин. В подавляющем большинстве случаев, после амплитудной коррекции и исключения грубых промахов, гипотеза о нормальности закона распределения реальных массивов измерений подтверждается. Поэтому для таких массивов в качестве оценки результата измерений может выступать среднее значение (либо среднее взвешенное для неравноточных измерений), а в качестве погрешности – СКО – s . Причинами неравноточности результатов измерений являются: флуктуации амплитуд принимаемых сигналов как "на метеорном следе", так и при переходе от следа к следу; изменение уровня помех; кратковременная нестабильность и необратимость задержек сигналов "на метеорном следе"; случайные вариации времени задержки в аппаратуре. Количественно неравноточность подтверждается при сопоставлении s для групп единичных измерений ΔT , отличающихся амплитудами [16]. Предложены алгоритмы весовой обработ-

ки, различающиеся способами оценок весовых коэффициентов и этапами обработки [18, 19].

Если гипотеза о нормальности закона распределения не подтверждается, рекомендуется применять робастные методы обработки результатов [17].

4. Разработка радиометеорной аппаратуры и многопозиционных систем сравнения эталонов времени и частоты

К настоящему времени разработано несколько поколений радиометеорной аппаратуры сравнения шкал времени – экспериментальные образцы и специальные макеты типа МЕТКА, созданные в Харькове; макеты аппаратуры типа КАМА, разработанные в Казани (КГУ); два поколения промышленной аппаратуры 17-Н-91 и 17-Н-830, сконструированные в С.-Петербурге (РИРВ) при участии ХТУРЭ.

Основными потребителями аппаратуры являются службы времени Госстандарта СССР (ныне Госстандарта Украины и Госстандарта России) и других ведомств. Радиометеорная аппаратура сравнения используется для синхронизации пунктов Наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами (НАКУ КА) на территории Украины и решения ряда научных задач.

В службах времени Госстандартов Украины и России применяются не промышленные, а разработанные в Харькове экспериментальные образцы аппаратуры типа МЕТКА-6, отличающиеся более высокой точностью и меньшими габаритами. Основные характеристики комплексов МЕТКА-6 приведены в табл. 3. Отличительными особенностями комплексов МЕТКА-6 являются: 1) аналоговое суммирование двух соседних импульсов кода и измерение временного положения путем аппаратного усреднения по всем парам импульсов кода; 2) применение пяти кодовых комбинаций для отличия излучаемых и принимаемых сигналов; стробирование принимаемых сигналов в соответствии с кодом ожидаемых для приема сигналов; 3) высокоточный дискриминатор для оценки временного положения по нулевому переходу разности прямого и задержанного сигналов; 4) наличие специального АРУ, позволившего расширить динамический диапазон приемного устройства до 50 дБ; 5) ручное пилотирование аппаратных задержек и возможность их компенсации в пределах ± 90 нс с дискретностью 10 нс; 6) внутренний цифровой имитатор для диагностики измерительной части аппаратуры.

Метрологические характеристики аппаратуры типа МЕТКА-6 оценивались: в локационных режимах "сам на себя" и "друг на друга"; по независимым измерениям с применением ПКЧ и системы "Глонасс"; по рассеянию результатов наблюдений от среднего значения в каждом сеансе и от сеанса к сеансу на интервалах до месяца; при сравнении между собой результатов измерений в обоих пунктах. Диапазон изменений случайной погрешности и АСП, оцениваемой с помощью ПКЧ, не превышал 20 нс.

В 1993 г. разработан и внедрен в Киеве (УкрЦСМ), НАКУ КА и Харькове (ГНПО "Метрология") комплекс МЕТКА-6М, сопряженный с

ЭВМ. В модернизированный вариант аппаратуры МЕТКА-6М включена ЭВМ типа IBM PC/AT 386 для оперативной статистической обработки результатов измерений, их хранения и вывода на печать. Наиболее совершенными точностными показателями обладают образцы фазовой радиометeorной аппаратуры сравнения (ФАЗА и МЕТКА-11). Аппаратура ФАЗА была разработана и испытана в Харькове в период 1985–90 гг. в ходе выполнения ОКР совместно с РИРВ. В аппаратуре ФАЗА использованы: составной сигнал, содержащий код из 15 фазоманипулированных (ФМ) по Баркеру импульсов и когерентный ДЧС; комбинированный метод сравнения – ОРМ для ФМ сигнала и ВМ для ДЧС; формирование сигналов и гетеродинов по принципу ФАПЧ по сигналам эталона; цифровой фильтр для оптимальной обработки ФМ сигнала на промежуточной частоте; фазовые принципы измерения временного положения на разностной и несущих частотах ДЧС; измерение амплитуд принимаемых сигналов и определение периода повторения в пределах секунды; передача информации о результатах измерений по метеорному каналу с помощью относительной фазовой манипуляции несущей ФМ импульсов; автоматическое пилотирование аппаратурных задержек и их компенсации в заданных пределах.

Типичные гистограммы результатов измерений макета ФАЗА приведены на рис. 8. Погрешность

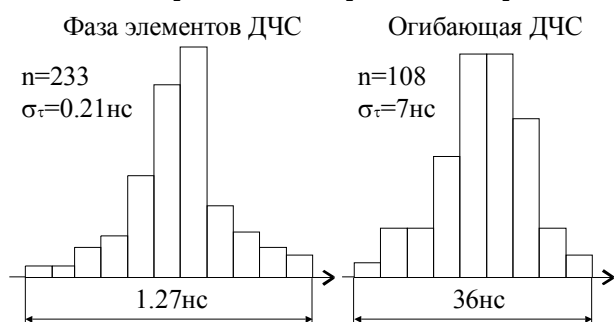


Рис. 8. Гистограммы результатов измерений

измерений по ФМ сигналу (≈ 60 нс) позволяет устранить неоднозначность фазовых измерений по огибающей ДЧС, имеющего ширину спектра 1 МГц. В свою очередь погрешность измерений по огибающей ДЧС (< 10 нс) позволяет, при соответствующем накоплении результатов измерений и стабильности современных эталонов, устранить неоднозначность фазовых измерений по несущим ДЧС. Таким образом, результирующая погрешность измерений может составить менее 1 нс.

Аппаратура ФАЗА послужила прототипом не только для промышленной аппаратуры 17-Н-830, но и последнего, разработанного в Харькове, экспериментального образца аппаратуры МЕТКА-11 (табл. 3). Основным отличием комплекса МЕТКА-11 является наличие двух режимов – сравнение шкал времени и передача информации. Отличительные особенности аппаратуры МЕТКА-11: несущая частота в диапазоне 40–50 МГц; относительно небольшая ширина спектра 0,2 МГц; применение цифровой обработки и измерения временного положения сигналов; измерение полной АСП с помощью ИА и устройства с ЗРС. Указанные особенности РМКС МЕТКА-11 позволяют

уверенно достичь погрешности измерений менее 1 нс, облегчают решение задачи электромагнитной совместимости комплекса с действующими системами метрового диапазона и расширяют возможности функционального применения аппаратуры.

В аппаратуре МЕТКА-11, как и в макете ФАЗА, для вхождения в связь и устранения неоднозначности фазовых измерений используются ФМ по коду Баркера импульсы, а для высокоточных фазовых измерений по огибающим и когерентным несущим – ДЧС. При этом по-иному реализован ДЧС – в виде бинарной по закону меандра ФМ несущей частоты.

В состав аппаратуры МЕТКА-11 включена ЭВМ IBM PC/AT-486, которая выполняет следующие функции: формирование грубой части шкалы времени с дискретностью 1 с; управление работой устройств цифрового блока; вычисление точной части значения временного положения принятого сигнала по его цифровым отсчетам; накопление и статистическая обработка результатов сравнения, приема и передачи информации; помехоустойчивое кодирование и декодирование информации; обмен информацией с оператором, включающий отображение данных на экране дисплея и ввод данных с клавиатуры. Основные технические решения аппаратуры МЕТКА-11 защищены изобретениями и патентом [13–15]. С 1985 г. действует многопозиционная радиометeorная система сравнения (МРМСС) эталонов Украины и России [9]. Структура МРМСС приведена на рис. 9. МРМСС

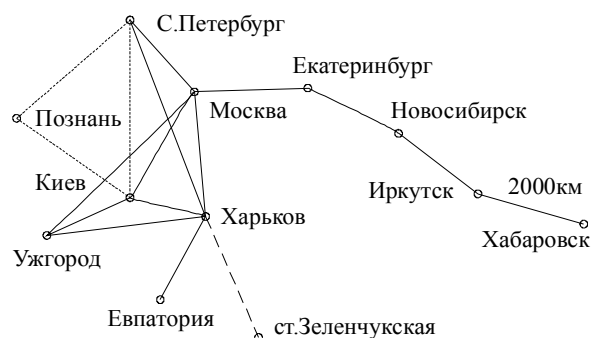


Рис. 9. Многопозиционная радиометeorная система сличения эталонов времени

оснащена разработанными в ХТУРЭ образцами аппаратуры типа Метка-6, –6М. Аттестация служб времени в 1988 г. подтвердила высокие метрологические характеристики МРМСС.

В настоящее время, в соответствии с Соглашением о сотрудничестве стран СНГ по обеспечению единого времени и частоты (Бишкек, 9.10.92 г.), проводятся регулярные сравнения на трассе Харьков – Москва. Регулярно проводятся сеансы сравнения первичного (Харьков) и вторичных (Київ, Ужгород) эталонов Украины. Проведены экспериментальные сравнения в “треугольнике” Харьков – Киев – Москва (октябрь 1993 г.) [10].

5. Перспективы РМС

Анализ современного состояния РМС показывает, что возможности метода далеко не исчерпаны. Это относится не только к точности сличения, но и к таким характеристикам, как помехозащищенность, скрытность, дополнительные функцио-

нальные возможности [7]. Наиболее перспективным направлением уменьшения случайных погрешностей РМС является применение сложных сигналов. Наивысшую точность при этом обеспечат КДСЧС, которые позволяют реализовать высокоточные фазовые методы измерений не только на разностных, но и на несущих частотах элементов. Из алгоритмов (методов) сравнения наиболее перспективен ВМ в сочетании с обменом результатами измерений между пунктами по радиометеорному каналу связи. Наиболее актуальной и сложной остается задача снижения АСП. Прогресс в этом направлении возможен при использовании разработанных алгоритмов [15].

В новых поколениях аппаратуры расширятся функции ЭВМ. Помимо обработки результатов измерений, ЭВМ позволит осуществлять диагностику и управление режимами работы аппаратуры, адаптацию к параметрам метеорного следа и помеховой обстановке, расширение функциональных возможностей аппаратуры.

Реальными являются следующие дополнительные функциональные возможности РМС: измерения разности частот и кратковременных нестабильностей эталонов частоты; измерения сдвигов шкал в пределах прямой видимости; сопряжение со связными спутниковыми системами для проведения сличений; передача информации; определение скорости ветра в метеорной зоне. Наибольший интерес представляет разработка аппаратуры для сравнения и передачи информации.

Особую актуальность имеет РМС для Украины, не располагающей собственными СРНС и предприятиями по выпуску ПКЧ. Поэтому вопросы совершенствования РМС включены в космическую программу Украины и программу создания Государственной службы единого времени и эталонов частот.

Разработка новых поколений аппаратуры может не только повысить эффективность существующей МРМСС, но и расширить структуру системы за счет ведущих метрологических центров стран СНГ и Европы.

Литература: 1. Lattorre V., Jonson G. Time synchronisation techniques // "IEE INT. Conv. Rec." - 1964. - Part 6. - P. 422-428. 2. Дудник Б.С., Кашеев Б.Л., Лейкин А.Я. Использование метеорного распространения радиоволн для привязки часов службы времени и частоты // Измерительная техника. - 1971. - №12. - С.38-42. 3. Сидоров В.В., Кардоник Г.С., Плеухов А.Н. Высокоточная синхронизация разнесенных радиотехнических систем. - Казань: Изд-во КГУ. - 1978. - 224 с. 4. Дудник Б.С., Кашеев Б.Л., Коваль Ю.А., Пушкин С.Б. и др. Снижение погрешностей сличения шкал хранителей времени с помощью метеорного распространения радиоволн // Измерительная техника. - 1981. - №7. - С.41-44. 5. Дудник Б.С., Кашеев Б.Л., Коваль Ю.А., Пушкин С.Б. и др. Высокоточное сличение шкал Государственного и вторичного эталонов времени // Измерительная техника. - 1982. - №1. - С.30-32. 6. Дудник Б.С., Коваль Ю.А., Пушкин С.Б.

Критерии оценки точностных показателей радиометеорных комплексов для синхронизации шкал времени // Измерительная техника. - 1986. - №1. - С.16-18. 7. Кашеев Б.Л., Коваль Ю.А., Дудник Б.С., Сидоров В.В. Перспективы совершенствования радиометеорного метода синхронизации эталонов времени и частоты // Измерительная техника. - 1992. - №10. - С.26-28. 8. Дудник Б.С., Кашеев Б.Л., Коваль Ю.А., Семенов С.Ф. и др. Новый комплекс аппаратуры для сличения эталонов времени и частоты по радиометеорному каналу // Измерительная техника. - 1986. - №4. - С.15-16. 9. Пушкин С.Б., Кашеев Б.Л., Коваль Ю.А., Семенов С.Ф. и др. Высокоточная радиометеорная система синхронизации эталонов времени Госстандарта СССР // Измерительная техника. - 1989. - №4. - С.22-24. 10. Кашеев Б.Л., Дудник Б.С., Коваль Ю.А. и др. Исследование радиометеорного канала сравнения на трассах Киев - Харьков - Москва // Метрология времени и пространства. Тез. 5-го Российского симпозиума. - Москва: 1994. - С.143. 11. Кашеев Б.Л., Дудник Б.С., Коваль Ю.А., Семенов С.Ф. и др. Радиометеорные комплексы синхронизации эталонов времени и частоты с погрешностями менее 10 нс // Измерительная техника. - 1992. - №12. - С.31-32. 12. А.С. 712807 СССР, МКИ G 04 C 11/02. Способ сравнения шкал времени / В.С.Дудник, Б.Л. Кашеев, В.П. Моисеев. - Опубл. 7.06.80. - Бюл. №4. - 13. А.С. 1741096 СССР, МКИ G 04 C 11/02. Устройство для сравнения эталонов времени / В.Л. Кашеев, Ю.А. Коваль, В.С. Дудник и др. Опубл. 15.06.92. - Бюл. №22. - 14. А.С. 1385118 СССР, МКИ G 04 C 11/02. Устройство для сверки шкал времени / В.Л. Кашеев, Ю.А. Коваль, Г.В. Нестеренко. - Опубл. 30.08.88. - Бюл. 12. 15. Патент Украины 20380 А, G 04 C 11/02. Способ обработки сигналов при сличении шкал времени и устройство для его реализации / В.С.Дудник, Б.Л.Кашеев, С.Г.Кундюков, Ю.А.Коваль, Г.В.Нестеренко, Б.И.Макаренко, Ю.А.Леман, С.Ф.Семенов. 16. Коваль Ю.А., Бавыкина В.В., Попович А.В. Исследование возможностей применения весовой обработки измерительной информации при радиометеорной синхронизации шкал эталонов времени // Радиотехника. Харьков: Изд-во ХГУ. - 1991. - Вып.94. - С. 38-44. 17. Бавыкина В.В., Коваль Ю.А., Попович А.В., Пугач А.А. Робастные методы обработки результатов измерения сдвига шкал времени // Методы представления и обработки случайных сигналов и полей. Тез. докл. IV Междунар. науч.-техн. конф. - Харьков: 1993. - С. 13.

Поступила в редколлегию 29.12.97

Кашеев Борис Леонидович, д-р техн. наук, профессор кафедры основ радиотехники ХТУРЭ, специалист в области радиометеорных исследований, инициатор и неизменный руководитель метеорных исследований в Харькове. Служебный адрес: 310726, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 43-17-58; Домашний адрес: 310024, Харьков, ул. Пушкинская, 74, кв. 14, тел. 43-33-11.

Коваль Юрий Александрович, д-р техн. наук, профессор кафедры основ радиотехники ХТУРЭ, специалист в области радиометеорного метода сличения шкал времени и обработки сложных сигналов. Домашний адрес: 310100, Харьков, пр. Ленина, 15, кв. 32, тел 40-95-55.

Кундюков Сергей Григорьевич, старший научный сотрудник ПНИЛ радиотехники ХТУРЭ, специалист в области радиометеорного метода сличения шкал времени и цифровой обработки сигналов. Домашний адрес: 310022, Харьков, ул. Сумская, 63, кв. 4, тел. 45-58-84.