

Б. Л. КАЩЕЕВ, д-р. техн. наук, **Б. С. ДУДНИК**, канд. техн. наук, Ю. А. КОВАЛЬ, д-р. техн. наук,  
Г. В. НЕСТЕРЕНКО, канд. техн. наук, А. А. ТКАЧУК, канд. техн. наук, С. Ф. СЕМЕНОВ,  
**Ю. А. ЛЕМАН**, Л. П. ТАТАРЕЦ, В. В. БАВЫКИНА, канд. техн. наук,  
В. П. МОИСЕЕВ, канд. техн. наук, С. Г. КУНДЮКОВ, В. М. БАЙДАК,  
Ю. В. ГАРБУЗОВ, канд. техн. наук

## РАДИОМЕТЕОРНЫЙ МЕТОД СРАВНЕНИЯ ЭТАЛОНОВ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

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

### Задача сравнения эталонов времени и частоты

Сравнение (привязка или синхронность) территориально разнесенных эталонов времени и частоты – основа для реализации современных частотно-временных методов, позволяющих решать актуальные научно-технические и оборонные задачи при создании систем 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  $10^{-13} \dots 10^{-14}$ , а в перспективе –  $10^{-15} \dots 10^{-16}$ ) определяют актуальность задачи повышения точности методов сравнения.

В развитых странах мира проблеме постоянного совершенствования научно-технической базы и организационной структуры систем единства измерений времени и частоты уделяется постоянное внимание. Ведущими странами в области измерений времени и частоты являются США, Англия, Германия, Япония. [1]. На высоком уровне поддерживались службы времени и частоты в СССР [2].

В США вопросами время-частотного обеспечения занимается Национальный институт стандартов и технологий (NIST) и Военно-морская обсерватория (USNO), в которой находится государственный эталон времени и частоты.

Основой для создания Государственной службы единого времени и эталонных частот (ГСВЧ) Украины явились ряд организаций и предприятий Украины, входящих в прошлом в состав государственной службы единого времени и эталонных частот СССР [2-4].

Для постановки задачи сравнения эталонов времени и частоты определяющим является понятие шкалы времени и сдвига шкал. Для аналитической записи идеальной шкалы времени предложено выражение с применением аппарата дельта-функций [5]:

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

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). В случае выбора единого начала отсчета времени для описания шкал вводится сдвиг шкал времени  $\Delta T$  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 пункта А.

Для вычисления сдвига шкал в случае  $|\Delta T| < T/2$  предложено соотношение [5]:

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

$$\text{где } H_B(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t + nT - \Delta T^{AB}).$$

Интегрирование в формуле (2) выполняется по временной шкале, для которой определяется сдвиг (в данном случае по времени шкалы пунктов А или В). Для определения сдвига шкал в  $n$ -ом периоде необходимо на  $nT$  изменить пределы интегрирования в выражении (2).

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

$$H_A(t) = (1/T) \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp(j\theta_k^A); H_B(t) = (1/T) \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp(j\theta_k^B) = (1/T) \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp[j(\theta_k^A + \Psi_k^{BA})], \quad (3)$$

где  $\theta_k^A = k\Omega t$ ;  $\theta_k^B = k\Omega t + k\Omega\Delta T^{BA}$  – полные фазы  $k$ -ых гармоник спектра шкал пунктов А и В соответственно;  $\Omega = 2\pi/T$  – угловая частота первой гармоники;  $\Psi_k^{BA} = k\Omega\Delta T^{BA}$  – начальные фазы  $k$ -ых гармоник спектра шкалы В.

В соответствии с выражениями (3) получается фазовое определение сдвига шкал:

$$\Delta T^{BA} = (\theta_k^B - \theta_k^A) / k\Omega. \quad (4)$$

Соотношения (4) справедливы и для случая различных частот эталонов. При этом сдвиг шкал  $\Delta T$  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  $n$ -ом периоде составит  $\Delta T_n^{BA} = (k\Delta\Omega nT + k\Omega\Delta T^{BA}) / k\Omega = \Delta\Omega nT / \Omega + \Delta T_0^{BA}$ , где  $\Delta T_0^{BA}$  – начальный сдвиг шкал.

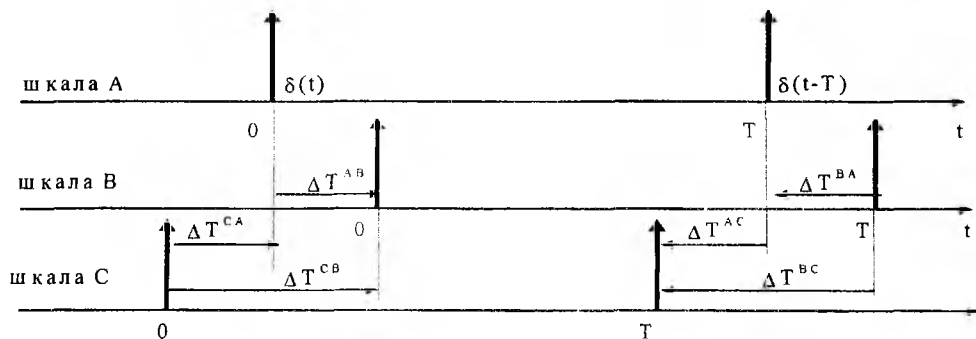


Рис. 1

В рассмотренном случае  $\Delta\Omega = \Omega (\Delta T_n^{BA} - \Delta T_0^{BA}) / nT$ , 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 в период развития релятивистской теории А.Эйнштейном (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 возимых 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 группе относятся методы односторонней передачи информации из одного пункта в другой. Сдвиг шкал можно определить, если известно время задержки сигналов между пунктами. Примеры реализации методов первой группы – перевозимые квантовые часы (ПКЧ); СДВ, ДВ и спутниковые радионавигационные системы (СРНС); система, использующая отражение сигналов от Луны; передача сигналов времени по ТВ; односторонний радиометеорный 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 включает в себя методы, основанные 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. Активные методы реализуются в радиометеорном, спутниковых и оптических каналах связи.

В методах 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 сличаемыми пунктами. Методы этой группы реализованы в СРНС ГЛОНАСС и GPS в дифференциальном режиме, а также в радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами (РСДБ). В СРНС ГЛОНАСС и GPS дополнительная шкала формируется эталоном на борту спутника. В РСДБ роль дополнительной шкалы играют высокостабильные сигналы космических источников (пульсары, квазары).

В настоящее время высшую точность сравнения обеспечивают ПКЧ, радиометеорный метод сравнения (РМС), СРНС и спутниковые каналы связи

Основным критерием качества систем сравнения является погрешность измерения сдвига шкал. Общими для всех методов сравнения, за исключением ПКЧ, источниками погрешностей являются: нестабильность и невзаимность (для активных методов) задержки сигналов в канале; нестабильности аппаратурных 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, аппаратурной реализацией, релятивистскими эффектами и др.

Опуская подробный сопоставительный анализ методов сравнения, можно выделить три метода, обеспечивающие в настоящее время высшую точность и широко применяемые для решения научно-технических задач, – ПКЧ, РМС, передача сигналов времени по спутниковым каналам связи 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  $10^{-14}$ .

Особую актуальность и приоритетный характер для Украины имеет РМС, поскольку, с одной стороны, Украина не располагает собственными СРНС, связными ИСЗ и предприятиями по выпуску ПКЧ, а, с другой стороны, работы по исследованию и применению РМС много лет успешно проводятся в Украине (ХНУРЭ).

### **Основы радиометеорного метода сравнения эталонов времени и частоты**

Метеор – явление, происходящее в средней атмосфере Земли при вхождении мелких твердых космических частиц массой не менее  $10^{-9}$  г и не более примерно 10 г. Явление это заключается в испарении частиц и возникновении плазменного образования – метеорного следа, образующегося в результате столкновения испарившихся метеорных атомов с молекулами и атомами газов земной атмосферы чаще всего в диапазоне высот от 110...105 до 85...80 км. В среднем метеорные следы имеют протяженность около 15 км с начальным радиусом примерно 1...2 м. Исследование метеоров имеет многовековую историю; наиболее полно это изложено в [6].

Работы по радионаблюдениям метеоров начались в Харькове в 1953 г. на кафедре "Основы радиотехники" политехнического института под руководством проф. Кащеева Б. Л.. Фундаментальные исследования метеорных явлений в Харькове позволили начать прикладные работы по использованию отражения радиоволн от метеорных следов [7].

Зеркальный характер отражения УКВ от метеорных следов позволяет использовать этот процесс для передачи информации и сравнения шкал времени. Длина трассы такого радиоканала связи определяется высотой расположения области метеорного следа, отражающей радиоволны, высотами антенн в пунктах и рефракцией радиоволн в тропосфере. Максимальная дальность составляет около 2000 км [7].

В основе РМС лежат высокая стабильность и обратимость задержки сигналов при метеорном распространении радиоволн. При этом РМС превосходит другие методы по таким показателям, как производительность измерений (на получение единичного измерения требуется время порядка 10 с), автономность, оперативность, экономичность, скрытность, устойчивость к ионосферным возмущениям. К недостаткам РМС следует отнести то, что этот метод является активным, то есть требует излучения радиосигналов в обоих пунктах измерений.

Работы по РМС были начаты в Харькове вскоре после первых публикаций по этому вопросу [8] и уже в начале 70-х годов были разработаны первые экспериментальные образцы аппаратуры типа МЕТКА-1 для Министерства обороны (МО) СССР (см. таблицу), а также проведены эксперимен-

тальные сеансы сравнения шкал в службе времени Госстандарта на трассе Харьков-Москва [9]. При этом были получены погрешности сравнения 0,2...0,3 мкс. Позднее к данному направлению подключился Казанский университет [10].

В дальнейшем работы проводились в следующих направлениях:

– теоретические и экспериментальные исследования возможностей повышения точности РМС (исследования характеристик метеорного радиоканала, анализ и синтез алгоритмов сравнения, поиск путей снижения сигнальных и аппаратурных погрешностей, совершенствование методик обработки результатов измерений);

– разработка, изготовление и внедрение образцов радиометеорных комплексов сравнения (РМКС) для эталонов времени и частоты Госстандарта;

– разработка, изготовление и испытания макетов РМКС в рамках ОЖР.

Головными организациями, представляющими интересы потребителей, явились: организации Госстандарта – Всесоюзный (ныне Всероссийский) НИИ физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), а в Украине – Харьковский Государственный НИИ метрологии (ХГНИ-ИМ); от промышленности в интересах МО – Ленинградский научно-исследовательский радиотехнический институт (ЛНИРТИ), ныне переименованный в Российский институт радионавигации и времени (РИРВ).

### Результаты теоретических исследований

При исследовании метеорного радиоканала основное внимание было обращено на параметры, определяющие потенциал РМС: полоса пропускания; нестабильность, оцениваемая скоростью изменения задержки сигналов  $V_{\tau} = d\tau / dt$ ; невзаимность 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  $V_{\tau}$  использовались результаты измерений задержки сигналов по фазе несущих частот и по фазе разностной частоты с использованием разработанных комплексов ФАЗА и МЕТКА-11, параметры которых приведены в таблице. Выборочные средние значения для  $|V_{\tau}|$  составили: в локационном режиме –  $(2,5...3)10^{-7}$ ; на трассе –  $(0,5...1)10^{-7}$ . Максимальные значения –  $(1...2)10^{-6}$  и  $(5...7)10^{-7}$  соответственно. Закон распределения  $|V_{\tau}|$  близок к экспоненциальному. В 5...10% случаев имели место аномалии, которые можно объяснить необратимостью задержки сигналов на отдельных метеорных следах [7, 11].

Результаты экспериментального исследования кратковременной фазовой нестабильности задержки сигналов в метеорном радиоканале позволили обосновать выбор фазового принципа построения второго поколения промышленной радиометеорной аппаратуры [12, 13].

Анализ теоретических и экспериментальных исследований источников невзаимности 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 невзаимности. При этом можно согласиться с верхней теоретической оценкой (менее 1 нс) [7].

Результаты исследования метеорного радиоканала были положены в основу линейной параметрической модели метеорного канала сравнения [7], состоящей из каскадного соединения линейного четырехполосника с постоянными параметрами, идеальной линии с управляемой величиной задержки, идеального амплитудного модулятора и генераторов модулирующих функций.

Анализ прохождения сигналов в ЛПИМ МКС показал, что основной вклад метеорного распространения радиоволн МРРВ в погрешность измерений связан с вариациями амплитуд импульсов и изменениями задержек на интервалах, соизмеримых с периодом повторения и более.

Проведен комплексный анализ основных алгоритмов сравнения (встречный алгоритм – ВА; ретрансляционный алгоритм – РА и опорно-ретрансляционный алгоритм – ОРА) с учетом влияния конечного отношения сигнал/помеха, нестабильности задержки сигналов в канале и корреляции погрешностей в пунктах. Показаны преимущества ВА и выполнен синтез более совершенных комбинированных и модифицированных алгоритмов [7, 14]. Новые алгоритмы запатентованы [15-17].

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 [18-22]. Анализ показал преимущества сложных сигналов и позволил наметить основные направления уменьшения сигнальных погрешностей: увеличение базы сигналов; усреднение результатов измерений по всем импульсам ко-

да; 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 результатов этих измерений. Предложено техническое решение, реализующее такую обработку [23].

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 невязности задержек в общих устройствах приема и передачи. АСП не зависят от алгоритмов сравнения и составляют для результатов измерения сдвига шкал в пунктах

$$\Delta_{АП}^{AB} = -\Delta_{АП}^{BA} = \frac{(\tau_{ПРМ}^A - \tau_{ПРД}^A) - (\tau_{ПРМ}^B - \tau_{ПРД}^B)}{2}, \quad (5)$$

где  $\tau_{ПРМ}^A$ ,  $\tau_{ПРМ}^B$  – задержки в приемо-измерительных каналах аппаратуры);  $\tau_{ПРД}^A$ ,  $\tau_{ПРД}^B$  – задержки в трактах формирования и излучения сигналов..

Из выражения (5) следует, что АСП становятся равными нулю, если комплекты аппаратуры в пунктах имеют идентичные параметры. Однако это невозможно обеспечить по следующим причинам:

- 1) изменения 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 невязными задержками сигналов;
- 3) вариация амплитуд принимаемых сигналов приводит к их 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) [24], а также способ компенсации АСП, получивший название "сквозной канал" [25] и реализованный в РМКС МЕТКА-3. Однако эти способы не позволяют контролировать и учитывать второй и третий источники АСП (невязности задержек сигналов в общих устройствах и изменения задержек сигналов при вариации амплитуд принимаемых сигналов).

Невязность задержек АФУ в РМС была впервые обнаружена в Харькове в 1991 г. при "локации друг на друга" двух полуккомплектов аппаратуры МЕТКА-8 [12]. Изменение длин кабеля, смена АФУ и замена элементов в коммутаторе приводили к АСП до 20...30 нс. Физически невязность задержек в АФУ можно объяснить изменениями формы сигнала из-за отличий в режимах согласования кабеля при приеме и при излучении. 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 [7]. Возможность измерять полную величину АСП аппаратуры в каждом из пунктов для сигналов с симметричной формой обеспечивает запатентованный способ зеркальной ретрансляции сигналов (ЗРС) [26].

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" и т. п. В алгоритмах обработки результатов не учитывалась их неравноточность и некоторые специфические особенности РМС. Поэтому были применены алгоритмы весовой обработки результатов измерений, различающиеся способами оценок весовых коэффициентов и этапами обработки [27]. Поскольку гипотеза о нормальности закона распределения, как правило, не подтверждается, рекомендовано применять робастные методы обработки результатов [28, 29].

В процессе разработки и испытаний в Харькове экспериментальных образцов аппаратуры предложены единые критерии оценки погрешностей и обобщенный показатель качества [30]  $\beta = \sigma \sqrt{P2\Delta f_{П} BNk}$ , где  $\sigma$  – одна из разновидностей оценки случайной погрешности;  $P$  – излучаемая

импульсная мощность;  $2\Delta f_{\Pi}$  – ширина спектра сигнала;  $B$  – база сигнала;  $N$  – число импульсов в коде;  $k$  – число периодов, соответствующее единичному измерению.

Предельное значение обобщенного показателя качества было оценено на основе информационной теории измерений и составило  $\beta_{\min} \approx 10^{-2} (\text{Дж})^{1/2}$ .

Подобные коэффициенту  $\beta$  показатели качества можно применить для сравнения не только различных типов РМКС, но и систем сравнения, основанных на других принципах. Достоинство предложенного показателя заключается в том, что с его помощью можно для определенных классов РМКС рассчитать диаграммы обмена энергии и (или) полосы частот на погрешность сличения.

Дальнейшим развитием обобщенного коэффициента (6) явилась обобщенная статистическая модель РМС с обучением, позволяющая учесть условия размещения аппаратуры в пунктах, реальную помеховую обстановку, сезонные и суточные изменения численности, напряженность и ориентацию трассы, качество исполнения аппаратуры [7]. Обобщенная статистическая модель РМС позволяет генерировать результаты сличений для измененных параметров трассы и аппаратуры (энергетика, вид и параметры сигнала, метод сравнения, техническая реализация отдельных блоков и др.).

### **Разработка радиометеорной аппаратуры и систем сравнения эталонов времени и частоты**

Стремление достичь потенциальных для РМС наносекундных погрешностей и необходимость применять для этого различные виды сложных сигналов (линейно-частотно модулированные, фазоманипулированные, двухчастотные) привели к разработке принципиально новых прецизионных устройств для создания и испытаний РМКС. К ним относятся: устройства формирования сигналов и гетеродинов РМКС, привязанных к эталону; устройства обработки и оценки параметров принимаемых сигналов; устройства для измерения и компенсации аппаратурных погрешностей; имитаторы метеорологического канала и др.

Результаты теоретических исследований, опыт разработки и эксплуатации первых образцов РМКС привели к созданию аппаратуры двух типов:

- 1) экспериментальные образцы РМКС для сличения эталонов времени Госстандарта и Наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами (НАКУ КА) на территории Украины;
- 2) макеты аппаратуры для научных исследований и ОКР, проводимых ЛНИРТИ совместно с ХНУРЭ.

К настоящему времени разработано несколько поколений РМКС – экспериментальные образцы и специальные макеты типа МЕТКА, два поколения промышленной аппаратуры – 17-Н-91 (принята в эксплуатацию постановлением правительства №815-242 от 27.08.85 г.) и 17-Н-830 (прошла автономные испытания в 1997-1998 г.), разработанные в С.-Петербурге (РИРВ) при участии ХНУРЭ.

Основными потребителями аппаратуры являлись и являются службы времени Госстандарта СССР (ныне Госстандарта Украины и Госстандарта России) и других ведомств. Радиометеорная аппаратура сравнения используется для синхронизации частоты пунктов 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. Отличительными особенностями комплексов МЕТКА-6 являются: аналоговое суммирование двух соседних импульсов кода и измерение временного положения путем аппаратурного усреднения по всем парам импульсов кода; применение пяти кодовых комбинаций для отличия излучаемых и принимаемых сигналов; стробирование принимаемых сигналов в соответствии с кодом ожидаемых для приема сигналов; высокоточный дискриминатор для оценки временного положения по нулевому переходу разности прямого и задержанного сигналов; наличие специального АРУ, позволившего расширить динамический диапазон приемного устройства до 50 дБ; ручное пилотирование аппаратурных задержек и возможность их компенсации в пределах  $\pm 90$  нс с дискретностью 10 нс; 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 ИВМ для оперативной статистической обработки результатов измерений, их хранения и вывода на печать.

Таблица

Параметры	Тип аппаратуры				
	МЕТКА-1	МЕТКА-5...7	МЕТКА-4	ФАЗА	МЕТКА-11
Алгоритм	РА	ОРА		ОРА+ ВА	ВА
Рабочая частота, МГц	57,3			45,5	
Импульсная мощность, кВт	50	20...40	3	10	2...4
Вид сигнала	Код из 6-ти импульсов	Код из 16-ти импульсов	Код из 4-х ЛЧМ	ФМ+ДЧС	ФМ+ДЧС
Длительность сигнала, мкс	5	16x2	4x50	15x26-ФМ, 2x500-ДЧС	10x13-ФМ, 5x265-ДЧС
Погрешность, нс	300	15...30	10...30	< 1	< 1
Ширина спектра, МГц	0,4	1	2,5	1	0,2
Внедрение	МО СССР; аппаратура 17-Н-91	Госстандарт Украины и России, НАКУ КА Украина	ОКР "РАПС"	НИР "ТРОПА"; ОКР "ЧЕРТА"; аппаратура 17- Н-830	ОКР "Управление"

Применение для измерений огибающих как простых сигналов (например МЕТКА-6), так и сложных сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) заполнения (МЕТКА-3 и МЕТКА-4), не позволило достичь погрешностей меньших, чем 10 нс. Поэтому были рассмотрены возможности использования фазовых методов построения РМКС, для чего был создан макет аппаратуры ФАЗА (1986-89 гг.). В результате разработки РМКС ФАЗА (таблица) была показана возможность реализации фазовых принципов построения радиометеорной аппаратуры.

Аппаратура ФАЗА была разработана и испытана в Харькове в период 1985-90 г.г. в ходе выполнения ОКР совместно с РИРВ. В аппаратуре ФАЗА использованы: составной сигнал, содержащий код из 15 фазоманипулированных (ФМ) по Баркеру импульсов и когерентный двухчастотный сигнал (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 компенсация в заданных пределах.

Аппаратура ФАЗА послужила прототипом не только для промышленной аппаратуры 17-Н-830, но и последнего, разработанного в Харькове, экспериментального образца аппаратуры МЕТКА-11.

Основным отличием комплекса МЕТКА-11 является наличие двух режимов – сравнения 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 использования 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 полностью реализован ДЧС – в виде бинарной по закону меандра ФМ несущей частоты. В состав аппаратуры МЕТКА-11 включена ЭВМ ИВМ, 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 отсче-

там; 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 разработанных РМКС, а также ряда устройств и контрольно-измерительных приборов защищены авторскими свидетельствами на изобретения и патентами [15-17, 23, 25, 26].

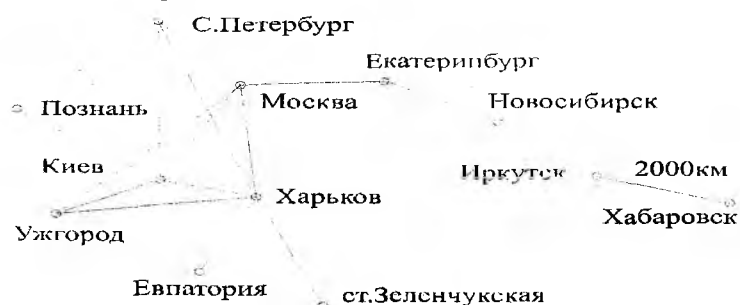


Рис. 2

С 1985 г. действует многопозиционная радиометеорная система сравнения (МРМСС) сравнения эталонов Украины и России [9]. Структура МРМСС приведена на рис. 2. МРМСС 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, 9.10.92г.), проводятся регулярные сравнения на трассе Харьков – Москва. Регулярно проводятся сеансы сравнения первичного (Харьков) и вторичных (Киев, Ужгород) эталонов Украины. Проведены экспериментальные сравнения в "треугольнике" Харьков – Киев – Москва (октябрь 1993г.) [10].

### 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 функциональные возможности [7].

Наиболее перспективным направлением уменьшения случайных погрешностей РМС является применение сложных сигналов. Наивысшую точность при этом обеспечат КДСЧС, которые позволят 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 эталонных 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.

Рассматривая перспективы применения РМС для решения задачи синхронизации цифровой сети связи Украины, можно отметить следующие преимущества РМС перед СРНС [31]:

а) существенно более высокая оперативность РМС, о чем наглядно иллюстрирует рис. 3, на котором приведены семейство графиков хода шкал времени  $\Delta T(t)$  для ряда значений относительной нестабильности частот генераторов  $\Delta f/f_0 = \Delta T/\Delta t$  и графики зависимости погрешностей сравнения шкал времени от времени накопления результатов  $\sigma(t)$  для системы GPS и двух метеорных комплексов (МЕТКА-6 и МЕТКА-11);

б) более предпочтительные экономические показатели РМС – ориентировочная стоимость комплекта аппаратуры МЕТКА-6 составляет 5000...10000 долларов США, в то время как стоимость высокоточных приемников GPS лежит в пределах 25000-50000 долларов США.

в) РМС является автономным методом, не зависящим от работоспособности и селективного доступа к зарубежным системам.

В качестве примера оперативности РМС можно привести результаты сеанса сравнения водородного генератора пункта НАКУ КА (Евпатория) с эталоном ГНПО "Метрология" (Харьков) продолжительностью около трех часов, в течение которых была выявлена неточность установки частоты генератора пункта НАКУ КА  $\Delta f/f \sim 10^{-11}$ .

Наиболее перспективным направлением уменьшения погрешностей РМС является применение сложных сигналов и фазовых принципов построения аппаратуры. Из алгоритмов сравнения наиболее перспективен ВМ в сочетании с обменом результатами измерений между пунктами по радиометеорному каналу связи.

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 синхронизации и передачи информации.

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

Рассматривая возможности применения РМС для синхронизации сети связи Украины, следует также учитывать, что первичный и вторичные эталоны времени и частоты Украины (Харьков, Киев, Ужгород) оснащены аппаратурой МЕТКА-6. Это может упростить создание подсистемы синхронизации сети связи, позволит для отдельных пунктов осуществлять непосредственную синхронизацию в пределах прямой видимости и, главное, обеспечит синхронизацию на уровне современных эталонов времени и частоты. Применение комплексов типа МЕТКА-6 для синхронизации сети связи Украины потребует доработки аппаратуры (введение формирователя шкалы времени и режима грубого сведения шкал времени) и создания соответствующего математического обеспечения.

Всего по работе опубликовано 2 монографии, более 100 статей, защищены 1 докторская и 6 кандидатских диссертаций, получено 3 патента и более 30 авторских свидетельств на изобретения. Отдельные достижения отмечены правительственными наградами (Кашеев Б. Л., Дудник Б. С., Семенов С. Ф.).

Результаты работы систематически представлялись конференциях (конференции по РРВ; "Метрология в радиоэлектронике"; Европейские форумы по времени и частоте; URSI в 1996г.; "Метеорные частицы в атмосфере Земли" в 1996г. и др.)

Разработанные образцы аппаратуры демонстрировались на ВДНХ (1983-85; 1987; 1988 гг.), специализированных выставках; удостоивались дипломами и медалями. Результаты работы используются в подготовке инженерных и научных кадров в ХТУРЭ. Поставлен учебный курс "Системы синхронизации времени и частоты". Подготовлено два учебных пособия и раздел учебника для военных вузов.

Помимо авторов статьи в становлении и развитии РМС активно и плодотворно участвовали со-

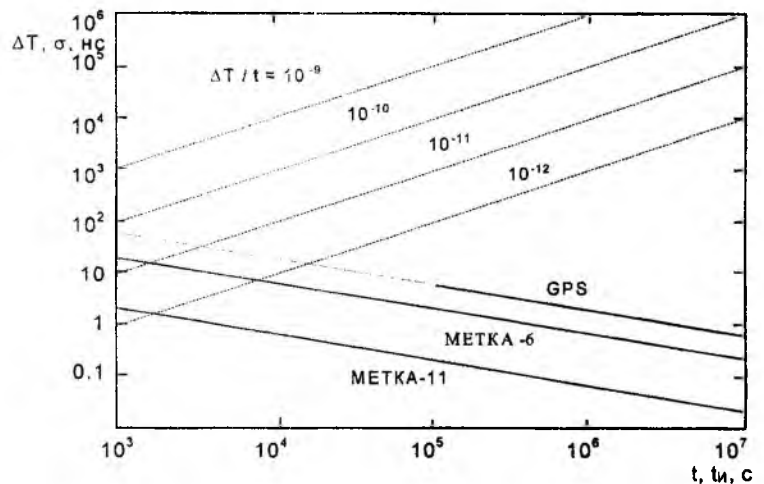


Рис. 3

трудники Казанского университета, работавшие в данном направлении под руководством проф. Сидорова В. В., представители организаций Госстандарта и АН России (Пушкин С. Б., Тельпуховский Н. А., Выгнов В. А.), Госстанарта Украины (Лейкин А.Я., Сопельников М. Д., Соловьев В. С., Клейман А. С., Дудич И. И., Ахмадов А. А.), НИИ России (сотрудники РИРВ – Ильин Г. М., Плузников С. Н., Геворкян А. Г., Болотов И. М., Кошелев В. К.) и НИИ Украины (сотрудники НИИРИ – Макаренко Б. И., Малков А. Б., Кулишенко В. Ф.).

**Список литературы:** 1. Мангелл А. Дж. Национальные эталоны времени и частоты // ТИИЭР. 1986. Т.74, № 1. 2. Болотов И. М., Геворкян А. Г. Развитие научнотехнических основ СЕВ. //Радионавигация и время. 1992. № 1. С. 50-52. 3. Величко О. М., Миронов М. Т., Сидоренко Г. С. та ін. Державна програма створення та розвитку Державної служби єдиного часу і еталонних частот //Український метрологічний журнал. 1996, Вип. 4. С. 13–16. С. 13–16. 4. Клейман. О. С., Оголюк В. П., Сидоренко Г. С. та ін. Державний первинний еталон одиниць часу і частоти. //Український метрологічний журнал. 1997. Вип. 3. С. 18–23. 5. Кащеев Б. Л., Коваль Ю. А., Кундюков С. Г. Высокоточные радиометеорные системы сравнения эталонов времени и частоты // Радиоэлектроника и информатика. 1997. N 1. С.918. 6. Астапович И. С. Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Физматиздат, 1958. 640 с. 7. Коваль Ю. А., Кащеев Б. Л., Горбач В. И., Бондарь Б. Г. Метеоры сегодня. Киев.: Техника, 1996. 196 с. 8. Lattorre V., Jonson G. Time synchronisation techniques// "IEE INT. Conv. Rec.". 1964. Part 6. P. 422428. 9. Дудник Б. С., Кащеев Б. Л., Лейкин А. Я. Использование метеорного распространения радиоволн для привязки часов службы времени и частоты // Измерительная техника. 1971. № 12. С.3842. 10. Сидоров В. В., Кардоник Г. С., Плеухов А. Н. Высокоточная синхронизация разнесенных радиотехнических систем. Казань: Изд-во КГУ, 1978. 11. Кащеев Б. Л., Бавыкина В. В., Коваль Ю. А. и др. Оценка кратковременной нестабильности времени задержки сигналов при метеорном распространении радиоволн // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.техн. сб. 2001. Вып. 120. С.25-32. 12. Кащеев 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. 13. Коваль Ю. А., Кащеев Б. Л., Кундюков С. Г. Фазовая радиометеорная аппаратура сличения шкал времени // Измерительная техника, 1998. N 5. С.27-30. 14. 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. 8591. 15. А.С. 712807 СССР, МКИ G 04 C 11/02. Способ сравнения шкал времени/ Б. С. Дудник, Б. Л. Кащеев, В. П. Моисеев. Оpubл. 7.06.80 Бюл. №4. 16. 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. Оpubл. 9.05.85 Бюл. №26. 17. А. С. 1644079 СССР, МКИ G 04 C 11/02. Способ сличения шкал времени и устройство для его осуществления/ В. В. Бавыкина, В. П. Моисеев. Оpubл. 23.04.91 Бюл. №15. 18. Бавыкина В. В., Коваль Ю. А. К вопросу о потенциальной точности фиксации временного положения сигналов при сличении шкал хранителей времени // Радиотехника. Харьков: Издво ХГУ, 1981. Вып. 57. С.63-69. 19. Бавыкина В. В., Коваль Ю. А. Анализ влияния боковых пиков сложных сигналов на погрешность сличения высокоточных шкал времени //Радиотехника. Харьков: Издво ХГУ, 1981. Вып. 59. С.5057. 20. Бавыкина В. В., Коваль Ю. А. О влиянии формы огибающей ЛЧМ сигналов на погрешность сличения шкал хранителей времени // Радиотехника. 1982. Вып. 61. С. 13-18. 21. Дудник Б. С., Кащеев Б. Л., Коваль Ю. А., Бавыкина В. В. Применение дискретных составных частотных сигналов для определения временного положения импульсов// Радиотехника. Харьков: Изд-во ХГУ. 1986 Вып. 76. С. 19-25. 22. Кащеев Б. Л., Дудник Б. С., Коваль Ю. А., Бавыкина В. В. Потенциальная точность фиксации временного положения радиосигналов с учетом требований к уровню допустимых внеполосных излучений// Радиотехника. Харьков: Издво ХГУ, 1987. Вып. 82. С.27-34. 23. А.С. 1741096 СССР, МКИ G 04 C 11/02. Устройство для сравнения эталонов времени / Б. Л. Кащеев, Ю. А. Коваль, Б. С. Дудник и др. Оpubл. 15.06.92. Бюл. №22. 24. Дудник Б. С., Кащеев 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.1516. 25. А.С. 559214 СССР, МКИ G 04 C 11/02. Способ обработки сигналов для синхронизации шкал времени/ В. П. Моисеев. Оpubл. 22.07.77 Бюл. №19. 26. Патент Украины 20380 А, G 04 C 11/02. Способ обработки сигналов при сличении шкал времени и устройство для его реализации / Б. С. Дудник, Б. Л. Кащеев, Ю. А. Коваль и др. 27. Коваль Ю. А., Бавыкина В. В., Попович А. В. Исследование возможностей применения весовой обработки измерительной информации при радиометеорной синхронизации шкал эталонов времени // Радиотехника. Харьков: Издво ХГУ. 1991. Вып.94. С. 38-44. 28. 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. 29. Бавыкина В. В., Троцин О. Л. Численное исследование робастных процедур оценивания погрешностей метеорного сличения шкал времени // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.техн. сб. 1999. Вып. 109. С. 75-82. 30. Дудник Б. С., Коваль Ю. А., Пушкин С. Б. Критерии оценки точностных показателей радиометеорных комплексов для синхронизации шкал времени // Измерительная техника. 1986. №1. С.1618. 31. Кащеев Б. Л., Коваль Ю. А., Кундюков С. Г. О возможности использования радиометеорного канала для синхронизации национальной сети связи Украины // Зв'язок. 1999. №5.С. 32-36.